

**Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н.**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ  
СУДНА**

Третье издание,  
переработанное и дополненное

Одесса  
2007

Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. – 3-е изд., перераб. и доп.- Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с.

УДК 656.61.052

Приводятся общие сведения об управлении. Освещаются особенности управляемости судов. Рассматриваются судовые комплексы для управления движением, включающие силовые средства и электронные системы управления.

Предназначена для учащихся судоводительской специальности морских академий, может быть полезной для штурманского персонала транспортных, рыбопромысловых и научно-исследовательских судов.

*Ил. 148, табл. 16, библиогр. 44 назв.*

Рецензенты: **В.Г.Алексишин**, к.т.н., профессор;  
**Э.М.Половинка**, д.т.н., профессор.

© – Л.Л.Вагущенко, Цымбал Н.Н.

## **Введение**

Проводка судна из порта отхода в порт назначения относится к сложным задачам управления. Ее неординарность объясняется: сложностью судна как объекта управления и многообразием влияния на него внешней среды; необходимостью обработки большого количества данных, как от внутренних, так и от внешних источников информации; сложностью навигационной аппаратуры и силовых средств; ограниченным временем для принятия решений и рядом других обстоятельств.

Характеризуя **сложность судов как объектов управления**, необходимо отметить:

- различия в управляемости из-за многообразия движительно-рулевых комплексов, размеров и форм корпуса;
- большую инерционность;
- неполную управляемость и возможность потери управляемости;
- влияние на динамические свойства судов изменений загрузки и путевых условий (мелководье, каналы, реки);
- зависимость эффективности средств управления от хода, режима работы двигателей, вида перемещения и других причин;
- значительность влияния на движение возмущений среды;
- неоднозначную в ряде случаев реакцию на управляющие воздействия.

**Условия внешней среды**, в которых приходится решать задачи судовождения, весьма разнообразны: штормовая погода, ограниченная видимость, ледовая обстановка, мелководье, приливные явления, стесненные условия, наличие других судов и т.д. Многочисленны и встречаемые при судовождении **виды управления**:

- планирование переходов;
- ситуационное управление (определенные последовательности действий при подходах к узкостям, к районам с ограниченной видимостью и др.);
- выбор стратегий (для расхождения с судами, с тропическими циклонами, выбор пути во льдах и др.);
- управление при расчетной скорости, на маневренных режимах хода и на предельно малых скоростях;
- взаимодействие с другими судами (использование буксиров, плавание в караванах, участие в спасательных операциях);
- регулирование (стабилизация на курсе и заданном маршруте);

- управление в исключительных условиях (при наличии повреждений, при обледенении и др.);
- управление с помощью якорей и других вспомогательных средств;
- динамическое позиционирование;
- и ряд других видов.

Сложностью задач судовождения объясняется и тот факт, что большинство из них пока не может быть надежно решено без участия судоводителя. Комплексы, управляющие движением современных морских судов, относятся к человеко-машинным системам. Они включает в себя две части: оператора и искусственную систему (средства автоматики). Наибольшее применение в современных системах управления получили компьютерные средства автоматики. Поэтому искусственную часть современных судовых комплексов называют *электронной или компьютерной системой*.

Главное направление развития бортовых электронных систем управления движением состоит в том, чтобы позволить одному вахтенному помощнику в открытом море и в прибрежных водах обеспечивать безопасное и эффективное судовождение, а также значительно облегчить штурманскому составу управление судном в стесненных водах. *Первой и основной задачей* электронных систем судовождения на современном этапе является информационная поддержка решений вахтенного помощника. *Вторая задача* состоит в обеспечении ему возможности непосредственного управления силовыми средствами, включая главную движительную установку. *Третья задача* – это автоматическое решение относительно несложных задач управления, таких как вождение судна по заданному маршруту, управление скоростью хода и выполнение ряда других операций.

В данной книге рассматриваются вопросы, относящиеся к третьей задаче автоматизации судовождения. При подготовке книги были использованы источники, приведенные в списке литературы, сведения из технической документации современных систем управления движением судов и касающиеся излагаемых вопросов материалы, найденные в Интернете. Введение и главы 3, 10 книги написаны Н.Н.Цымбалом, остальные разделы – Л.Л.Вагушенко.

Авторы глубоко признательны В.Г.Алексишину, А.С.Мальцеву, Э.М.Половинке за труд по просмотру рукописи книги и за ценные советы, которые способствовали ее улучшению. Все замечания и пожелания по совершенствованию книги, которые возникнут при анализе ее содержания, будут приняты с благодарностью.



## **Основные обозначения**

*В тексте книги, если не оговорено иное, использованы следующие обозначения и сокращения:*

АР – авторулевой;  
БПМ – блок программ маневров авторулевого;  
ВРШ – гребной винт регулируемого шага;  
ВФШ – гребной винт фиксированного шага;  
ВС – внешняя среда;  
ГД – главный двигатель;  
ГДУ – главная движительная установка;  
ГДРУ – главная движительно-рулевая установка;  
ГДХ – гидродинамические характеристики;  
ДП – диаметральной плоскости судна;  
ДСП – датчик скорости поворота;  
ЗХ – задний ход;  
ИМ – исполнительный механизм или модуль;  
ИУС<sub>v</sub> – интегрированная управляющая скоростью судна система;  
КС – командная (управляющая) система;  
ОУ – объект управления;  
ПВК – поворотная винтовая колонка;  
ППС – поворотная пропульсивная система (Pod propulsion system);  
ПРУ – подруливающее устройство;  
ПУ – путевой угол;  
ПХ – передний ход;  
РМ – рулевая машина;  
РП – рулевой привод;  
РУ – рулевое устройство;  
САР – система автоматического регулирования;  
САУ – система автоматического управления;  
СВМ – система вождения судна по маршруту;  
СДАУ<sub>ГД</sub> – система дистанционного автоматизированного управления главным двигателем;  
СОЦ – система обеспечения целостности комплекса управления;  
СС – силовое средство;  
СУ – система управления;  
УУ – устройство управления;  
ЦМ – центр массы судна;  
ЦПУ – центральный пост управления;  
WP – путевая точка (way point);

WOP – точка начала поворота (wheel over point).  
 $B$  – ширина судна на миделе;  
 $C_a$  – центр давления ветра на корпус судна;  
 $D$  – весовое водоизмещение (масса) судна;  
 $D_p$  – диаметр гребного винта;  
 $d$  – дифферент;  
 $F_K$  – подъемная сила на корпусе судна;  
 $G$  – центр массы судна;  
 $H$  – глубина акватории;  
 $H_p$  – шаг гребного винта;  
 $h$  – поступь гребного винта;  
 $h_R$  – высота руля;  
 $J_\omega$  – момент инерции судна относительно вертикальной оси,  
 проходящей через ЦМ, с учетом присоединенного момента;  
 $k_S$  – коэффициент передачи судна по управляющему воздействию;  
 $k_{11}, k_{22}, k_{66}$  – коэффициенты присоединенных масс;  
 $K_{K0}$  – коэффициент силы сопротивления на корпусе при угле атаки,  
 равном нулю;  
 $K_{K\alpha}$  – коэффициент силы сопротивления при угле атаки  $\alpha$  ;  
 $L$  – длина судна между перпендикулярами;  
 $L_R$  – длина руля;  
 $l_K$  – расстояние от точки приложения позиционной силы до ЦМ;  
 $l_S$  – расстояние от ЦМ судна до плоскости вращения винта;  
 $l_{ЦП}$  – расстояние от центра боковой парусности до ЦМ;  
 $M_a$  – момент аэродинамической силы;  
 $M_\Gamma$  – момент гидродинамической силы;  
 $M_D$  – момент демпфирующей силы;  
 $M_K$  – момент позиционной силы на корпусе;  
 $M_U$  – момент боковой силы винта;  
 $m_B, m_L$  – массы судна с учетом присоединенных масс в поперечном и  
 продольном движении;  
 $n$  – частота вращения гребного винта;

$P_a, P_{aB}, P_{aL}$  – сила давления ветра на надводную часть корпуса, ее поперечная и продольная составляющие;

$P_R, P_{RB}, P_{RL}$  – сила на руле, ее боковая и продольная составляющие;

$P_K, P_{KB}, P_{KL}$  – позиционная гидродинамическая сила на корпусе, ее поперечная и продольная составляющие;

$P_{ПУ}$  – упор подруливающего устройства;

$P_U$  – упор гребного винта;

$P_{UB}$  – боковая сила гребного винта;

$P_w, P_{wB}, P_{wL}$  – сила действия волн на корпус судна, ее поперечная и продольная составляющие;

$P_{\Lambda}, P_{\Lambda B}, P_{\Lambda L}$  – инерционная сила, вызванная ускорением в изменении линейной скорости судна, ее поперечная и продольная составляющие;

$P_{\Omega}$  – центробежная сила;

$q_k$  – курсовой угол кажущегося ветра;

$R_K$  – сила сопротивления воды движению корпуса,

$R_{\Omega}$  – радиус циркуляции судна;

$R_{\Omega 0}$  – радиус самопроизвольной циркуляции судна при  $\beta = 0$ ;

$S_{aB}, S_{aL}$  – боковая и лобовая площадь парусности,

$S_{CM}$  – площадь смоченной поверхности корпуса;

$S_{ДП}$  – площадь проекции погруженной части судна на ДП;

$S_{МШ}$  – площадь проекции погруженной части судна на плоскость мидель-шпангоута;

$S_R$  – площадь руля;

$T, T_H, T_K$  – осадки судна средняя, носом и кормой;

$V, V_B, V_L$  – скорость судна относительно воды, ее поперечная и продольная составляющие;

$V_S$  – скорость обтекающего руль потока.

$\alpha$  – угол дрейфа;

$\beta$  – угол перекаладки руля;

$\beta_e$  – угол атаки (эффективный угол) руля;



$\gamma_d$  – угол атаки лопасти гребного винта;  
 $\delta$  – коэффициент общей полноты;  
 $\delta_T$  – коэффициент полноты ватерлинии;  
 $\delta_L$  – коэффициент полноты диаметрали;  
 $\delta_B$  – коэффициент полноты миделя;  
 $\delta_{LK}$  – коэффициентом полноты ДП по кормовой оконечности;  
 $\eta = \dot{n}$  – скорость изменения частоты вращения гребного винта;  
 $\theta_p$  – шаговый угол гребного винта;  
 $\chi_K$  – коэффициент спрямляющего влияния корпуса на поток, натекающий на руль;  
 $\chi_{KB}$  – коэффициент спрямляющего влияния корпуса и винта на поток, натекающий на руль;  
 $\lambda_p$  – относительная поступь гребного винта;  
 $\lambda_R$  – относительное удлинение руля;  
 $\xi = \dot{\theta}$  – скорость разворота лопастей винта регулируемого шага;  
 $\rho_a$  – плотность воздуха;  
 $\omega$  – скорость поворота судна относительно вертикальной оси;  
 $\bar{\omega}$  – установившаяся на циркуляции угловая скорость судна;  
 $\omega_p$  – угловая скорость вращения гребного винта;  
 $\tau_1$  – постоянная времени судна;  
 $\psi$  – отклонение текущего курса судна от заданного;  
 $\Omega = \dot{\beta}$  – скорость перекладки руля.

# 1. Общие сведения об управлении

## 1.1. Система управления

**Понятие управления.** Под **управлением** обычно понимается процесс обеспечения одним объектом требуемого изменения состояния другого объекта с помощью целенаправленных воздействий (*команд*). Первый объект называют **управляющей** или **командной системой** (КС), а второй – **объектом управления** (ОУ) или **управляемой системой, управляемым процессом**. В технических системах КС именуют **устройством управления** (УУ).

В процессе управления КС и ОУ взаимодействуют друг с другом, образуя целостное соединение (рис. 1.1), называемое **системой управления** (СУ).

Представлением системы управления совокупностью КС и ОУ как бы проводится условная замкнутая граница, за пределами которой остаются не вошедшие в СУ элементы. Из этого внешнего окружения при изучении СУ интерес представляют только элементы, имеющие к ней отношение. Множество таких элементов, оказывающих влияние на СУ или находящихся под ее воздействием в условиях рассматриваемой задачи, называют **внешней средой** (ВС) либо **окружением системы**.

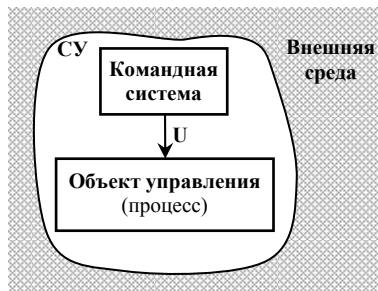


Рис. 1.1. Обобщенная схема системы управления

Всякое разумное управление целенаправленно. **Цель управления** представляет собой базирующееся на объективных критериях четко сформулированное задание для СУ, степень выполнения которого можно измерить количественно. В общем случае управление включает как выработку методов достижения поставленной цели и реализацию этих методов, так и формирование самих целей. Цель управления обычно связывается с определёнными комплексными показателями качества, характеризующими систему (её производительность, экономичность, точность, быстроедействие и т. п.). При рассмотрении ряда СУ цели управления считаются известными, и их формирование выносят за рамки функций системы.

**Объект управления.** В реальной жизни управляют различными объектами (транспортными средствами, технологическими процессами, коллективами людей и т.д.). Они имеют свои особенности (отличительные признаки) и характеризуются в каждый момент времени тем или иным состоянием. Эти черты ОУ должны учитываться при управлении, чтобы оно было эффективным. **Отличительные признаки** определяют вид ОУ. Ими могут быть состав, форма, размеры, свойства и другие особенности ОУ. Свойства ОУ определяются закономерностями его поведения. Отличительные признаки ОУ обладают относительной устойчивостью (постоянством) во времени. У некоторых объектов они могут меняться, но лишь в определенных пределах.

**Состояние** – это положение ОУ в пространстве, в котором он может «перемещаться» под влиянием воздействий КС и внешней среды. Воздействия КС на ОУ называются *управляющими*, а воздействия на него внешней среды, которые мешают достижению цели управления, – *возмущающими* или просто *возмущениями*. Изменить последние воздействия, как правило, невозможно. Возмущающие и управляющие воздействия являются **входными величинами** ОУ. Состояние ОУ изменчиво во времени и характеризуется определенными показателями, называемыми **выходными величинами** ОУ. Те из них, которые в процессе управления (в соответствии с его целью) преднамеренно изменяются или сохраняются постоянными, называются *управляемыми величинами*. Для обеспечения желаемого изменения состояния ОУ и компенсации влияния возмущений КС систематически или по мере необходимости вырабатывает управляющие воздействия на ОУ. Под влиянием входных воздействий состояние ОУ меняется. В результате характеризующие его выходные параметры принимают новые значения. Среди выходных величин ОУ обычно можно выделить некоторое число независимых друг от друга параметров, достаточно полно характеризующих его состояние с точки зрения решаемой системой задачи. Эти независимые параметры называются **переменными состояниями** ОУ. Зависимые параметры, если они существуют, всегда можно выразить через эти независимые переменные. Таким образом, термином *переменные состояния* обычно обозначается минимум параметров, полностью определяющих состояние ОУ.

Поставив в соответствие переменным состояниям ОУ координатные оси некоторого многомерного пространства, получим так называемое **пространство состояний** ОУ. На основе такого

соответствия параметры состояния ОУ называют также **координатами**. В пространстве состояний текущее положение ОУ представляется **изображающей точкой**. Совокупность определяющих эту точку координат называется **вектором состояния** ОУ. Например, процесс перемещения судна по водной поверхности может быть охарактеризован составляющими  $V_x$ ,  $V_y$  скорости его центра массы (ЦМ) в горизонтальной прямоугольной системе координат  $xOy$  и угловой скоростью  $\omega$  вращения судна относительно ЦМ, т.е. вектором состояния  $(V_x, V_y, \omega)$ . Изменение состояния ОУ нередко рассматривается как перемещение изображающей точки в пространстве состояний. В зависимости от характера изменения координат пространство состояний ОУ может быть **дискретным** или **непрерывным**. Выделив на координатных осях границы приемлемых значений параметров системы, получим **область допустимых состояний** ОУ.

**Внешняя среда.** Внешняя среда может влиять на КС, управляемый объект и на связи в СУ. Обычно наибольшая доля воздействий ВС приходится на ОУ. Влияние среды на КС и на связи в СУ часто мало и не учитывается при управлении.

Окружения систем управления имеют свои особенности (отличительные признаки) и характеризуются в каждый момент времени тем или иным состоянием. **Отличительные признаки** определяют вид среды и мало изменчивы во времени. В общем случае ВС характеризуется:

- Составом своих элементов и их географическим расположением;
- Климатическими условиями;
- Наличием ограничений на процесс управления;
- Возмущающими воздействиями на СУ, их характером и интенсивностью;
- Наличием активных элементов, обладающих способностью целенаправленного влияния (содействия, противодействия) на СУ;
- Характером, интенсивностью и способом влияния активных элементов среды на СУ;
- Другими признаками и свойствами.

Окружения систем управления многообразны. Различают пассивную, активную и смешанную среду. Поведение элементов **активной** ВС является целенаправленным. **В пассивной** ВС таких элементов нет. Примером элементов активной среды для судна являются встречные суда, с которыми надо разойтись безопасно. **В смешанной** ВС имеются пассивные и активные элементы.

Свойства пассивной среды по отношению к СУ могут быть ограничивающими, реактивными, возмущающими и многими другими. **Ограничивающая** ВС содержит элементы, уменьшающие по тем или иным координатам пространство состояний системы. Примером ограничивающих условий для судна являются стесненные воды. В **реактивной** ВС воздействия на ОУ возникают в ответ на изменение его состояния. Примером такого окружения для подводной лодки является водная среда. При движении на корпусе подводной лодки возникают гидродинамические силы. **Возмущающая** ВС характеризуются наличием случайных (точно не предсказуемых) воздействий, вызывающих нежелательные изменения в состоянии СУ. Разнообразны свойства и активных окружений СУ.

**Состояние** ВС определяется уровнями интенсивности протекающих в ней процессов. Оно изменяется во времени и характеризуется значениями параметров этих процессов и их воздействий на СУ.

**Командная система.** Назначением КС является выработка воздействий, обеспечивающих достижение цели управления. Процесс такого выбора часто называют **принятием решений** по управлению. Здесь необходимо отметить, что формирование в КС этих решений основывается на информации, характеризующей процесс управления, а их реализация осуществляется с помощью специальных органов. Поэтому КС нередко представляют в виде трех подсистем: *информационной, выработки решений, исполнительной.*

**Информационная подсистема** служит для хранения, получения и обработки необходимой для управления информации. **Подсистема выработки решения** на основе результатов обработки информации определяет управляющее воздействия на ОУ и рассчитывает его параметры. **Исполнительная подсистема** (в частном случае, это средства управления) преобразует выработанный сигнал управления в воздействие на ОУ. Наиболее важным элементом исполнительной подсистемы является **силовой орган**, который непосредственно создает требуемую по величине и направлению управляющую силу, прилагаемую к ОУ. Следует отметить, что в ряде СУ исполнительная система не входит в КС, а является неотъемлемой частью ОУ либо самостоятельным подразделением СУ.

Обычно в реальных условиях цель управления может достигаться разными способами. Совокупность всех путей, приводящих к цели, называется **множеством (областью) возможных решений** задачи управления. Совокупность решений из этой области, результаты которых удовлетворяют накладываемым на управление ограничениям,

составляет **множество допустимых решений**. Оно является *полным*, когда содержит все допустимые решения. В противном случае оно называется *неполным* или **подмножеством допустимых решений**. Такое подмножество считается *представительным*, когда содержащиеся в нем решения включают близкие к наилучшему. Оно *непредставительно*, если содержит лишь некоторые, неизвестные по степени эффективности допустимые решения.

## 1.2. Информация – основа управления

Информация представляет собой одну из трех фундаментальных субстанций (вещество, энергия, информация), составляющих сущность мироздания и охватывающих любой продукт мыслительной деятельности. Применительно к системам управления **информация** – это используемые при выработке решений сведения, данные, значения показателей, являющиеся объектами хранения, обработки и передачи. В общем случае управление базируется на информации, отражающей цель управления (включая требования к ее достижению), особенности и состояние ОУ и ВС. Объекты, от которых получают необходимые для управления данные, называются **источниками информации**. По отношению к СУ они могут быть внутренними и внешними. **Внутренние источники** входят в состав СУ. Например, в бортовой СУ – это навигационные и метеорологические приборы, измеряющие параметры движения судна и состояния окружающей его среды. К внутренним источникам информации относятся и находящиеся на судне карты, навигационные пособия, наставления, рекомендации и другие документы, содержащие касающиеся судовождения сведения. Внутренним источником является и бортовая компьютерная справочная система, хранящая относящиеся к навигации базы данных.

**Внешние источники информации** не являются элементами СУ. Об их информации говорят, что она поступает извне. Сведения от внешних источников передаются по каналам связи. Обычно от таких источников получают информацию о внешней среде. Например, на судно от береговых служб по каналам связи поступают навигационные и гидрометеорологические предупреждения, данные для корректуры карт и пособий, а также многие другие сведения.

В сведениях для управления выделяют **медленноменяющуюся, оперативную и прогностическую** информацию. Как уже упоминалось, отличительные признаки ОУ и ВС мало меняются во времени. Поэтому сведения о них относятся к **медленноменяющейся информации**. В судовождении к таким данным об ОУ можно отнести

его размерения, дедевейт, сведения о средствах управления, маневренных способностях и ряд других. О внешней среде судна – это данные о положение берега, островов, навигационных опасностей, о закономерностях гидрометеорологических явлений, о береговом и плавучем навигационном ограждении и т.д. Использование медленноменяющейся информации в СУ связано с хранением, с приведением на уровень современности и с поиском в ней сведений об элементах, влияющих в данный момент на управление. Хранить медленноменяющиеся сведения предпочтительно внутри СУ, чтобы избежать необходимости их передачи на большие расстояния. Для обеспечения быстрого поиска данных эту информацию следует хранить в упорядоченном виде. При любых изменениях медленноменяющаяся информация немедленно должна приводиться на уровень современности.

Состояния СУ и ВС изменяются, иногда и непрерывно. Поэтому за ними требуется постоянно следить, чтобы управление было эффективным. Сведения, отражающие состояние СУ и ВС на текущий момент времени, называются *оперативной информацией*. Она при управлении обычно получается с помощью измерительных устройств, входящих в состав СУ. Сведения о состоянии ВС могут также поступать от внешних источников. Оперативная информация при управлении используется для контроля текущего состояния СУ и ВС, для выработки управляющих воздействий, для оценки результатов принимаемых решений. Она применяется также с целью идентификации свойств ОУ и ВС.

Когда процесс достижения цели занимает существенное время, эффективность работы СУ зависит от будущих состояний ВС. В этом случае важно иметь *прогностические данные* будущих условий работы системы. Такие прогнозы могут получаться от внешних источников информации либо составляться внутри СУ. Большое значение прогностическая информация имеет при планировании – выборе наилучшего пути движения к цели.

Следует отметить, что для управления должны использоваться данные, которые хоть в какой-то степени оказывают влияние на СУ. **Ценность информации** при управлении определяется ее значением для правильного выбора решений. Существенными здесь являются два фактора: весомость самого решения и степень влияния информации на его выбор. Ценность информации при управлении зависит от ее своевременности, достоверности, полноты, надежности, времени поиска, скорости обработки и других факторов. *Достоверность данных* характеризуется уровнем их адекватности тому процессу или

объекту, который они отражают. **Полнота информации** определяется степенью ее достаточности для осуществления эффективного управления. **Недостаток сведений** уменьшает вероятность выработки правильного решения. **Избыточная информация** вызывает излишние затраты и ухудшает условия работы СУ. Она приводит к росту необходимого объема запоминающих устройств, к увеличению времени на передачу и обработку данных, к усложнению обработки. Однако избыточность данных в СУ кроме отрицательной, имеет и положительную сторону. Она важна для повышения надежности управления, так как позволяет обнаруживать и исправлять содержащиеся в данных ошибки.

### 1.3. Основные виды управления

Процессы управления разнообразны. Они присущи системам биологического и социального порядка, а также системам, создаваемым человеком искусственно. Принято выделять три большие сферы управления: *деятельность человеческих коллективов* (социальные процессы); *биологические процессы* в живых организмах; *процессы при целенаправленном воздействии человека на природу* (управление аппаратами, установками, машинами, механизмами, технологические и другие процессы). Термин «управление» сам по себе имеет широкий смысл. Почти всякий организованный процесс можно трактовать как управляемый. Например, компьютерные вычисления можно рассматривать как процесс управления компьютером с помощью программы. Игру в шахматы можно представить как управление позицией фигур на шахматной доске. Составление учебных планов и их реализацию – как управление учебным процессом и т.д. Т.е. имеется масса задач управления, решения которых существенно различаются. С целью систематизации используются различные классификации задач управления. Рассмотрим их разделение по наиболее общим признакам.

**Классификация управления по типу задания.** В зависимости от типа поставленной перед СУ цели выделяют задачи: *регулирования, ситуационного управления, планирования целесообразного поведения.*

**Задача регулирования** заключается в поддержании выходных величин ОУ равными (или пропорциональными) некоторым эталонным функциям времени – **задающим воздействиям**. Последние могут быть постоянными или изменяющимися как по заданному, так и по заранее неизвестному закону. СУ, выполняющие задачу регулирования и стремящиеся сохранять в допустимых пределах



отклонения между задающим воздействием и действительными значениями управляемых переменных, называются **системами регулирования**. Устройство управления в этих системах часто называют **регулятором**. В судовождении к задачам регулирования относятся, например: стабилизация курса, удержание центра массы судна на заданной траектории и ряд других.

**Задача ситуационного управления.** Ситуационным (кондициональным) называется управление, основанное на выявлении ситуаций, их классификации и способах разрешения [8, 18]. Задачи такого управления характеризуются известным набором ситуаций и отвечающих им решений. Совокупность ситуаций и соответствующих им решений для конкретной задачи управления определяется либо технологией процесса, или экспертами, либо получается на основе наставлений, правил, рекомендаций. Признаком вида ситуации может быть то или иное состояние СУ, либо определенные условия ВС, либо первое и второе вместе. При решении задач ситуационного управления используется правило – *«если ..., то ...»*. Отсюда и второе название этого вида управления – **кондициональное** (причинно-следящее).

В системе кондиционального управления для возможных видов ситуаций может быть составлен перечень операций (таблица решений), которые должна выполнить СУ при наступлении той или иной ситуации. Такая СУ непрерывно тестирует условия своей работы с целью распознавания ситуаций, в которых она функционирует. При возникновении ситуации конкретного вида СУ выдает предусмотренную для нее последовательность управляющих действий. В судовождении к таким ситуациям можно отнести: подход к узкости, подход к району с ограниченной видимостью, посадку на мель и многие другие. Для каждой такой ситуации предусматривается последовательность подлежащих выполнению действий. В настоящее время перечень мероприятий, которые должен выполнить вахтенный помощник в той или иной ситуации, закреплен в так называемых «чек-листах» (Check-lists). Использование «чек-листов» облегчает судоводителю формирование правильного решения.

Задачи кондиционального управления не представляют сложности, когда число видов ситуаций невелико, когда они определяются малым числом признаков (имеют четкие границы) и легко распознаются. Например, к несложной ситуационной задаче можно отнести управление запуском судового двигателя. Когда же количество возникающих в процессе управления ситуаций велико, когда они имеют нечеткие границы и трудно распознаются, сложность управления резко возрастает.

**Планирование целесообразного поведения** включает в себя задачи формирования и перестройки целей управления, выработку стратегии (плана, программы) получения решения [1]. Под *стратегией управления* обычно понимается детальный план или обобщающая модель действий, необходимых для достижения поставленных целей.

Цель многих СУ является установленной, и их задача заключается только в определении стратегии управления. В судовождении, цель которого состоит в проводке судна из порта отхода в порт назначения, к задачам определения стратегий управления относятся: выбор маршрута перехода и скорости движения на его участках; коррекция маршрута и скорости в процессе рейса в зависимости от обстановки, складывающейся в районе движения и на оставшемся пути. Коррекция маршрута и скорости движения может потребоваться для решения задачи расхождения с плавучими объектами на пути следования, или из-за неблагоприятных погодных условий в районе плавания и на оставшемся участке перехода. Среди этих задач можно выделить: определение стратегий расхождения со встречными судами, с тропическими циклонами, выбор пути во льдах, нахождение наиболее выгодного маршрута следования через океан и др.

**Классификация управления в зависимости от условий внешней среды.** Существенное влияние на характер принимаемых решений в задачах управления оказывает внешняя среда. Здесь могут быть выделены условия *определенности* и *неопределенности*, *риска*, *активной ВС*, *условия с координатором управления* и многие другие.

**В условиях определенности** каждому принимаемому решению соответствует конкретный результат, что позволяет путем сопоставления результатов из допустимых решений выбрать наилучшее. Например, если имеется несколько предложений по перевозке конкретных грузов между конкретными портами на определенных условиях, то капитан принимает решение, четко зная результаты всех альтернативных решений.

**В условиях неопределенности** точно определить результат решений по управлению невозможно. Здесь каждому из допустимых решений соответствует множество возможных результатов в общем случае с неизвестными вероятностями их появления. Такая неопределенность может зависеть от невозможности точного предсказания влияния ВС на СУ, либо от неоднозначной реакции ОУ на управляющие команды. Так, например, в судовождении иногда нельзя точно предсказать результаты маневрирования из-за влияния на движение судна случайных факторов.

**В условиях риска** каждой из множества допустимых стратегий управления соответствует несколько результатов. В этих условиях обычно стратегия, обеспечивающая возможность получения максимального дохода, связана и с большой вероятностью наихудшего результата – с наибольшим риском; а стратегия без риска – с минимальным доходом.

**В условиях активной ВС** цели ее элементов могут совпадать, не совпадать с целью СУ и быть ей противоположными. Например, цели судов при расхождении совпадают и состоят в обеспечении безопасного расхождения. Другой пример – во время военных действий цели судна и подводной лодки противника являются противоположными. Ситуация с противоположными целями СУ и элементов ВС называется *конфликтной*.

**Условия с координатором действий СУ и элементов активной ВС.** Для повышения эффективности систем управления в условиях активной внешней среды, когда их цели не носят антагонистического характера, применяются координаторы. Действия СУ и активных элементов ВС могут координироваться тем или иным органом или его документами. Например, в качестве координатора может выступать береговая система управления движением в обслуживаемом ей районе. Правила МППСС координируют действия судов с целью предупреждения их столкновений в различных условиях плавания. Координация действий может быть разной: от жесткой, строго регламентирующей все действия рассматриваемой системы, до слабой, ограничивающей действия системы только в определенном отношении. Наличие координатора повышает эффективность управления, но вносит в процесс принятия решений свои особенности.

В конкретных сферах управления могут использоваться другие классификации условий ВС. Например, при судовождении в одних случаях внешние условия делят на штормовые, ледовые, ограниченной видимости. В других – на открытое море, прибрежные воды, стесненные воды, районы лоцманской проводки.

**Классификация управления в зависимости от информации, используемой для выработки управляющих воздействий.** В общем случае управляющие решения принимаются в зависимости от поставленной цели, информации об ОУ и ВС. В зависимости от используемой информации различают управление: *жесткое, по информации о состоянии ВС, по информации о состоянии ОУ, комбинированное.*

При **жестком управлении** решения формируются только на основе информации о задаче СУ. Примером является изготовление

детали на токарном станке с программным управлением, когда перемещение резца происходит по программе, определенной только в зависимости от профиля детали. Другим примером может служить работа светофора, который переключается через установленные промежутки времени, независимо от фактического количества транспортных средств, подъезжающих к светофору.

**При управлении по информации о состоянии ВС** управляющее воздействие в СУ вырабатывается в зависимости от получаемых сведений о внешней среде. Так, например, если на пути движения судна находится тропический циклон, то решение по расхождению с ним принимается по информации об этом явлении: его размерах, положении центра, ожидаемом пути, скорости движения.

Широко применяется такое управление в условиях возмущений при регулировании. В этом случае оно называется *управлением по возмущению*. **Управление по возмущению** состоит в том, что управляющее воздействие в системе вырабатывается в зависимости от параметров возмущений, вызывающих нежелательные отклонения управляемых величин от требуемых значений. Примером такого управления является коррекция курса судна для учета дрейфа, когда величина поправки на дрейф рассчитывается по результатам измерения направления и скорости ветра. Ветер в этом случае является возмущающим состояние системы фактором.

Для реализации управления по возмущению необходимо иметь возможность получения информации о возмущающих воздействиях с помощью внутренних и/или внешних источников, а также знать, как возмущение влияет на состояние системы. При наличии таких условий

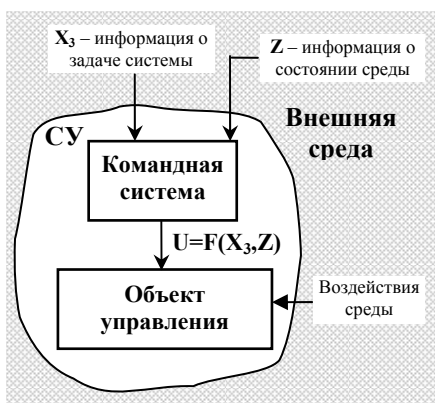


Рис. 1.2. Схема разомкнутой СУ

для всех влияющих на СУ возмущений создается принципиальная возможность их полной компенсации. Системы, в которых влияние возмущений полностью компенсировано, называются *инвариантными*.

**Преимуществом управления по возмущению** является быстрое действие, так как управление производится сразу же после изменения состояния среды, когда возмущение еще не повлияло

на состояние ОУ. **Недостаток такого управления** состоит в том, что не всегда есть возможность получить информацию обо всех элементах среды, возмущающих состояние ОУ, и не всегда можно установить, как изменяется его состояние под действием этих возмущений.

Системы, в которых для выработки управляющих воздействий используется информация о задаче СУ и/или сведения о состоянии ВС, называются **разомкнутыми**. Схема такой системы показана на рис.1.2.

**Управление по информации о состоянии системы** состоит в том, что управляющее воздействие в СУ формируется в зависимости от значения вектора состояния ОУ. Например, регулировщик уличного движения на перекрестке учитывает при управлении состояние автомобильных и людских потоков. Вторым примером использования для управления информации о состоянии системы может служить запуск главного судового дизеля, который производится по этапам:

1. Проверяется соответствие положения распределительного вала заданному направлению вращения. Если его нет, подается команда на переключение распределительного вала. После подтверждения выполнения этой операции, переходят к следующему этапу.
2. Проверяется готовность к действию вспомогательных устройств двигателя сравнением значений давления масла в подшипниках, охлаждающей воды, топлива, пускового воздуха и др. с пусковыми критериями. Если критерии выполнены, переходят к третьему этапу.
3. Открывают клапана пускового воздуха. Двигатель начинает вращаться. Когда частота вращения вала достигнет значения, при котором происходит самовоспламенение топлива, открывают подачу топлива. Двигатель начинает работать на топливе, и клапан пускового воздуха закрывают.

Нетрудно заметить, что здесь управление переходом от одних операций к другим выполняется в зависимости от информации о состоянии двигателя.

Широко применяется управление по данным о состоянии системы в задачах регулирования. Здесь оно называется **управлением по отклонению**. В реальной жизни число случайных воздействий на систему столь велико и действие их столь разнообразно, что компенсировать их, используя только управление по возмущению, невозможно. **Управление по отклонению** состоит в том, что воздействие КС на ОУ вырабатывается в зависимости от отклонения управляемой величины от требуемых значений. Здесь не имеет значения причина, из-за которой поведение ОУ отличается от требуемого. Цель управления достигается без информации о влиянии

ВС. Например, авторулевой при стабилизации курса формирует управляющий сигнал в зависимости от отклонения текущего курса судна от заданного его значения.

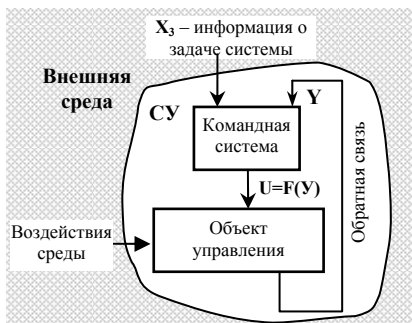


Рис. 1.3. Схема замкнутой САУ

Схема системы, в которой реализован принцип управления по информации о состоянии СУ, приведена на рис. 1.3. Такая система называется **замкнутой** либо **системой с обратной связью**. На этой схеме  $Y$  – информация о состоянии ОУ.

**Обратная связь** – это такая связь, при которой информация о состоянии ОУ передается с выхода системы на вход КС.

## 1.4. Условия осуществимости управления

Любая СУ должна удовлетворять тем или иным условиям, без которых управление будет малоэффективным либо невозможным. Охарактеризуем основные из этих условий.

**ОУ должен быть управляемым.** Для достижения цели управления необходимо, чтобы ОУ подчинялся КС и требуемым образом выполнял ее команды. Иначе говоря, в пространстве состояний ОУ должен быть способным изменять свое положение в направлениях, соответствующих воздействиям КС. Способность ОУ под влиянием целенаправленного воздействия за конечный промежуток времени переходить из начального в требуемое конечное состояние либо в заданную область пространства состояний называется **управляемостью**. Удовлетворительная управляемость объектов обеспечивается приданием им подходящей структуры (в пределах возможного) и снабжением СУ исполнительной подсистемой, вырабатывающей в соответствии с командами КС воздействия, достаточные для изменения состояния ОУ. Если имеется возможность найти управляющее воздействие, которое переводит все выходные координаты ОУ из начального состояния к заданным значениям за конечный промежуток времени, то объект является **вполне** или **полностью управляемым**. В противном случае ОУ называется управляемым по ограниченному числу координат либо **не полностью управляемым**.

Управляемость предполагает наличие у ОУ достаточной *устойчивости* и *маневренности*. **Устойчивость** – это способность ОУ противостоять возмущениям. Состояние ОУ называется устойчивым, если отклонение от него остаётся сколь угодно малым при любых малых возмущениях. *Устойчивость* определяется и как свойство объекта возвращаться в исходное состояние после вывода его из этого состояния и прекращения действия возмущения. Под **маневренностью** понимается способность ОУ с той или иной скоростью изменять управляемые величины при переходе из одного состояния в другое. Маневренность определяет одну из наиболее важных сторон управления – *быстродействие*.

Чтобы иметь реальную возможность изменять состояние ОУ, нужны **исполнительные органы**, реализующие принятые решения. В технических системах ими являются **средства управления** (силовые средства – СС), преобразующие выработанные КС сигналы в силы, прилагаемые к ОУ. **Силовым органом** СС называют их элемент, который непосредственно создает требуемую по величине и направлению управляющую силу, прилагаемую к ОУ. Например, силовым органом в СУ движением судна по курсу является руль.

В большинстве СУ между управляющим воздействием и реакцией на него ОУ существует однозначная зависимость. Однако имеются и системы, в которых эта связь является вероятностной. В них изменение состояния ОУ при управляющем воздействии происходит с определенной вероятностью. Однако, если объект управляем, общая направленность изменения его состояния в ответ на управляющее воздействие сохраняется.

**ОУ должен быть наблюдаемым**. Во многих СУ управляющие воздействия вырабатываются в зависимости от значений параметров состояния объекта. Под **наблюдаемостью ОУ** понимается возможность измерения переменных его состояния. Чтобы ОУ был наблюдаемым, СУ должна иметь средства наблюдения (*датчики информации*). Объект называется **вполне или полностью наблюдаемым**, если по информации датчиков СУ можно определить значения всех его выходных координат. В противном случае ОУ считается **не полностью наблюдаемым**. В одних СУ информация датчиков может характеризовать состояние ОУ точно, в других – приближенно. Когда погрешности датчиков информации СУ и возмущающие воздействия на ОУ носят случайный характер и/или измерения являются косвенными, перед выработкой управляющих сигналов выполняется **оценивание состояния ОУ**, т.е. получение

эффективных оценок переменных состояния по результатам наблюдений.

**КС должна быть способной управлять.** **Способность системы** – это свойство, которое определяет ее возможность решить поставленную задачу. Оно означает, что у СУ должны быть достаточные для выработки решений и проведения их в жизнь интеллектуальные, информационные, технические и энергетические ресурсы. Под **интеллектуальными ресурсами** здесь понимается специалист и/или программное обеспечение, обладающие способностью выработать правильные решения. К **информационным ресурсам** относится обеспечение процесса управления необходимыми данными и сведениями. **Технические ресурсы** составляют средства управления, средства связи, устройства обработки и передачи информации и другие технические средства, необходимые для своевременной выработки решений и их отработки. **Энергоресурсы** – это энергоносители, требуемые для работы СУ.

**Другие условия, влияющие на возможность управления.** Подчеркнем также значение для осуществимости управления ряда других факторов. Так, например, в общем случае для правильного выбора характера и интенсивности управляющих сигналов следует знать **цель управления и критерии, по которым оценивается эффективность СУ.** Необходимо учитывать и **динамику ОУ**, на движение которого влияет его инерционность. Решение по управлению должно приниматься в такой момент времени, чтобы его реализация обеспечила желаемое изменение состояния объекта к определенному сроку. Динамика одних ОУ в различных условиях меняется незначительно и при управлении известна достаточно точно. Динамические свойства других ОУ непостоянны, и может понадобиться их уточнение в процессе эксплуатации для обеспечения эффективности принимаемых решений. Задача оценки структуры и/или параметров ОУ по тем или иным признакам его поведения в конкретной ситуации называется **идентификацией объекта управления.** Для решения задачи идентификации СУ должна иметь соответствующие средства.

**Следует учитывать и условия ВС**, влияющие на процесс управления. Для получения данных о внешней среде СУ снабжается **внутренними источниками информации.** Нередко нужна информация и от внешних источников. Для ее приема КС должна иметь **средства связи.** Например, в СУ судна по каналам связи принимается информация о погоде, об опасных явлениях, изменениях в навигационной обстановке и др. **Важен также прогноз состояния**



**СУ и ВС на определенное время вперед.** Не зря говорят, «управлять – значит предвидеть». Практически всегда управляющее воздействие выбирают на основе прогноза будущего состояния системы, чтобы оно после воздействия соответствовало желаемому.

## 1.5. Эффективность систем управления

**Эффективность (качество) системы** можно определить как степень соответствия функционирования СУ целям управления или предъявляемым требованиям. Категории требований к СУ могут быть различными: *к величине дохода, к быстродействию, к точности, к величине и частоте управляющих сигналов, к расходуемым ресурсам, к надежности, к помехозащищенности, к приспособляемости к изменяющимся условиям* и другие. Для суждения об эффективности СУ применяют те или иные показатели, которые называются **критериями качества**. Они могут быть **количественными** и **смысловыми**. Примером второго критерия при изготовлении товаров массового потребления может служить требование их привлекательности. В СУ желательно использовать только количественные критерии, если это возможно. Под **количественным критерием** понимается величина (вектор), являющаяся мерой качества управления. Основной смысл применения количественных критериев заключается в том, чтобы численно, объективно оценить успешность управления в тех или в других условиях, иметь возможность сопоставлять различные решения и выбирать из них подходящее. При наилучшем решении задачи управления значение количественного критерия является обычно экстремальным (максимальным или минимальным).

Различают три вида критериев эффективности [18]:

- критерии пригодности,
- критерии оптимальности,
- критерии адаптивности.

**Критерии пригодности** оценивают вероятность достижения цели управления или получения допустимого гарантированного результата. К **критериям оптимальности** относятся оценки экстремальности результата – наивысшей точности, минимального расхода ресурсов и т.д. **Критерии адаптивности** используются для оценки степени приспособляемости СУ к изменению условий функционирования.

С критерием оптимальности связана **целевая функция**, наибольшее или наименьшее значение которой с учетом имеющихся ограничений определяет наилучшее решение. Целевой функцией во

многих САУ являются функционалы, отражающие успешность управления. В системах, в которых наибольшее значение имеет время выполнения поставленного задания, в качестве целевой функции применяют *функционал максимального быстродействия*. Когда требуется минимизировать погрешности управления и затраты на него, целевой функцией является *квадратичный функционал переменных состояния и управления*. **Оптимальным** (по выбранному критерию) из множества допустимых решений является такое, при котором значение критерия качества экстремально. Современные математические методы для ряда задач управления позволяют получать такие решения без перебора допустимых вариантов.

В некоторых СУ нет возможности определить полное множество допустимых решений. Если в такой системе наилучшее воздействие на ОУ выбирается из представительного подмножества решений, то управление называется **эффективным**. Его результаты близки, а иногда и совпадают, с результатами оптимального управления. Для многих задач управления нет возможности получить представительное подмножество допустимых решений. Удастся найти лишь некоторые пути достижения цели, обеспечивающие приемлемые значения критерия качества управления. В таких случаях приходится выбирать решения из непредставительного подмножества решений. Управление, которое не является ни оптимальным, ни эффективным, но использует наилучший вариант из известных допустимых решений, называется **рациональным**.

**Обеспечение целостности СУ.** Говоря об эффективности систем, следует отметить и необходимость сохранения при эксплуатации их *целостности*. КС и ОУ современных СУ включают большое количество элементов. Взаимосвязи между ними придают системе свойства, которыми составляющие СУ элементы в отдельности не обладают. Эти свойства присущи только системе в целом. **Целостностью системы** называется сохранность всех присущих ей полезных свойств. В процессе эксплуатации по той или иной причине целостность СУ может нарушаться. В результате она может терять те или иные свои свойства. Причины нарушения целостности систем могут быть самыми различными: ошибка в данных источника информации, запаздывание в получении сведений, искажение их при передаче, неполадки в работе оборудования и т.д. Приведем два примера из многих причин, нарушающих целостность систем.

а) Спутниковая навигационная система GPS предоставляет возможность непрерывно определять место в любой точке Земли. Однако если взаимное расположение спутников на орбитах будет

нарушено, то свойство глобальности и непрерывности определений по GPS может быть утрачено.

б) Навигационно-информационная система ECDIS обладает свойством автоматической сигнализации об опасностях и о районах со специальными условиями плавания. Но если в ней используется растровая карта, то это свойство ECDIS теряет. Причиной является отличный от требуемого вид картографической информации.

Чтобы работа системы была эффективной, необходимо принимать определенные меры для сохранения ее целостности. Они включают: *операции для предупреждения потерь целостности, обнаружение фактов ее нарушения, установление причин этих нарушений, меры для восстановления целостности.* Совокупность технических и программных средств, которые выполняют эти операции, называют *системой обеспечения целостности (СОЦ)* комплекса управления.

## 1.6. Этапы и методы принятия решений

**Этапы принятия решений.** В общем случае определение управляющих воздействий не является каким-то мгновенным актом, а занимает определенное время. В теории управления условно принятие решений рассматривается как периодический процесс, каждый цикл которого включает этапы:

1. получение информации о состоянии СУ и ВС, прогноз и оценка удовлетворительности состояния системы;
2. формирование цели о некотором другом состоянии, в которое желательно перевести систему;
3. определение допустимых путей достижения системой поставленной цели;
4. выбор из множества допустимых решений наилучшего;
5. реализация принятого решения.

Первые три этапа называются *подготовкой решения* по управлению, а четвертый – его *принятием*. Полученное решение затем реализуется, после чего поэтапные действия повторяются.

Обобщенная схема принятия решений для ряда систем может показаться слишком упрощенной либо не соответствующей действительности. Количество этапов при выработке управляющих воздействий, их последовательность и содержание, связи между ними в разных СУ и в разных ситуациях их функционирования не являются столь строго определенными. Однако такая схема полезна, так как позволяет сконцентрировать внимание на основных особенностях принятия решений во всех СУ.

**Методы выработки решений.** В СУ (за исключением биологических) изначально в качестве командной системы выступал **человек**. Объекты, которыми он управляет, могут быть самыми различными: технические изделия (аппараты, механизмы, установки и т.д.), процессы (физические, химические, производственные и т.п.), другие системы. При определении управляющих воздействий человек пользуется различными методами. Одним из них является **использование накопленного опыта**, обращение к решениям, принимавшимся раньше в аналогичных или близких ситуациях. В судовождении для решений, принятых на этой основе, существует даже термин – *«соответствуют хорошей морской практике»*.

Известен и **основанный на интуиции метод** управления. Человек, имеющий теоретические знания и опыт работы в некоторой области, приобретает внутреннее чутье, своеобразную проницательность, что позволяет ему выбирать правильные решения в различных ситуациях. При этом он часто даже не может объяснить, на чем основывались его действия. Широко распространено управление, базирующееся на **здоровом смысле**, который позволяет человеку ориентироваться и рационально действовать даже в непредвиденных случаях. Человек также принимает решения путем **мысленного анализа ситуации**, прогнозируя в уме последствия возможных решений. Такому анализу обычно присущи элементы как формальной, так и диалектической логики.

Наиболее строгим путем принятия решений по управлению является **научный подход**. Научные методы – это теоретически обоснованные, количественные методы принятия решений, используемые в случаях, когда процесс управления поддается формализации. Эти методы не только являются базой нахождения наилучших решений, но и позволяют получать их быстрее, с меньшими затратами труда. Кроме того, они дают возможность автоматизировать выработку управляющих воздействий, используя преимущества компьютерной техники перед человеком при выполнении многих операций. Научный подход к принятию решений предполагает построение математической модели СУ, разработку способов ее анализа и методов синтеза управляющих воздействий. При моделировании СУ используется разнообразный математический аппарат. Широко применение здесь находят дифференциальные и разностные уравнения.

**Научные теории управления.** Научные методы управления стали развиваться сравнительно недавно. Наиболее разработанной в

настоящее время является **теория автоматического регулирования**. В ее развитии можно выделить:

1. Период детерминистской теории, характеризуемой определенными причинными связями и описываемой в основном теорией линейных СУ. Задача определения структуры и параметров регулятора в этих условиях получила название **задачи детерминированного управления**. Для нахождения алгоритмов регулирования здесь, как правило, используются прямые аналитические методы.
2. Период стохастических методов анализа и синтеза СУ. Здесь процессы в САР рассматриваются с учетом действия случайных помех и возмущений. Задача синтеза регуляторов при таких условиях называется **задачей стохастического управления**. Обычно она сводится к задаче оптимальной фильтрации и детерминированного управления.
3. Период развития адаптивных и оптимальных САР. Разработка новых методов была обусловлена необходимостью улучшения характеристик САР, когда требования к качеству управления можно было выполнить, только учитывая в алгоритме управления изменения в условиях работы САР. Задача синтеза таких регуляторов получила название **задачи адаптивного управления**. Ее решение оказалось возможным в результате использования устройств, выполняющих логико-аналитические операции.

Для решения задач управления, связанных с выбором стратегий управления в условиях определенности, были разработаны методы математического программирования, составившие основу **теорий линейного и динамического программирования**.

Особенно интенсивно развиваются теории различных СУ в последние годы. Здесь можно назвать теории: **массового обслуживания, игр, ситуационного управления, графов, искусственного интеллекта**. Тем не менее, еще для очень многих задач управления пока не существует научных методов определения ни оптимальных, ни близких к ним решений. Принятие правильных решений в особо сложных ситуациях все еще остается искусством, которым владеет лишь малое число людей. Чем сложнее СУ, тем труднее описать ее математически, тем более изощренный аппарат нужен для нахождения управляющих воздействий.

Наибольшие трудности возникают при разработке моделей организационно-административного управления. Базой для изучения таких СУ стал **системный анализ** – совокупность методов и средств исследования сложных, многоуровневых и многокомпонентных

систем, объектов, процессов, опирающихся на комплексный подход, учет взаимосвязей и взаимодействий между элементами системы. Системный анализ играет важную роль в процессе планирования и управления, при выработке и принятии управленческих решений. Его применение уже позволяет существенно улучшать функционирование больших систем. Пока системный анализ не является строгой научной теорией, поскольку не для всех его этапов существует формальный аппарат. Некоторые из них выполняются на содержательном уровне, на основе логики, здравого смысла, инженерного опыта и интуиции. Однако методы системного анализа интенсивно развиваются, и число неформализованных этапов выработки решений сокращается.

## 1.7. Автоматизация систем управления

Автоматизация СУ состоит в применении технических и программных средств, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессе управления. СУ, выполняющая свои функции без непосредственного участия человека, называется **системой автоматического управления (САУ)**. В ней целенаправленные воздействия на ОУ вырабатывает *автоматическое устройство управления (АУУ)*. Обобщенно САУ представляется совокупностью АУУ и ОУ. Системы управления, в которых одни функции выполняет человек, а другие возложены на технические средства, называются **автоматизированными** или **«человеческо-машинными»**. Автоматизация СУ требует построения ее математической модели, формализации этапов принятия и реализации решений, а также определенного уровня развития технических средств. На современном этапе *элементной базой автоматизации являются средства компьютерной техники*.

**Виды структур САУ.** Структурой системы называется совокупность составляющих ее элементов и связей между ними. При рассмотрении САУ обращается внимание на три их аспекта: *командный, функциональный, формальный* (описательный, математический, абстрактный). Представление САУ совокупностью элементов, выступающих в роли управляющих или управляемых подразделений, и связей между ними называется ее **командной организацией** или **командной структурой**.

В процессе управления САУ выполняет определенные функции: измеряет необходимые величины, преобразует сигналы из одного вида в другой, отображает результаты и т.д. Схема функциональных

устройств САУ и связей между ними называется ее **функциональной структурой** или **функциональной организацией**.

Элементы САУ выполняют преобразования сигналов. Вне зависимости от физической природы этих сигналов и протекающих в устройствах САУ рабочих процессов динамика изменения сигналов одним или группой элементов системы может быть представлена в абстрактном виде (математическими и/или логическими выражениями). Схема, отражающая формальный характер преобразования входных сигналов САУ в выходные, называется ее **формальной (описательной, математической) структурой**.

**Структура и параметры ОУ и АУУ**. Научный подход к выработке управляющих воздействий базируется на **математической модели системы** – совокупности математических выражений и логических условий, связывающих значения ее входных и выходных величин. Математическая модель позволяет описывать изменения состояния СУ и производить его прогноз на определенное время вперед при различных входных воздействиях.

С точки зрения управления конструкция ОУ имеет второстепенное значение. Основным интерес представляет реакция объекта на управляющие и возмущающие воздействия. При рассмотрении ОУ с этой важной стороны в теории автоматического управления термины **структура и параметры ОУ** используют обычно в формальном смысле, т.е. под ними понимается вид и параметры математической модели ОУ.

Разработка любой САУ обязательно включает нахождение **алгоритма управления** – системы формальных правил и проверочных условий, выполнение которых в заданной последовательности позволяет решить задачу управления без уяснения ее сущности. Именно этому алгоритму уделяется основное внимание при анализе САУ. Поэтому под **структурой и параметрами АУУ** чаще всего понимается вид и параметры алгоритма управления.

**Требования к математической модели системы**. При решении задач, связанных с синтезом алгоритмов управления и анализом СУ, требуется, чтобы математическая модель: *отражала существенные стороны процесса управления, была простой (экономной), служила существенным вспомогательным средством при выборе решений*. В математической модели должны быть сконцентрированы наиболее важные факторы реальной системы. Их необходимо отразить с наибольшей полнотой и точностью, чтобы модель была адекватна процессу управления. Несущественные факторы в модели должны отсутствовать, либо быть отраженными в небольшой степени, чтобы

не затруднять анализ системы и не усложнять выработку алгоритмов управления. Так как значимость факторов реальной системы зависит от ее цели, то один и тот же ОУ при решении разных задач, как правило, описывается разными моделями. Так, например, модель судна в системе управления его курсом отличается от модели судна в системе управления его скоростью. Отсюда следует, что применение в задачах управления разных математических моделей ОУ является естественным явлением, направленным на возможность получения оптимальных решений этих задач.

Свойства ОУ могут меняться в различных условиях эксплуатации и со временем. Совокупность операций для определения удовлетворительности выбранной модели и ее улучшения по результатам наблюдений поведения объекта при наличии погрешностей наблюдений и возмущений в движении ОУ называется **оцениванием модели объекта**. Довольно часто встречается ситуация, когда класс моделей объектов определенного типа известен, и требуется на основе наблюдений выбрать модель ОУ из этого класса. Процедура, предназначенная для нахождения из определенного класса моделей вида модели и ее параметров для ОУ по тем или иным признакам его поведения в конкретной ситуации, носит название **идентификации модели объекта**. *Оценивание* является более объемным понятием, чем *идентификация*. Но если речь идет о модели конкретного ОУ, эти понятия с неизбежностью перекрываются.

**Автоматизация процессов подготовки решений.** В первую очередь в СУ автоматизируют информационные процессы. В простейших системах регулирования для выработки управляющих воздействий обычно нужно мало информации. Здесь не возникает особых трудностей, связанных с ее получением и обработкой. Однако уже в средних, по современным меркам, СУ для управления нужна переработка большого числа данных. Проблема автоматизации информационных процессов включает в себя:

- организацию источников информации о текущем и ожидаемом состоянии СУ и ВС;
- нахождение способов получения и передачи данных от источников, упорядочивания, хранения, защиты информации и приведения ее на уровень современности;
- разработку алгоритмов обработки данных и методов отображения ее результатов;
- создание программных и аппаратных средств реализации названных методов и алгоритмов.



**Получение информации для управления.** Для выполнения своих задач САУ снабжается внутренними датчиками информации, средствами связи для получения сведений от внешних источников, устройствами хранения данных, программными средствами, управляющими получением информации от этих источников, ее упорядочиванием и передачей для дальнейшей обработки. **Постоянная и медленноменяющаяся информация в САУ** записывается в долговременной памяти. К организации данных в ней предъявляются требования надежности хранения, обеспечения быстрого поиска, защиты от ошибок и несанкционированного доступа и др. Сведения в памяти системы организуются в виде баз данных. **Базой данных** называют совокупность взаимосвязанных массивов, обеспечивающих хранение данных о СУ и ее ВС с такой минимальной избыточностью, которая обеспечивает их оптимальное использование во всех практических случаях, связанных с этой СУ.

Выделяют две самостоятельные функции, выполняемые базами данных: *образование информационных моделей СУ и ВС, справочная функция.* Первая функция заключается в аккумулировании всех необходимых при управлении относительно стабильных сведений об СУ и ВС, которые и составляют неформализованные информационные модели этих элементов. В САУ должна быть возможность дополнения этих моделей и приведения на уровень современности. Справочная функция баз данных состоит в выдаче сведений, необходимых для принятия решений. Они представляются по запросу оператора либо в соответствии с реализуемой программой автоматически. Выделение двух автономных функций позволяет формировать, накапливать и изменять по мере необходимости данные в базах независимо от использующих их программ.

Для работы с информацией баз разрабатывается комплекс программных средств, называемый **системой управления базами данных (СУБД)**. Основные функции СУБД: управление получением сведений, их сортировкой, распределением, хранением и защитой; поддержанием данных на уровне современности; выдача справок; объединение и разделение файлов, их копирование и восстановление; защита информации от несанкционированного доступа; устранение ошибок в работе ряд других функций.

**Обработка информации.** Цель обработки информации в САУ – контроль ее достоверности и нахождение концентрированных, сжатых характеристик, обеспечивающих минимальный и в то же время достаточный для принятия решений объем данных.

**Представление информации оператору.** При выдаче данных человеку должна быть обеспечена их полнота и в то же время минимизация до необходимого и достаточного для выработки правильного решения объема. В отображении информации лицу, принимающему решение, основным является удобство восприятия, обеспечивающее простое, без напряжения, быстрое и безошибочное понимание сложившейся в процессе управления ситуации. Трудности при восприятии информации ведут, в конечном счете, к увеличению времени на принятие решения и снижению его эффективности.

Комплекс технических и программных средств, выполняющих переработку информации для облегчения задачи управления, называется **системой поддержки принятия решений** либо просто **информационной системой**. В СУ информационная система замкнута на человека всегда, и иногда – на технические средства управления. На последние она замыкается в той мере, в которой в СУ автоматизируется выработка управляющих воздействий.

**Автоматизация этапа принятия решения**, в общем случае включающего в себя определение множества допустимых решений и выбор из них наилучшего, связана с разработкой соответствующего алгоритма. Для многих практически важных задач управления, характеризующихся небольшим числом параметров и относительно несложным характером влияния среды, разработаны строгие научные методы синтеза алгоритмов управления. К таким задачам относятся задачи регулирования, некоторые задачи выбора стратегий и ситуационного управления. Во многих задачах при нахождении алгоритмов управления используются приближенные эффективные или рациональные формальные методы.

Для сложных задач управления разработка алгоритмов выработки решений может сопровождаться значительными и нередко непреодолимыми на современном этапе трудностями. С одной стороны, эти трудности могут определяться многочисленностью факторов, которые влияют или могут влиять в разных ситуациях на управление. Это не позволяет с помощью технических средств получить достаточную для принятия решений информацию. Так, например, в судовождении число ситуаций, которые могут возникнуть при управлении судном, так велико, что практически невозможно учесть все характеризующие эти ситуации элементы с помощью средств автоматизации. С другой стороны, сложность получения алгоритмов управления объясняется трудностью моделирования интеллектуальной деятельности человека, лежащей в основе выбора решений в неавтоматизированной системе. Решения человека

основаны не только на формальной, но и на диалектической логике, на интуиции, на своем и чужом опыте. Поэтому для общего случая принятия решений выполнить моделирование мыслительной деятельности человека чрезвычайно сложно.

Трудности формализации этапа принятия решений, а в ряде случаев и экономическая сторона, заставляют во многих сферах управления вместо САУ применять «человеко-машинные СУ». В них прерогатива принятия решений принадлежит человеку.

## 1.8. Классификация систем автоматического регулирования и их характеристики

**Классификация САР.** Из САУ наибольшее применение имеют в настоящее время системы автоматического регулирования. Они классифицируются по назначению (для управления судном, станком и т.д.), по виду управляемых величин (курс, скорость и т.д.), по другим признакам, из которых отметим следующие.

**По виду задающего воздействия** выделяют системы: *стабилизации, программного управления, следящие.* **Системы стабилизации** характеризуются неизменностью задающего воздействия. Задача таких систем – поддержание с допустимой ошибкой постоянного значения выходной величины при наличии возмущающих воздействий. В **системах программного управления** задающее воздействие изменяется по заранее установленному закону. В соответствии с этим законом система изменяет выходную величину. В **следящих системах** задающее воздействие также величина переменная, но заранее закон его изменения неизвестен. Источником задающего сигнала здесь обычно служит внешнее явление.

**По зависимости между входными и выходными сигналами** САР подразделяются на *линейные* и *нелинейные*. У **первых САР** зависимость между входом и выходом линейна, т.е. описывается линейными дифференциальными или разностными уравнениями. При исследовании этих САР используется принцип суперпозиции. Работа **вторых систем** отражается нелинейными дифференциальными или разностными уравнениями. В них имеется один или больше элементов, связь между входом и выходом которых является нелинейной. По сравнению с линейными САР анализ и синтез таких систем сложнее.

**В зависимости от характера сигналов** различают САР *непрерывного* и *дискретного действия*. Все сигналы в **первых системах** являются плавно изменяющимися. У **дискретных систем** хотя бы одна величина представляет собой дискретный по времени

(импульсный) или дискретный по уровню (скачкообразный, релейный) или дискретный по времени и уровню (цифровой) сигнал.

**По виду управления качеством** выделяют САР: *без настройки, с ручной настройкой, с частичной адаптацией, адаптивные*. У **САР без настройки** при работе во всем диапазоне условий структура и параметры АУУ неизменны. **Система с ручной настройкой** дает возможность вручную с помощью специальных органов изменить параметры регулятора для обеспечения требуемого качества управления при изменении влияющих на него условий работы. Следует отметить, что ручная настройка системы часто оказывается обременительной, а иногда и невозможной. В **САР с частичной адаптацией** при изменении одних факторов, влияющих на качество работы системы, используется автоматическая настройка регулятора на оптимальный режим, а других – ручная.

**Адаптивные системы** в процессе эксплуатации при изменении динамических свойств объекта и внешних условий без участия человека изменяют параметры, или структуру и параметры, АУУ для поддержания оптимального режима функционирования. Эти системы делят на *самонастраивающиеся, самоорганизующиеся и самообучающиеся*. В *самонастраивающихся системах* меняются параметры регулятора, пока не будут достигнуты оптимальные или близкие к ним значения управляемых величин. В *самоорганизующихся системах* качественная работа обеспечивается за счет изменения, как структуры алгоритма управления, так и его параметров. Наиболее широки возможности *самообучающихся систем*, улучшающих алгоритмы своего функционирования на основе анализа опыта управления. Отыскание оптимального режима в адаптивных системах осуществляется как с помощью автоматического поиска, так и беспоисковым путем. Внедрение адаптивных САР позволяет приблизиться к оптимальным режимам функционирования объектов, облегчает задачу унификации систем управления, сокращает время на испытания и наладку, снижает технологические требования на изготовление ряда узлов устройств управления, освобождает обслуживающий персонал от трудоёмких операций настройки.

**В зависимости от числа управляемых величин** различают *одномерные* и *многомерные* САР. **Первые системы** имеют одну управляемую величину и один силовой орган.

В **многомерных САР** управляемых величин и органов несколько. Такие САР могут быть несвязанного и связанного регулирования. В *несвязанных системах* алгоритмы управления разными координатами ОУ не имеют связей. Эти системы делятся на независимые и

зависимые. В *независимых системах* изменение любой управляемой величины не влияет на поведение остальных. Например, в системе управления курсом и скоростью судна при определенных условиях изменение первого параметра не сказывается на втором и наоборот. В *зависимых системах* изменение одной управляемой величины приводит к изменению других. Например, в системе управления курсом и угловой скоростью судна изменение первой координаты влияет на вторую. В *многомерных системах связанного регулирования* алгоритмы управления разными координатами имеют взаимные связи.

**Характеристики САР и ее элементов.** У САР различают два режима работы: *установившийся* и *динамический* (эволюционный, неустановившийся). В *установившемся режиме* наблюдается баланс энергии вводимой в систему и энергии, отдаваемой ей. Этот режим характеризуется неизменностью или стационарностью входных и выходных величин САР. *Динамический режим* – это режим изменения состояния системы в ответ на изменяющиеся входные воздействия. При управлении движением судна установившийся режим характеризуется постоянством тяги винта и угла перекадки руля, а также балансом сил и моментов на корпусе. В динамическом режиме этот баланс нарушен. Когда в этом режиме тяга винта и положение руля постоянны, то судно постепенно приходит в новый установившийся режим движения.

Аналитическая работа САР отражается математической моделью (чаще всего системой дифференциальных уравнений), позволяющей определять выходные величины системы в зависимости от задаваемых входных. Однако такая универсальная характеристика трудно интерпретируема. Для возможности быстрой оценки и сравнения свойств различных САР применяют упрощенные характеристики *статические* и *динамические* [28].

**Статическая характеристика** описывает зависимость между значениями входной и выходной величины системы (либо ее элементов) в установившемся режиме работы:

$$\bar{Y} = f(\bar{X}).$$

Здесь  $\bar{Y}, \bar{X}$  – значения выходной и входной величины в установившемся режиме. Статическая характеристика может быть линейной (рис. 1.4,а), нелинейной (рис. 1.4,б), релейной (рис. 1.4,в), с зоной нечувствительности (рис. 1.4,з), с зоной насыщения (рис. 1.4,д), с зоной неустойчивости (рис. 1.4,е) и другой.

**Динамические характеристики** описывают реакцию САР или ее элементов на изменения входной величины по типовым законам, либо

наиболее вероятным, либо неблагоприятным. Стандартными входными воздействиями являются: *ступенчатая функция* (рис. 1.5,а), *импульсный сигнал* (рис. 1.5,б), *гармоническое воздействие* (рис. 1.5,в).

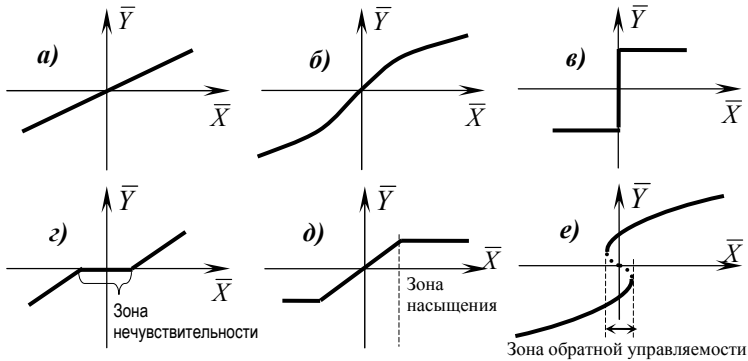


Рис. 1.4. Виды статических характеристик

Реакция системы на первый сигнал называется **переходной функцией**. Нетрудно заметить, что она отражает процесс перехода системы с одного равновесного режима на другой. Функцию, описывающую реакцию системы на второй стандартный сигнал, называют **импульсной переходной**. Зависимости, отражающие реакцию системы на гармонические входные сигналы, называют **частотными характеристиками системы**.

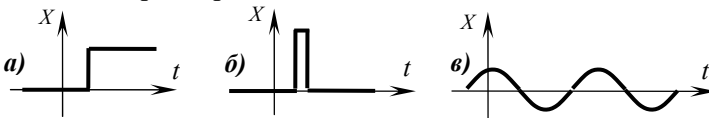


Рис. 1.5. Стандартные входные сигналы САУ

**Точечной характеристикой** САУ является значение того или иного параметра статических и динамических характеристик системы.

## 1.9. Интегрированные системы управления

Успехи в развитии науки управления, компьютерной техники, информационных технологий привели к созданию интегрированных СУ, решающих сложные задачи управления. **Интегрированная система управления** (ИСУ) представляет собой совокупность взаимосвязанных управляемых подсистем, объединённых общей целью функционирования. Ее примером на флоте является

интегрированная система судна (ИСС), включающая интегрированную систему мостика (ИСМ), систему управления главным двигателем (СУ ГДУ), систему управления подруливающими устройствами (СУ ПРУ) и другие (рис. 1.6). Входящие в ИСУ подсистемы называют также **модулями**.

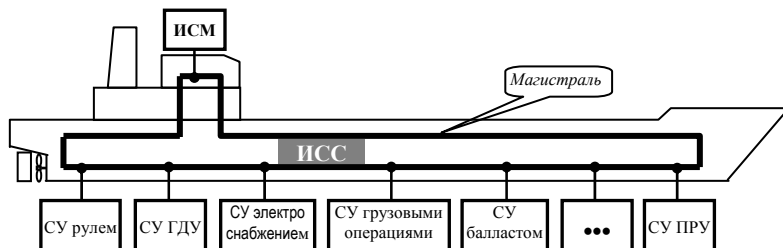


Рис. 1.6. Схема интегрированной системы судна

**Структуризация ИСУ.** Для упрощения решения задача управления большой размерности и трудности обычно представляется совокупностью упрощенных задач. Этот процесс называют **декомпозицией**. Она должна быть оптимальной или, по крайней мере, рациональной. Декомпозиции исходной задачи соответствует **структуризация СУ** – разделение ее на **подсистемы** с установлением для каждой из них задач и связей с другими подсистемами (входных и выходных величин).

**ИСУ с иерархической структурой.** Делить исходную задачу управления на упрощенные можно разными способами. Один из них предполагает вначале представление ее несколькими основными, по возможности самостоятельными задачами. Основные задачи считаются подчиненными главной. В свою очередь, в каждой из основных задач выделяют более простые. Последние также делятся. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не исчезнет смысла производить дальнейшее деление. Такой декомпозиции соответствует иерархическая организация ИСУ, при которой части системы распределены по уровням и вся система становится многоуровневой, многоступенчатой, но обладающей в то же время свойством целостности. Подсистема в такой ИСУ с одной стороны является командной (управляющей) для подсистем соседнего нижнего уровня, а с другой – подчиненной (управляемой) по отношению к подсистеме соседнего верхнего уровня. На рис. 1.7 приведена схема ИСУ с 4-мя уровнями иерархии.

Связи между подсистемами одного уровня в ИСУ называются **горизонтальными**. Самостоятельность задач подсистем одного

уровня, приводит к минимизации этих связей. Для упрощения дальнейших рассуждений на рис. 1.7 приведена система без горизонтальных связей между подсистемами, хотя в общем случае они существуют. Связи между подсистемами разных уровней называются **вертикальными**. Они разделяются на **прямые (командные) связи**, идущие сверху вниз, и **обратные (отчетные) связи**, идущие снизу вверх. В ряде ИСУ используется принцип субординации. Он направлен на уменьшение вертикальных связей в ИСУ и разрешает их устанавливать только между непосредственно управляющей и управляемой подсистемами на соседних уровнях.

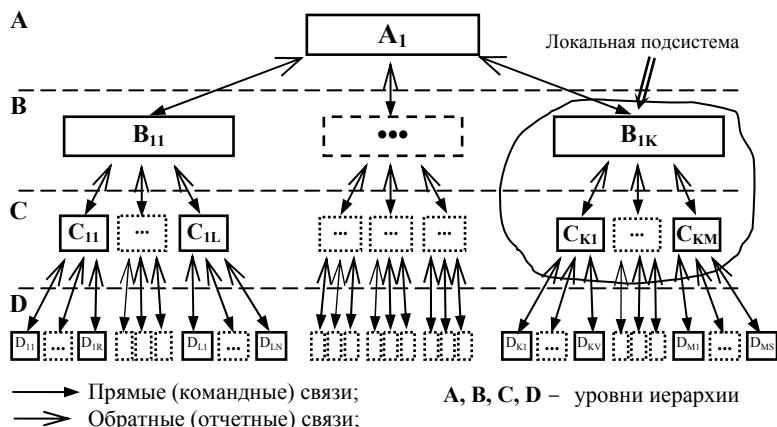


Рис. 1.7. Блок-схема иерархической ИСУ

ОУ командной подсистемы в ИСУ с иерархической структурой, как правило, является **групповым**. Он представляет собой непосредственно подчиненные этой подсистеме модули соседнего нижнего уровня. В совокупности командная подсистема и ее групповой объект образуют **локальную подсистему** ИСУ.

Анализируя иерархическую ИСУ, можно отметить следующее. **Чем выше уровень подсистем, тем меньше их число и значительнее цели.** Подсистемы верхнего уровня обычно решают задачи, связанные с определением целесообразного поведения – с перспективным планированием, с выработкой стратегий. Нижние подсистемы чаще всего выполняют простое регулирование. Их задачи устанавливаются вышестоящей подсистемой. Совокупность целей подсистем одного уровня должна обеспечить выполнение цели подсистемы соседнего верхнего уровня, которой они подчинены.



**Вес команды подсистемы верхнего уровня больше, чем команды подсистемы низшего ранга.** Это определяется большей значимостью цели первой подсистемы. Вес команды, в частности, характеризуется и ценой ошибки в принятом решении. Ошибка на верхнем уровне приводит к худшим последствиям и к большим непроизводительным затратам, чем ошибка на нижнем уровне.

**Количество команд на нижних уровнях больше, чем на верхнем.** При движении командной информации «вниз» подсистемы обычно выступают как генераторы дополнительных, конкретизирующих команд.

Действия подсистем верхнего уровня зависят от фактического исполнения нижними подсистемами своих функций. Поэтому последние должны информировать свою командную подсистему о ходе выполнения ими поставленных задач. «Наверх» должны передаваться не все отчетные данные нижних подсистем, а только существенные концентрированные сведения, необходимые верхней подсистеме для выполнения ее задачи. **Отчетная информация при движении «вверх» должна агрегироваться и сжиматься.** Под **агрегацией** понимается процесс обобщения и выделения данных из первичного множества с целью формирования групповых концентрированных характеристик, *отражающих существенные признаки* его поведения и состояния. Обобщение (интегрирование) проводится как по времени, так и по множествам отчетных данных нижних подсистем. В результате при движении «наверх» от уровня к уровню отчетной информации в ИСУ становится меньше, но значимость ее возрастает.

Решение простой задачи, как правило, занимает меньше времени, чем сложной. Кроме того, перед подачей команды управления обычно необходимо оценить результат выполнения предыдущего указания. Поэтому **продолжительность периода принятия решений растет при повышении уровня иерархии в ИСУ.** Таким образом, подсистемы верхних уровней имеют дело с более медленными аспектами поведения ИСУ, чем нижние подсистемы.

**Автоматизации сложных систем.** Основными принципами построения автоматизированных ИСУ являются: системный подход, модульность и иерархичность, единые дискретные основы построения аппаратуры, стандартизация оборудования, повышенная надежность, автоматическое обеспечение эффективности работы [1]. Основная роль здесь принадлежит системному анализу. Укрупненно он состоит из следующих этапов: *постановки задачи, структуризации системы, построения и исследования ее математической модели.*

**При постановке задачи** на содержательном уровне выясняются: цель системы, особенности автоматизируемого процесса, функции для достижения цели, критерии эффективности, ограничения на процесс управления, имеемые ресурсы. Успех постановки задачи определяется искусством и опытом специалистов по системному анализу, глубиной понимания ими стоящей проблемы.

**Структуризация** заключается в разделении системы на части в соответствии с постановкой задачи. Завершается этап структуризации определением входных и выходных величин подсистем, установлением связей между ними, между ИСУ и ВС, между ИСУ и оператором с целью достижения эффективного управления.

**Построение модели** состоит в получении математического описания системы, позволяющего производить ее анализ и синтез. Попытки описания ИСУ одной *«общей моделью»*, составленной из моделей всех подсистем, начиная с нижних, несостоятельны с позиции принятия решений по нескольким причинам. В ряде случаев *общую модель* ИСУ вообще невозможно получить. В других случаях она оказывается чрезвычайно сложной, так как в нее включаются параметры и связи подсистем всех уровней. А главное – с такой моделью очень трудно искать решения. Хотя, никто не говорит, что *общая модель* ИСУ вообще бесполезна. Эффективная модель ИСУ – **многоуровневое математическое описание**, включающее комплекс моделей локальных подсистемы разных уровней, выделяемых в ИСУ. Такие модели подсистем называют *стратами*, а представление ИСУ ими – *стратифицированным описанием*. Страта учитывает только существенные элементы для описываемой подсистемы. Число страт низкого уровня в модели ИСУ всегда больше, чем страт высокого уровня. Цель стратифицированного описания:

- простота анализа ИСУ, ее подсистем, и синтеза их алгоритмов;
- корректный учет влияющих на ИСУ многочисленных факторов.

Страта отражает только существенные для своей локальной подсистемы параметры, свойства и связи. Поэтому каждая из страт, даже самого верхнего уровня, значительно проще *«общей модели»* ИСУ и обеспечивает возможность более простого анализа и более простой выработки управляющих воздействий.

**Открытость ИСУ.** Задачи подсистем верхних уровней ИСУ обычно более трудны для количественной формализации, чем нижних подсистем. Поэтому автоматизация ИСУ, как правило, начинается с нижних уровней и осуществляется поэтапно. Пожалуй, самым важным требованием к интегрированным автоматизированным системам управления (ИСАУ) является **«открытость»**. Она состоит в

возможности подключения дополнительного оборудования и организации его работы в составе ИСАУ. Это требование определяет способность ИСАУ к расширению функций, к модернизации, к дальнейшей автоматизации процессов в той или в другой предметной области. Открытость систем обеспечивается единой дискретной основой аппаратуры, стандартизацией оборудования, рациональными методами интеграции и рядом других мер.

**Единая дискретная основа** означает, что все части ИСАУ должны управляться компьютерной техникой, преобразовывать данные и выдавать их в цифровой форме. Это позволяет более просто и надежно организовывать информационное взаимодействие между частями ИСАУ, а также между ней и другим системами. ИСАУ в этом случае получается объединением ее частей в информационную сеть.

**Стандартизация оборудования** направлена на обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик ИСАУ и совместности ее частей. Различают конструктивную, информационную, программную, метрологическую и энергетическую совместимость аппаратуры. *Конструктивная совместимость* предполагает согласованность конструктивных параметров частей ИСАУ, позволяющая соединять функциональные устройства в единое целое. *Информационная совместимость* определяется одинаковыми способами обмена данными между подсистемами. *Программная совместимость* означает возможность взаимосвязанной работы программ подсистем в рамках единой системы. *Метрологическая совместимость* предполагает согласованность единиц измерения данных, которыми обмениваются части ИСАУ. *Энергетическая совместимость* – это одинаковость электропитания элементов ИСАУ.

**Применение эффективных методов интеграции.** Автоматизация производственных процессов на начальном этапе привела к применению компьютерных устройств для управления отдельным оборудованием. В дальнейшем возникла необходимость создания локальных объединений этих устройств для решения задач более высокого уровня, централизации управления, совместного использования информационных ресурсов. Такое объединение по существу сводится к обеспечению взаимодействия компьютеров.

При *магистрально-модульном* методе отдельные части объединяются в ИСАУ путем подсоединения компьютеров, управляющих этими частями, к коммуникационной среде в виде магистрального канала. В небольших по размерам сетях, в частности в судовых, для обеспечения взаимодействия отдельных компьютеров обычно используется один магистральный канал (моноканал),

замкнутый в виде петли (кольца), в которой циркулирует информация. Приборы подключения компьютерных систем к каналу называются блоками доступа к нему, либо интерфейсными устройствами.

*При использовании модульно-иерархического* метода модули ИСАУ располагаются по уровням их значимости. Модули на низшем уровне решают узкие задачи, а другие модули, высшие по иерархии, обеспечивают решение задач более высокого уровня путем управления и коррекции низших модулей.

## 1.10. Обеспечение качества интегрированных систем

**Общие сведения.** Практически любая ИСАУ требует принятия в реальном масштабе времени определенных мер для поддержания качественной ее работы [12]. Управление качеством ИСАУ осуществляется по-разному: *вручную* (человеком либо группой людей), *полуавтоматически* (человеко-машинной системой), *автоматически* (без участия оператора). Во многих ИСАУ без технических и программных средств обеспечить эффективную работу практически невозможно. В таких случаях эффективность ИСАУ поддерживается специальной **системой обеспечения качества СОК** (Computer Aided Quality Control System). СОК может рассматриваться как совокупность подсистемы обеспечения целостности ИСАУ и подсистемы адаптации этой интегрированной системы к изменяющимся условиям эксплуатации. Компьютеризованная СОК встраивается в ИСАУ как ее часть, которая совместима со всеми другими компонентами ИСАУ. *Управляемыми величинами* для СОК является совокупность показателей эффективности ИСАУ, а управляющими воздействиями – меры для достижения требуемых их значений.

Перечень задач, которые должна решать СОК, определяется, исходя из следующих соображений. На качество функционирования ИСАУ влияет изменение свойств объектов управления, нарушения целостности информационных потоков, изменение состояния ВС и другие факторы. Резкие ухудшения качества, а иногда и невозможность дальнейшей работы ИСАУ, порождают поломками ее аппаратуры, отказами. Обеспечение полноценной работы ИСАУ включает широкий круг задач. Среди них можно отметить:

- надзор за работой всех частей ИСАУ и управляемых объектов;
- контроль информационных, энергетических и материальных потоков ИСАУ и ее частей;
- обнаружение изменения свойств подсистем ИСАУ;

- прогноз работы и выявление нежелательных тенденций в состоянии аппаратуры;
- обнаружение ошибок в данных, в работе программ;
- выявление неисправностей, их причин и др.

Одна из основных задач СОК – сбор информации о параметрах, отражающих свойства ИСАУ. Это параметры состояния: процесса управления, работы технических средств, информационных, материальных и энергетических потоков. По этой информации СОК оценивает отклонения свойств системы от требуемых, выявляет причины их изменения. На основании полученной оценки СОК формирует решения о мерах для устранения причин, вызвавших нарушение качественной работы ИСАУ. Чтобы решать названные задачи, необходимо:

- определить параметры, отражающие полезные свойства ИСАУ;
- организовать источники информации об этих параметрах;
- разработать стратегии наблюдения за свойствами ИСАУ;
- создать алгоритмы для выявления причин изменения и для прогнозирования свойств системы по результатам наблюдений;
- найти алгоритмы выработки решений для устранения причин, ухудшающих качество работы ИСАУ.

Нетрудно заметить, что работа СОК определяется содержанием процедур, связанных с информацией, и, главным образом, с извлечением из наблюдений сведений об изменении свойств ИСАУ. Основными из этих процедур являются: *измерение, контроль, мониторинг, диагностика, обнаружение, идентификация, распознавание образов*. **Измерение** представляет собой сравнение наблюдаемой величины с ее единицей с целью получения значения этой величины в удобной для использования форме. **Контроль** заключается в установлении соответствия между состоянием (свойством) объекта и заданной нормой, определяющей различные области его состояния, и в принятии регулирующих мер по приведению состояния объекта в соответствие с нормой. **Мониторинг** – это постоянное наблюдение за каким-либо процессом или явлением с целью установления его соотношения желаемому результату или первоначальному предположению. Он является частным видом контроля. **Диагностика** трактуется как анализ признаков с целью: установления состояния объекта (процесса) или причин отклонения этого состояния от желаемого; предсказания возможных отклонений для предотвращения поломок и аварий; поиска ошибок, неисправностей и определения причин их возникновения. **Обнаружение** состоит в выявлении фактов, являющихся логическими,

вероятностными или другими функциями простых событий, а также в выявлении событий в условиях шума или на фоне других событий.

**Идентификация** – это совокупность операций для отождествления объекта с одним из известных видов (моделей) объектов.

**Распознавание образов** заключается в классификации объектов на основе установленного словаря признаков и алфавита классов.

**Виды функций СОК.** У СОК выделяют *функции наблюдения* и *воздействий*. Состав этих функций зависит от типа системы, качество которой поддерживает СОК. Например, в интегрированной системе управления техническими средствами судна можно выделить следующие **виды наблюдения**:

- с целью обнаружения чрезвычайных событий (пожара, водотечности корпуса, вредных газов и других опасных явлений);
- за состоянием важных с точки зрения безопасности судна открытий в корпусе (водонепроницаемых и пожарозащитных дверей, люков трюмов, аппарелей и др.);
- за параметрами работы оборудования для выявления отклонений от нормы;
- за информационными потоками с целью обнаружения ошибок, сбоев, задержек в предоставлении сведений и других нарушений;
- за состоянием запасов топлива, масла, воды и других ресурсов, необходимых для функционирования судна, и другие.

**Виды воздействий** СОК на ИСАУ также разнообразны. Одними из них является использование операций включения/отключения различных средств с целью: устранения причин нарушений свойств ИСАУ, защиты аппаратуры от поломок или для восстановления ее работоспособности, получения дополнительной информации, без которой невозможна эффективная работа ИСАУ в сложившейся ситуации. Другими мерами служит изменение режимов работы аппаратуры. Третьими – корректировка параметров и структуры алгоритмов управления ИСАУ.

**Подсистемы СОК.** В ИСАУ контролю подлежат технические характеристики аппаратных средств, программное обеспечение, а также достоверность информации, с которой оперирует система. В общем случае СОК включает подсистему обеспечения целостности (СОЦ) комплекса управления и подсистему адаптации (СА) этого комплекса к внутренним и внешним условиям его работы.

Применяемые на современном этапе компьютеризованные СОК выполняют ограниченный круг задач. Чаще всего, они охватывают своими функциями оборудование, наиболее важное с точки зрения целевого назначения ИСАУ и ее безопасности. Для обеспечения

эффективной работы этого оборудования применяются локальные автоматические подсистемы: мониторинга, самоконтроля, диагностики, защиты, самовосстановления работоспособности, адаптации к условиям работы.

Наибольшее распространение из этих средств получили **подсистемы мониторинга**. Они применяются с целью обнаружения чрезвычайных событий, для постоянного контроля параметров работы технических средств, для обнаружения ошибок в работе программного обеспечения, в информации определенных датчиков, и для сигнализации о случаях, требующих внимания и принятия мер со стороны оператора.

**Подсистемы самоконтроля** по сравнению с системами мониторинга выполняют более широкий круг задач при обеспечении эффективности систем. Следует принять во внимание, что *мониторинг* не включает деятельность по изменению протекания наблюдаемого процесса, но является источником информации необходимой для принятия решений по управлению качеством этого процесса и для других действий. Этим он отличается от термина «*контроль*», обозначающего в общем случае совокупность наблюдения и принятия активных регулирующих мер, улучшающих качество управления. Методы контроля разделяются на аппаратные и программные. В *программные* входят процедуры: дублирования обработки, контрольных сумм, дополнительных усеченных алгоритмов, тестирования, использования избыточной информации и другие. *Аппаратные методы* предусматривают введение дополнительного оборудования (датчиков, анализаторов и других приборов) для контроля рабочих процессов.

**Подсистемы диагностики** применяются для анализа состояния оборудования, тенденций в его изменении, для выявления неисправностей технических средств, ошибок программного обеспечения и установления их причин. ***Благодаря диагностике становится возможным прогнозирование поведения объекта в будущем.*** Объектом диагностики может быть устройство, программа, система, компьютер, сеть. В процессе диагностики изучаются характеристики, параметры и функции объекта. Осуществляется тестирование и анализируется полученный материал. В случаях нарушений нормальной работы аппаратуры и/или программного обеспечения определяются характер, место, причина имеющихся неисправностей и ошибок. При эксплуатации ИСАУ диагностика осуществляется всякий раз, как только обнаружится ошибка. Для возможности обнаружения ошибок в приеме, запоминании, обработке

и передаче информации в данные вводится определенная избыточность, позволяющая осуществлять необходимую диагностику. При возникновении сбоев и отказов технических устройств фиксируется факт неисправности, определяется ее место и вид, передается сообщение о неисправности для принятия мер по ее устранению.

**Сигнализация.** О случаях нарушений нормальной работы системы, о нежелательных тенденциях развития ее рабочих процессов, о сбоях, о появлении неисправностей и ошибок, подсистемы мониторинга, самоконтроля и диагностики должны сообщать с помощью визуальных и/или звуковых средств сигнализации.

Характеризуя требование обеспечения высокой готовности интегрированных систем к продолжительному полноценному функционированию, необходимо отметить следующие положения. Система и сопрягаемые с ней устройства должны работать при определенных отклонениях от номинальных значений параметров электропитания. Они также должны иметь резервные (аварийные) источники электроэнергии на случай выхода из строя основного источника электропитания или неполадок в его работе, которые могут влиять на безопасность функционирования аппаратуры.

**Подсистемы защиты.** Для предупреждения поломок следует снабжать ИСАУ специальной подсистемой защиты, которая при угрозе поломки частей ИСАУ будет изменять режимы их функционирования на облегченный или выключать определенные устройства и саму ИСАУ.

**Подсистемы восстановления работоспособности.** В ИСАУ необходимо предусматривать средства резервирования, повышающие надежность системы и обеспечивающие ее функционирование при поломках основной аппаратуры. Для автоматического ввода в действие резервного оборудования при поломках или для принятия других мер по их устранению, рекомендуется системы управления оборудовать подсистемами восстановления работоспособности.

**Подсистемы адаптации** в процессе эксплуатации ИСАУ при изменении внутренних и внешних условий работы самостоятельно меняют характер процессов управления этого комплекса для поддержания оптимального режима его функционирования.



## 2. Управляемость судов

### 2.1. Общие сведения о судне как объекте управления движением

В задачах судовождения термин «судно» обозначает управляемый объект, включающий **корпус судна** и **средства управления** (силовые средства – СС). Судно обычно имеет несколько СС. Они преобразуют поступающие на их вход команды управления в воздействия на корпус, обеспечивающие выполнение этих команд. Элемент средства управления, который непосредственно создает управляющую силу, называется **силовым органом**. Значение параметра  $U$  работы этого органа, которое определяет величину воздействия на корпус, задает КС (человек или АУУ). СС по существу является следящей системой, обеспечивающей равенство  $U$  задаваемому значению  $U_Z$ . Учитывая сказанное, СУ движением судна можно представить схемой (рис. 2.1), где  $U$  и  $U_Z$  – вектор параметров работы силовых органов и его задаваемое значение;  $X$  – вектор параметров движения судна.

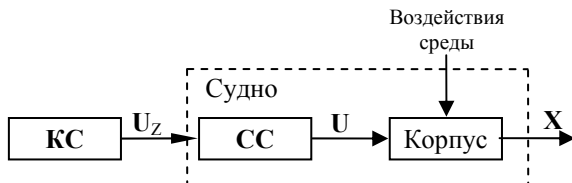
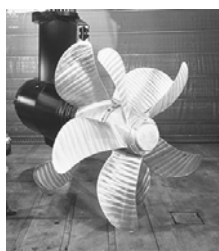


Рис. 2.1. Блок-схема системы управления движением судна

Судовые средства управления бывают активными и пассивными, главными и вспомогательными. **Активные средства** самостоятельно вырабатывают силы, прилагаемые к корпусу судна (ГДУ, подруливающие устройства). На органах **пассивных средств** эти силы возникают как реакция на движение судна и/или струи винта (руль).

**Главные СС** характеризуются непрерывным использованием и выработкой воздействий, определяющих движение судна при выполнении перехода. К ним относятся главное движительное и главное рулевое устройства (ГДУ и РУ), либо совместная движительно-рулевая установка (ГДРУ). В настоящее время на транспортных судах, как правило, используются раздельные ГДУ и

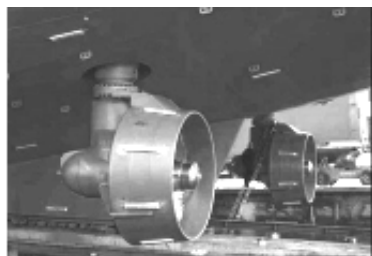
РУ, в совокупности называемые *традиционным движительно-рулевым комплексом*. Традиционное ГДУ включает главный двигатель (дизель или паровая турбина), гребной винт (ВФШ или ВРШ), связанный с ГД валопроводом. Традиционное РУ состоит из электрогидравлического рулевого привода и профилированного руля. Однако такое положение имеет тенденцию к изменению. Все шире, особенно на скоростных судах, применяются водометные и гидрореактивные движительные установки. Увеличивается и область применения на транспортных судах в качестве ГДРУ *поворотных (азимутальных) винтовых колонок (ПВК)* и *поворотных (азимутальных) пропульсивных систем (ППС)*.



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 2.2. Поворотные винтовые колонки и пропульсивные системы

**ПВК** представляет собой гребной винт либо соосных два винта (рис. 2.2,а) или комплекс «винт-насадка» (рис. 2.2,б,в), которые могут поворачиваться по азимуту на  $360^{\circ}$ . Двигатель ПВК располагается, чаще всего, внутри корпуса судна и передает момент вращения на гребной винт с помощью механической передачи. У **ППС** забортная поворачивающаяся по азимуту часть включает водонепроницаемую капсулу (кокон) с электродвигателем, на валу которого закреплен либо один винт, впереди или сзади капсулы, либо два винта на обоих ее

концах (рис. 2.2, з, д). ПВК и ППС имеют ряд преимуществ перед традиционной пропульсивно-рулевой схемой и обеспечивают судну повышенную маневренность на малых и предельно малых скоростях хода. Ограничивает распространение ПВК и ППС их сложность, более высокая стоимость и меньшая надежность.

**Вспомогательные средства управления** применяются эпизодически, в основном при маневрировании в стесненных водах на малых и предельно малых скоростях, когда эффективность главных СС недостаточна. К вспомогательным СС относятся туннельные и азимутальные подруливающие устройства (в том числе и ПВК), активные рули. При выполнении маневров судовые средства управления могут использоваться раздельно и совместно.

**Основные требования.** Согласно конвенции СОЛАС-74 главные силовые средства и все вспомогательные механизмы, необходимые для обеспечения движения и безопасности судна, должны иметь такую конструкцию, чтобы после их установки они работали как при положении судна на ровном киле, так и при крене на любой угол до  $15^\circ$  включительно на тот или иной борт при статических условиях, и крене до  $22,5^\circ$  включительно на тот или иной борт при динамических условиях (бортовая качка) при одновременном динамическом дифференте (килевая качка)  $7,5^\circ$  на нос или на корму. Национальная Администрация может допускать отклонения от этих значений, принимая во внимание тип, размеры и условия эксплуатации судна.

**Силы на корпусе** движущегося судна разделяют обычно на *управляющие, инерционные, реакции невозмущенной водной среды и возмущающие*. **Управляющими** воздействиями являются развиваемый ГДУ упор винта, боковая сила руля, упор подруливающего устройства и силы других СС. **Инерционными** считаются силы, обусловленные инертностью судна как твердого тела и инерцией воды, приводимой в движение судном. **Воздействие невозмущенной среды** – это гидродинамическая сила, представляющая собой результирующую всех сил реакции водной среды, развиваемых на корпусе при движении относительно воды. К **возмущениям** относятся воздействия на судно ветра, волнения, течения, мелководья и других факторов. В этом разделении сил следует отметить одну особенность. Гидродинамическая сила в общем случае зависит от линейной и угловой скорости движения корпуса относительно воды и *величины изменения этих скоростей* (линейного и углового ускорения). Для упрощения анализа управляемости составляющая гидродинамической силы, обусловленная линейным и угловым ускорением, формально присоединяется к инерционным воздействиям путем добавления к

массе судна так называемых «присоединенных масс». Они по своей природе не имеют ничего общего с массой и характеризуют лишь изменение кинетической энергии окружающей судно жидкости, происходящее из-за изменения линейной и угловой скорости судна. В результате, под *инерционными* понимаются силы, обусловленные инертностью судна, совместно с составляющими гидродинамической силы, определяемыми ускорениями в его движении. К *воздействиям невозмущенной среды* относится только зависящая от линейной и угловой скорости судна составляющая силы реакции воды на перемещение корпуса. Учитывая, что любой маневр движущегося на горизонтальной плоскости судна может быть представлен поступательным (плоскопараллельным) и вращательным перемещением, гидродинамическую силу обычно разделяют на *позиционную* (реакцию водной среды на равномерное поступательное перемещение судна) и *демпфирующую* (реакцию водной среды на равномерное вращение корпуса). Преимущество от такого деления заключается: в упрощении анализа движения за счет учета влияния гидродинамической силы как суммы действий ее составляющих (принцип суперпозиции); в удобстве решения частных задач управления, в которых требуется учитывать лишь один вид движения судна (поступательное либо вращательное). Строго говоря, использование принципа суперпозиции справедливо лишь для линейных систем, к которым судно в общем случае не относится.

#### **Рекомендации ИМО относительно маневренности судов.**

Низкие маневренные качества судов и недостаточное знание судоводителями свойств судна, как объекта управления движением, являются одной из причин морских аварий. Для обеспечения необходимой управляемости судов при постройке и для снабжения судоводителей достаточно подробной информацией о маневренных характеристиках судна ИМО приняла следующие документы:

- Циркуляр MSC/Circ.389 от 10.01.1985 – «Промежуточное руководство по оценке маневренных качеств судов при их проектировании»;
- Резолюция А.601(15) от 19.11.1987 – «Обеспечение наличия на судах и представление информации о маневренных элементах»;
- Резолюция MSC.137(76) от 05.12.2002 – «Стандарты маневренных качеств судов»;
- Циркуляр MSC/Circ.1053 от 05.12.2002 – «Пояснения к стандартам маневренных качеств судна».

**Циркуляр MSC/Circ.389** поощряет включение требований, предъявляемых к управляемости, в процесс проектирования судов

путем сбора и систематизации соответствующей информации. Он также очерчивает полномасштабные тестовые испытания, которые должны выполняться для оценки маневренности судна. В состав этих испытаний должны входить маневры циркуляция, зигзаг, торможение, прямая и обратная спираль, тесты начальной поворотливости и устойчивости на курсе.

**Резолюция ИМО А.601(15)** рекомендует на борту иметь следующую информацию об управляемости судна: *лоцманскую карточку* (Pilot card), *плакат маневренных характеристик* (Wheelhouse poster), *формуляр маневренных качеств* (Maneuvering booklet). *Лоцманская карточка* заполняется капитаном, предназначена лоцману, содержит информацию о состоянии судна в период проводки в части загрузки, двигателей и движителей, рулевого и подруливающего устройств, а также другие необходимые при управлении характеристики судна. *Плакат маневренных характеристик* включает таблицы и графики основных показателей управляемости судна в грузу и в балласте. *Формуляр маневренных качеств* представляет собой подробное описание маневренных свойств судна. Он включает приведенные на плакате маневренные характеристики и другие сведения, касающиеся управления судном.

**Резолюция MSC.137(76)** содержит стандарты маневренных качеств судов, касающиеся устойчивости на курсе, поворотливости, одерживаемости, способности торможения, а также условия применения этих стандартов.

**Циркуляр MSC/Circ.1053** включает пояснения для Администраций, способствующие единообразной интерпретации и применению Стандартов маневренных качеств судов.

## 2.2. Управляемость судна, ее виды и особенности

Под **управляемостью** судна понимается его способность требуемым образом изменять свое положение и элементы движения за конечный промежуток времени в ответ на управляющие воздействия. Управляемость судна обеспечивается формой корпуса и СС. *Форма корпуса* определяется при проектировании судна с учетом его района плавания, требований обеспечения хорошей маневренности, мореходности, остойчивости, технологичности погрузки, выгрузки, размещения грузов и ряда других факторов. *Комплекс средств управления* выбирается в основном в зависимости от назначения судна.

Основными качествами управляемости являются устойчивость и маневренность [2, 3]. **Устойчивость** – это способность судна

противостоять влиянию возмущений на его движение. По конкретному управляемому параметру ОУ может быть устойчивым, неасимптотически устойчивым и неустойчивым. Если после прекращения действия возмущения на ОУ с течением времени управляемый параметр возвращается к исходному значению, то объект по нему является *устойчивым*. Если управляемый параметр после возмущения приходит к новому значению, отличающемуся от исходного, то объект *неасимптотически устойчив*. Если же после возмущения управляемый параметр непрерывно изменяется, то ОУ *неустойчив*. **Маневренность** называется способность судна изменять свои кинематические параметры с той или иной скоростью.

**Виды управляемости.** В процессе эксплуатации управляют тем или иным параметром движения судна. **В зависимости от его вида** различают управляемость: *по курсу, по скорости, по угловой скорости, по другим координатам* [21].

**По используемому для управления СС** выделяют управляемость, обеспечиваемую: *рулевым устройством* (рулем), ГДУ (гребным винтом), *движительно-рулевым комплексом в целом* и др.

Управляемость по курсу может классифицироваться **в зависимости от направления хода и величины скорости судна**. В первом случае различают управляемость по курсу *на переднем и на заднем ходу*. Во втором – управляемость *на расчетной, маневренных и предельно малых скоростях*. Напомним, что под термином «ход судна» понимается процесс его перемещения в направлении ДП под действием приложенной к корпусу продольной тяги. В зависимости от скорости суда подразделяются на обычные (до 30 узлов) и скоростные (от 30 до 70 узлов). При проектировании в зависимости от назначения судна определяют его основную *эксплуатационную скорость*, называемую также *расчетной*, так как с ее значением рассчитывается корпус, двигатель, движители и ряд других элементов. Для транспортных судов – это скорость полного (морского) переднего хода – ППХ. Так как на ППХ транспортные суда совершают переходы (рейсы – *ruise*), то эту скорость называют и *крейсерской*. Относящиеся к ней характеристики управляемости судна по курсу считаются основными. Скорости судна меньшие расчетной, но достаточные для управления рулем, называются *маневренными*. *Предельно малыми* считаются скорости хода, на которых судно не слушается руля. Границей между маневренными и предельно малыми ходами является скорость, на которой руль теряет свое свойство, как орган управления. У морских судов значения этой скорости неодинаковы (в среднем – около 2,5 узла). В формуляре маневренных характеристик приводится

минимальная рабочая частота вращения винта с соответствующей ей скоростью хода и минимальная скорость движения вперед с остановленными двигателями, при которой с помощью руля может удерживаться курс.

**В зависимости от направления поворота судна в ответ на перекладку руля** выделяют управляемость по курсу *прямую* и *обратную*. Если движущееся судно поворачивает в сторону перекладки руля, то его управляемость по курсу называется *прямой*, если оно уклоняется в противоположную сторону, то его управляемость *обратная*. При проектировании судна стараются обеспечить прямую управляемость, как на переднем, так и на заднем ходу во всем диапазоне перекладок руля.

**В зависимости от возможности решения задачи управления** различают *достаточную* и *недостаточную* управляемость судна. Так, например, управляемости судна с традиционными главными СС недостаточно для маневрирования на предельно малых скоростях. В то же время, ее достаточно для проводки судна по заданному маршруту при движении полным ходом.

**Особенности управляемости судов.** Современный этап развития судовождения характеризуется разнообразием форм корпусов и пропульсивных установок судов. Это связано с широкой специализацией судов и стремлением оптимального приспособления формы корпуса и характеристик движительно-рулевого комплекса к особенностям эксплуатации судна. Разнообразие форм корпусов и пропульсивных установок приводит к существенным отличиям маневренных свойств судов. Характеризуя особенности управляемости судов, следует отметить:

- их большую инерционность;
- недостаточную управляемость для решения ряда задач;
- влияние на динамические свойства загрузки, путевых условий (мелководье, каналы, реки, волнение и др.);
- зависимость эффективности СС от хода судна, путевых условий и других причин;
- неоднозначную в ряде случаев реакцию на сигналы управления;
- плохую управляемость по курсу при малых значениях хода.

### 2.3. Управляемость по курсу, обеспечиваемая рулем

**Управляемость судна на переднем ходу.** При выполнении переходов особое значение имеет управляемость судна по курсу, обеспечиваемая рулевым устройством. Основными ее качествами

считаются *устойчивость на курсе* и *поворотливость*. Под **устойчивостью на курсе** понимается способность судна двигаться прямолинейно. Различают устойчивость судна с неподвижным рулем в ДП и устойчивость управляемого рулем судна (системы «УУ–судно», где в качестве УУ может выступать человек или авторулевой).

Способность судна с неотклоненным от ДП рулем сохранять постоянным направление движения называется **собственной устойчивостью** либо просто **устойчивостью судна на курсе**. Различают суда *неасимптотически устойчивые* (сокращенно – *устойчивые*) и *неустойчивые* на курсе.

**Устойчивое на курсе судно** обладает следующим свойством. Если в ответ на возмущение это судно с неотклоненным рулем стало изменять курс, то после прекращения воздействия оно постепенно придет к прямолинейному движению. Величина отклонения нового направления движения от старого при определенном возмущении отражает степень устойчивости судна на курсе. На рис. 2.3 судно *A* обладает большей устойчивостью на курсе, чем судно *B*.



Рис. 2.3. Характеристика степени устойчивости на курсе

Статической характеристикой управляемости судна на курсе является диаграмма поворотливости  $\rho = f(\beta)$ . Она отражает зависимость относительной кривизны установившейся циркуляции  $\rho = L/\bar{R}_{Ц}$  ( $L$  – длина судна,  $\bar{R}_{Ц}$  – радиус установившейся циркуляции) от угла перекадки руля, с которой выполняется эта циркуляция. Для устойчивых на курсе судов *A* и *B* (см. рис. 2.3) диаграмма поворотливости имеет вид, приведенный на рис. 2.4,а. Степень устойчивости судна на прямом курсе характеризуется углом  $\gamma$  наклона касательной, проведенной к кривой  $\rho = f(\beta)$  в начале координат. Чем меньше этот угол, тем выше устойчивость на курсе.

**Неустойчивое на курсе судно**, когда руль в ДП, при отсутствии внешних воздействий впадает в правую или в левую циркуляцию с радиусом  $\bar{R}_{Ц0}$  в установившемся режиме, которому соответствует



$\rho_0 = L / \bar{R}_{ЦО}$ . Диаграмма поворотливости такого судна приведена на рис. 2.4,б, где  $\beta_{\Pi}$  – предельный угол обратной поворотливости. Следует отметить, что и криволинейное движение такого судна нестабильно при постоянных малых углах руля, меньших по величине  $\beta_{\Pi}$ . Обозначим интервалы  $\beta$  и  $\rho$ , в которых наблюдается обратная поворотливость, соответственно через  $\Delta\beta$  и  $\Delta\rho$ . Мерилом нестабильности движения на прямом курсе неустойчивого судна могут служить обе эти величины – чем они больше, тем неустойчивость выше. Эксплуатация судна с большой неустойчивостью на курсе опасна.

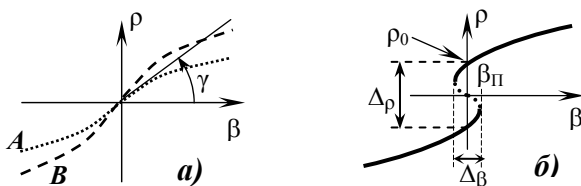


Рис. 2.4. Диаграммы поворотливости судов

Способность судна с помощью руля удерживать курс называется *эксплуатационной устойчивостью судна на курсе* или **устойчивостью комплекса «УУ–судно»**. Она имеет большое практическое значение, так как большая рыскливость снижает скорость движения и может явиться причиной выхода за пределы канала либо фарватера. Все суда должны обладать эксплуатационной устойчивостью на курсе, однако, степень ее у различных судов неодинаковая. Это определяется собственной устойчивостью судна на курсе и качеством УУ. Неустойчивые суда хуже удерживаются на одном курсе, чем устойчивые, но поворотливость их лучше. Стабилизация курса устойчивых судов достигается малыми и редкими переключками руля. Чтобы удерживать на курсе неустойчивое судно, требуется чаще и на большие углы переключать руль. *Степень устойчивости комплекса «УУ–судно» на курсе* условно характеризуется числом переключков руля  $N_{\text{пр}}$ , необходимых для стабилизации курса в условиях спокойной воды и безветрия на пути, равном длине судна [7, 24]

$$N_{\text{пр}} = \frac{n_{\text{пр}} L}{tV}. \quad (2.1)$$

Здесь  $n_{\text{пр}}$  – число кладок руля за время  $t$ ;  $L, V$  – длина и скорость судна. Частота переключений руля зависит от допускаемой амплитуды  $A_{\psi}$  угла рыскания  $\psi$  (для судов среднего тоннажа  $A_{\psi} \approx 1,0^{\circ}$ , а для крупнотоннажных –  $0,5^{\circ}$ ). Для неустойчивых судов  $N_{\text{пр}}$  может находиться по формуле Г.В.Соболева [24]

$$N_{\text{пр}} \approx \frac{3}{8} \cdot \frac{L}{R_{\text{Ц0}} A_{\psi}}. \quad (2.2)$$

Под **поворотливостью** (маневренностью по курсу) понимают способность судна изменять направление движения и двигаться по заданной криволинейной траектории. Для детальной оценки поворотливости используется комплекс характеристик, отражающих различные ее стороны. В бортовой документации по маневренности для судна в грузу и в балласте, для глубокой и мелкой воды приводятся: графики зависимости времени и пути поворота от угла поворота, графики расстояний до линии нового курса и точек начала одерживания для выбора поворотов на требуемый угол, графики и элементы циркуляций при максимальной и промежуточных переключках руля для ППХ и «со стопа» до полного маневренного хода, сведения о рыскливости, результаты выполнения зигзага и другие данные.

Важными качествами поворотливости считаются *максимальная поворотливость*, *начальная поворотливость*, *одерживаемость*. **Максимальная поворотливость** обычно характеризуется выдвигом и тактическим диаметром циркуляции, которую судно совершает на ППХ с максимальной переключкой руля при полной загрузке и посадке на ровный киль на глубокой спокойной воде в условиях безветрия. Она может также характеризоваться и диаметром установившейся циркуляции. Чем меньше значения этих параметров циркуляции, тем лучше считается поворотливость судна. Под **начальной поворотливостью** или *отзывчивостью* судна понимается скорость реакции движущегося прямолинейно судна на переключку руля. Это свойство зависит от инертности судна, его скорости, формы корпуса, степени устойчивости на курсе, выбранного для поворота угла руля, возможностей рулевого привода. Начальная поворотливость может характеризоваться временем запаздывания реакции судна на умеренную переключку руля, расстоянием от момента такой переключки руля до момента обнаружения отклонения от курса, величиной отклонения от курса после прохождения определенного расстояния от момента переключки руля на угол порядка  $10^{\circ}$  и другими

показателями. **Одерживаемость** – это способность судна останавливать вращательное движение с помощью перекладки руля на противоположный направлению вращения борт. Различают одерживаемость судна в начальной фазе поворота и *способность судна выходить из установившейся циркуляции*. Одерживаемость судна в начальной фазе поворота (когда скорость изменения курса увеличивается) называют *контролем рыскливости*. Оба вида одерживаемости могут характеризоваться углом зарыскивания (углом поворота судна от момента начала перекладки руля для одерживания до момента остановки вращения корпуса) и другими показателями. Значения этих показателей зависит от многих факторов. В частности, на характеристики одерживания влияет устойчивость судна на курсе. Неустойчивые суда в среднем хуже одерживаются, чем устойчивые. В маневрах остановки вращения судна выделяют *«аварийное одерживание»*, осуществляемое максимальной перекладкой руля.

**Устойчивость и поворотливость** являются противоположными качествами судна, так как повышение первого обычно влечет за собой ухудшение второго и наоборот. В то же время оба эти качества являются полезными. При проектировании судов стараются найти разумный компромисс между устойчивостью на курсе и поворотливостью. Судно считается устойчивым на курсе, если при состоянии моря и ветра не более 3÷5 баллов для удержания его на заданном курсе необходимо переключать руль не чаще 4 – 5 раз в минуту и при том не более 2÷3 градусов на каждый борт. Поворотливость судна должна быть такой, чтобы оно могло самостоятельно проходить криволинейные участки на водных путях в районе его эксплуатации. Для крупнотоннажных судов требуемую поворотливость при проектировании иногда приходится обеспечивать за счет устойчивости на курсе. Поэтому эти суда чаще, чем среднетоннажные, бывают неустойчивыми на курсе [30].

**Управляемость на заднем ходу.** Морские одновинтовые суда трудно управляются на заднем ходу (ЗХ) или не управляются вообще. Здесь встречается и обратная управляемость – судно поворачивает в сторону, противоположную перекладке руля. Причинами плохой управляемости на ЗХ являются:

- снижение эффективности руля, находящегося вне струи винта;
- появление боковых сил на корпусе из-за наброса винтом воды в «кормовую раковину», что приводит к резкой асимметрии в поворотах на каждый из бортов;
- расположение центра давления позиционной силы на корпусе, обусловленной дрейфом, в районе руля, что резко уменьшает

разворачивающий судно суммарный момент от действия позиционной силы и руля;

- ухудшение гидродинамических качеств руля, движущегося хвостовой кромкой вперед. В этом случае угол срыва потока с кромки руля значительно меньше, чем на переднем ходу, и составляет порядка  $20^{\circ}$ ;
- уменьшение эффективного угла руля на величину угла дрейфа в районе кормы при косом натекании воды на руль, либо увеличение его по этой причине до значения, превышающего критическое, когда резко уменьшается боковая сила руля. На переднем ходу этот эффект сказывается значительно меньше из-за спрямляющего влияния корпуса и струи от винта на поток, обтекающий руль. На ЗХ руль находится по движению впереди корпуса и последний не влияет на обтекающий руль поток. Вдобавок, при работе двигателя на ЗХ руль оказывается вне струи от гребного винта.

Большинство одновинтовых судов на заднем ходу неустойчивы на курсе. У них может наблюдаться обратная управляемость в большом диапазоне углов руля. Следует отметить, что неустойчивые на переднем ходу суда только в очень малой зоне углов руля имеют обратную управляемость при движении вперед. В основном диапазоне переключений руля их управляемость является прямой. **Управляемыми по курсу на ЗХ** считаются суда, которые одерживаются. Теоретически устойчивые на ЗХ суда – *управляемые*. Неустойчивые на ЗХ суда могут быть управляемыми, частично управляемыми и неуправляемыми. *Управляемое* судно выводится из поворота действием руля. Когда его поворот останавливается переключением руля на борт, противоположный направлению вращения, то его управляемость на ЗХ называется *прямой*. Если такое судно одерживается при переключении руля на борт, соответствующий направлению циркуляции, то его управляемость на ЗХ считается *обратной*. **Частично-управляемыми по курсу на ЗХ** называются неододерживаемые суда, которые при прямолинейном движении назад способны следовать в сторону переключки руля. Такое свойство весьма полезно, так как при наборе заднего хода судно можно разворачивать в нужную сторону. К **неуправляемым по курсу на ЗХ** относятся суда, которые не могут выходить из циркуляции и не способны с прямого курса поворачивать в направлении переключки руля.

Из вышеизложенного следует, что управляемость одновинтовых судов на ЗХ неудовлетворительна. Ее кардинальное улучшение возможно только при помощи средств активного управления.

## 2.4. Управляемость по скорости, обеспечиваемая ГДУ

**Виды маневров скоростью.** Главное движительное устройство должно обеспечивать набор заданной скорости движения, поддержание ее, изменение скорости в определенных пределах. Среди маневров скоростью выделяют разгон судна, торможение, увеличение скорости, снижение скорости. **Разгон** – это процесс изменения скорости судна от нулевого значения до заданного. Увеличение скорости судна от значения  $V_A$  ( $V_A > 0$ ) до значения  $V_B$  ( $V_B > V_A$ ) называется *частичным разгоном*. Процесс изменения скорости от нулевого значения до полного переднего хода носит название *полного разгона*. **Торможение** представляет собой процесс уменьшения скорости судна до нулевого значения. Если скорость судна снижается от скорости  $V_B$  ( $V_B > V_A$ ) до значения  $V_A$  ( $V_A > 0$ ), то этот процесс называется *замедлением хода*.

Ввиду того, что на море условия погоды могут резко изменяться, и на пути следования судна вероятно неожиданное появление препятствий, ГДУ должно обеспечивать и выполнение маневров *экстренного торможения* и *экстренного разгона*. При маневре *экстренного торможения* судно, которое движется полным ходом, реверсирует ВФШ до частоты вращения, соответствующей полному заднему ходу. Маневр экстренного торможения называется *«краш-стоп»* (crash stop). Под *экстренным разгоном* понимается процесс набора скорости судном от его неподвижного состояния до полного переднего хода при максимальной подаче топлива на двигатель после его запуска. Экстренные маневры сопровождаются большими нагрузками на двигатель и его упорный подшипник. Поэтому они должны применяться только при исключительных обстоятельствах.

В управляемости по скорости выделяются два качества: **ходкость** и **маневренность**. Перед их освещением приведем обозначение устанавливаемых на судах дискретных режимов хода:

- передний полный ход – ППХ (Full sea speed),
- передний маневренный полный ход – ППХм (Full ahead),
- передний средний ход – ПСХ (Half ahead),
- передний малый ход – ПМХ (Slow ahead),
- передний самый малый ход – ПСМХ (Dead slow ahead),
- СТОП (Stop engine) ,
- задний самый малый ход – ЗСМХ (Dead slow astern),
- задний малый ход – ЗМХ (Slow astern),
- задний средний ход – ЗСХ (Half astern),

- задний полный ход – ЗПХ (Full astern).

На судах, имеющих ГДУ с ВФШ, для каждого из перечисленных режимов устанавливается определенная частота вращения винта. На судах, где ГДУ с ВРШ, возможны два варианта обеспечения названных режимов хода. В установках, в которых ВРШ работает при неизменной частоте вращения двигателя, каждому режиму хода соответствует выбранный угол разворота лопастей ВРШ. В других ГДУ с ВРШ для каждого режима хода устанавливаются определенные, наилучшие с экономической точки зрения, значения частоты вращения и угла разворота лопастей ВРШ. Для ППХ значения параметров ГДУ соответствуют эксплуатационной скорости судна. Для других режимов принимают: ПСХ $\approx$ 0,7-ППХ; ПМХ $\approx$ 0,5-ППХ; ПСМХ $\approx$ 0,3-ППХ. Скорость судна в режиме ППХм выбирается несколько выше скорости ПСХ. В качестве ПСМХ иногда выбирают наименьшую скорость, при движении с которой судно при тихой погоде управляется рулем.

**Устойчивость движения судна по скорости** обеспечена противодавлением водной среды перемещению корпуса. Когда гребной винт вращается с постоянной частотой, то при прямолинейном движении скорость судна и без управляющих воздействий неизменна. Если возмущение изменит эту скорость, то после его прекращения она сама придет к исходному значению. В связи с этим, при рассмотрении управляемости по скорости вопроса об устойчивости не возникает.

**Ходкость** – это способность судна в заданных условиях плавания развивать требуемую скорость при определенной затрате мощности двигателя. Ходкость определяется пропульсивными качествами судна. К ним относятся: *удельное буксировочное сопротивление* ( $\bar{R}$ ), *удельная мощность главных двигателей* называемая также *ходовой энерговооруженностью* ( $E$ ), *пропульсивный коэффициент* ( $\eta$ ), характеризующий эффективность гидродинамического комплекса корпус-двигатели. Полное сопротивление воды движению судна зависит от многих факторов: скорости судна, угла дрейфа, формы, размеров и состояния наружной поверхности корпуса, наличия ветра, волнения, мелководья и других причин. Для возможности сравнения ходовые качества рассматриваются для судов со свежоокрашенным корпусом, при полной загрузке, и при прямолинейном равномерном движении в условиях глубокой спокойной воды и безветрия. Полное сопротивление воды движению судна в этих условиях будем называть *стандартным* и обозначать  $R$ :

$$R \approx k_R V^2. \quad (2.3)$$

Здесь  $k_R$  – коэффициент полного сопротивления движению судна;  $V$  – скорость хода. **Удельным буксировочным сопротивлением**  $\bar{R}$  называется отношение  $R$  к массе судна. Для обеспечения движения главные двигатели судна должны развивать определенную выходную (эффективную) мощность  $N_e$  и передавать ее на движители. Подводимая от двигателя к гребному винту мощность  $N_B$  называется **валовой**:  $N_B = \eta_B N_e$ , где  $\eta_B \approx 0,98$  – КПД валопровода. Иногда считают  $N_B \approx N_e$ . **Ходовой энерговооруженностью** судна называется отношение  $N_e$  к массе судна. Заметим, что **полная энерговооруженность судна** – это отношение суммарной выходной мощности всех средств его управления к массе судна.

При прямолинейном движении судна с постоянной скоростью  $V$  сила тяги его гребного винта (полезный упор)  $P_U$  равна и противоположно направлена силе буксировочного сопротивления  $R$ . Отсюда следует, что на преодоление  $R$  движителями должна развиваться полезная (буксировочная) мощность

$$N_R = RV \approx k_R V^3.$$

Отношение буксировочной мощности  $N_R$  к мощности  $N_B$ , подводимой к гребному винту, называется **пропульсивным коэффициентом** ( $\eta$ ). На современных морских судах  $\eta$  колеблется от 0,50 до 0,80 и зависит главным образом от обводов судна, типа главных механизмов, движителя и их технического состояния [2, 23].

Обобщенно ходкость характеризуется **максимальной скоростью**, развиваемой судном при полной загрузке и посадке на ровный киль на глубокой спокойной воде.

**Маневренность по скорости.** Способность судна изменять ход с тем или иным ускорением называется **маневренностью по скорости**. Она характеризуется временем изменения скорости с одной на другую и проходимым за это время расстоянием. О маневренности судна обычно судят по его **инерционным характеристикам**, которые подразделяются на *тормозные* и *разгонные*. Они зависят от массы судна, скорости его движения, сопротивления среды движению судна, особенностей динамики двигателя и упора движителей [10]. Тормозные характеристики судна с точки зрения обеспечения безопасности судовождения имеют большее значение, чем разгонные.

Инерционные характеристики судна приводятся в бортовом формуляре маневренных качеств. Для судна в грузу и в балласте они

включают зависимости скорости и проходимого расстояния от времени при смене хода. Для процессов торможений помещены и сведения о боковом уходе от линии первоначального курса. **Инерционно-тормозные характеристики** обычно включают в себя данные пассивного и активного (работой двигателя на ЗПХ) торможений до остановки с установившихся режимов следования: ППХ, ППХм, ПСХ, ПМХ. **Характеристики замедления хода** приводятся для смены режимов: с ППХ на ППХм, с ППХм на ПСХ, с ПСХ на ПМХ, с ПМХ на ПСМХ. **Характеристиками разгона** обычно являются графики изменения скорости и пути от времени при разгоне от нулевой скорости до скорости ППХм при работе машины на ППХм.

Особое значение при обеспечении безопасности судовождения имеет торможение с ППХ работой машины на полный задний ход (маневр «крэш-стоп»). Его характеристики должны определяться экспериментально. Траектория движения судна при таком маневре криволинейна (рис. 2.5). Из-за угла дрейфа и соответственно увеличения сопротивления движению корпусу на такой траектории тормозной путь уменьшается по сравнению с путем, если бы судно двигалось прямолинейно.



Рис. 2.5. Траектория торможения судна до остановки

Оценка тормозного расстояния  $S_T$  в длинах судна по направлению первоначального пути может быть получена по приближенной формуле:

$$S_T = A \cdot \ln(1 + B) + C. \quad (2.4)$$

Здесь  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – коэффициенты. **Коэффициент  $A$**  зависит от удельного буксировочного сопротивления судна. Он определяется типом судна и формой его корпуса. Значения  $A$  приведены в табл. 2.1.

**Коэффициент  $B$**  является функцией буксировочного сопротивления судна перед маневром, упора винта в швартовом режиме и мощности двигателя  $N_{3X}$  на ЗХ. Для дизельных ГД  $N_{3X}$  обычно составляет 85%, а для паровых турбин 40% от мощности на ПХ. Коэффициент  $B$  уменьшается с ростом  $N_{3X}$ , а, следовательно, и с увеличением тяги на ЗХ. Типичные его значения даны в табл. 2.2.



Таблица 2.1. – Значения коэффициента  $A$

Тип судна	$A$
Грузовые суда	5-8
Пассажиры и автомобильные паромы	8-9
Газовозы	10-11
Танкера	12-13
VLCC	14-16

Таблица 2.2. – Значения коэффициента  $B$

Тип ГД	% $N_{3X}$ от $N_{ПХ}$	$B$	$L_n (1+B)$
Дизель	85%	0,6-1,0	0,5-0,7
Паровая турбина	40%	1,0-1,5	0,7-0,9

**Коэффициент  $C$**  зависит от времени  $T_{P3X}$  от начала реверсирования двигателя до развития полного упора 3X и начальной скорости судна  $V_0$ . Значение  $C$  составляет половину дистанции следования в длинах судна за время  $T_{P3X}$ . Оно тем больше, чем меньше судно. Типичные значения  $C$  даны в табл. 2.3.

Таблица 2.3. – Значения коэффициента  $C$

$L, м$	$T_{P3X}, с$	$V_0, узлы$	$C$
100	60	15	2,3
200	60	15	1,1
300	60	15	0,8

Если время достижения полного упора на 3X больше 60 с. или скорость судна больше 15 узл. (как предположено в табл. 2.3), значение  $C$  увеличивается пропорционально.

## 2.5. Особенности управляемости двухвинтовых судов

В составе флота имеются суда с несколькими гребными винтами. Преобладающее большинство из них – двухвинтовые. На этих судах ГДУ включает два главных двигателя (ГД), каждый из которых работает на свой винт.

**Расположение винтов.** Двигатели двухвинтовых судов располагаются на одинаковом расстоянии от ДП и, как правило, имеют разное направление вращения. При работе ГД в одинаковых режимах хода один гребной винт вращается вправо, а второй – влево. Различают суда с винтами «наружного» и «внутреннего» вращения. Для первых сторона вращения винтов соответствует борту, на котором

они расположены (рис. 2.6,*а*), а для вторых – на левом борту помещается винт правого вращения, а на правом борту – винт левого вращения (рис. 2.6,*б*). При работе в одном режиме винтов разного направления вращения влияние вызываемых ими боковых сил взаимно компенсируется, что приводит к одинаковым размерам циркуляций вправо и влево.

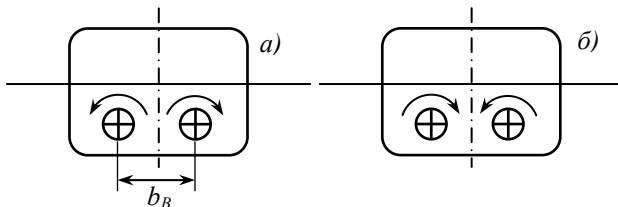


Рис. 2.6. Суда с наружным и внутренним вращением винтов

Двухвинтовые суда могут иметь два руля в струе каждого движителя, либо один руль – в ДП судна. У первых судов поворотливость лучше, чем у вторых. Оси гребных валов судов с двумя винтами либо параллельны ДП (рис. 2.7,*а*), либо наклонены к ней под малым углом  $\gamma$  и являются расходящимися (рис. 2.7,*б*) или сходящимися (рис. 2.7,*в*).

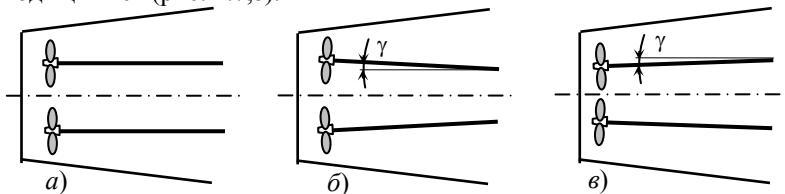


Рис. 2.7. Схемы расположения гребных валов

**Управляемость по курсу, обеспечиваемая винтами.** С помощью двух винтов обеспечивается управляемость судна по скорости и по курсу. Вызывающий поворот судна момент возникает при работе гребных винтов в разных режимах хода. Таким образом, в общем случае двумя винтами создается тяга  $P_U$  для хода и момент  $M_B$  для поворота судна. **Тяга  $P_U$**  определяется суммой (разностью) тяг  $P_{U1}$  и  $P_{U2}$  винтов:  $P_U = P_{U1} + P_{U2}$ . **Момент поворота  $M_B$**  зависит от величины и направления тяг винтов, расстояния  $b_B$  между центрами дисков винтов, угла  $\gamma$  между осями гребных валов и ДП

судна, формы кормы, «наружного» или «внутреннего» направления вращения винтов. Для упрощения будем считать, что  $\gamma = 0$ . Разворачивающий судно **момент  $M_U$ , определяемый тягами винтов**, равен:

$$M_U = M_{U1} + M_{U2} = P_{U1} \frac{b_B}{2} - P_{U2} \frac{b_B}{2}. \quad (2.5)$$

Здесь  $M_{U1}$ ,  $M_{U2}$  – моменты, создаваемые тягой правого и левого винтов без учета боковых сил от их работы. В действительности при работе винтов в разных режимах на корпусе развиваются неодинаковые боковые силы  $P_{B1}$ ,  $P_{B2}$ . Боковое воздействие  $P_B$  на судно от работы одного винта включает три составляющие: боковую силу изолированного винта ( $P_{БИ}$ ), силу взаимодействия винта и руля ( $P_{БР}$ ), силу взаимодействия винта и корпуса ( $P_{БК}$ ).

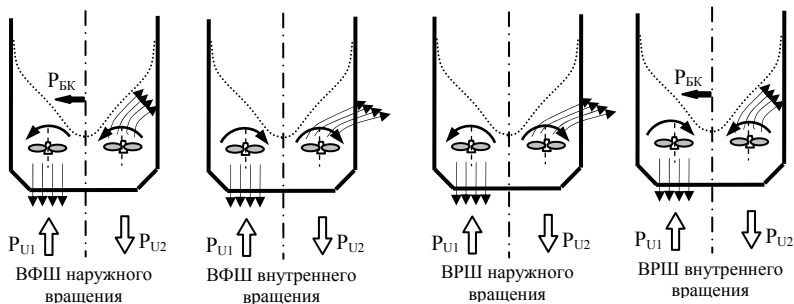


Рис. 2.8. Условие появления боковой силы  $P_{БК}$  взаимодействия винта и корпуса

Характеристика названных составляющих приведена в параграфе 4.6. Здесь только отметим, что первая компонента возникает на гребном винте, вторая развивается на руле при работе винта на ПХ. Сила  $P_{БК}$  появляется на корпусе при работе винта на ЗХ, когда струя воды от него набрасывается на верхнюю часть подводного борта кормы. Она у некоторых судов может достигать  $0,3 \cdot P_U$  (отношение  $P_B / P_U$  существенно зависит от формы кормы). Условия появления силы  $P_{БК}$  для судов с двумя ВФШ или с двумя ВРШ при наружном и внутреннем их вращении представлены на рис. 2.8.

**Момент**  $M_{\text{БК,ЗХ}}$  от **боковой силы**  $P_{\text{БК}}$  равен  $M_{\text{БК,ЗХ}} = P_{\text{БК}} \cdot l_{\text{БК}}$ , где  $l_{\text{БК}}$  – плечо  $P_{\text{БК}}$ . Так как  $l_{\text{БК}}$  во много раз превышает  $0,5 \cdot b_B$ , то создаваемый силой  $P_{\text{БК}}$  момент может в несколько раз превышать момент от тяги винта  $M_U$ . В результате, когда ВФШ/ВРШ наружного/внутреннего направления вращения, при работе винта на ЗХ определять поворот судна может момент боковой силы взаимодействия винта и корпуса.

Момент  $M_{\text{Б,ПХ}}$  боковой силы винта на ПХ значительно меньше  $M_{\text{Б,ЗХ}}$ . Даже в швартовном режиме величина  $M_{\text{Б,ЗХ}}$  в среднем в  $2,5 \div 3,0$  раза больше  $M_{\text{Б,ПХ}}$ . С возрастанием скорости хода это различие увеличивается, так как в этом случае момент  $M_{\text{Б,ПХ}}$  падает, а момент  $M_{\text{Б,ЗХ}}$  остается практически без изменения.

**Поворотливость судов с двумя винтами.** Сравнение у двухвинтовых судов поворотливости, обеспечиваемой в отдельности винтами и рулями, показывает, что *на маневренных скоростях переднего хода* первая существенно уступает второй, причем с ростом скорости хода эффективность рулей растет, а влияние на курс момента от работы винтов падает. *На предельно малых скоростях* двумя винтами обеспечивается управление курсом. Руль здесь теряет свою роль как орган управления.

Применение на маневренных скоростях винтов совместно с рулями улучшает маневренность судна. Для выполнения поворота с помощью рулей и винтов внешней по отношению направлению поворота машине дают ход вперед, а внутренней – ход назад. Изменяя частоту вращения ВФШ, либо угол лопастей ВРШ, можно разворачивать судно с продвижением вперед, назад и на месте. Так как у ВФШ меньшая эффективность упора при работе назад, для разворота судна на месте машине, работающей вперед, задают режим хода на ступень меньше машины, работающей на ЗХ. Двухвинтовое судно при выходе из строя одной машины или при повреждении одного винта может двигаться и управляться с помощью второго винта и руля. При совместной работе двух винтов, рулей и носовых подруливающих устройств на предельно малых скоростях можно обеспечить поступательное перемещение корпуса лагом и под определенным углом к ДП, а также выполнять развороты корпуса относительно носа, кормы, миделя.

## 2.6. Оценка управляемости и ее критерии

**Оценка управляемости судна** состоит в получении статических и переходных характеристик, отражающих реакцию судна на стандартные входные сигналы. Стандартные переходные характеристики судна могут определяться по результатам натуральных испытаний либо находиться расчетными методами, когда они обеспечивают требуемую точность. Специальные маневры, проводимые для определения маневренных качеств судна, называются *стандартными*, а маневры, выполняемые в повседневной практике судовождения, – *эксплуатационными*. Перечень стандартных маневров для оценивания управляемости судов определен ИМО. В этот перечень входят маневры циркуляция, зигзаг, торможение, прямая и обратная спираль, тесты начальной поворотливости и устойчивости на курсе.

**Циркуляция** представляет процесс реакции судна на ступенчатую перекладку руля. Для характеристики поворотливости (максимальной) она выполняется вправо и влево с предельной кладкой руля на тестовой скорости  $V_T = V_P \cdot \delta$ , где  $V_P$  – расчетная скорость судна;  $\delta$  – коэффициент общей полноты. Поворот при циркуляции производится на  $360^\circ$ . Если необходимо оценивать влияние на движение внешних условий, то угол поворота увеличивают до  $540^\circ$  или  $720^\circ$ .

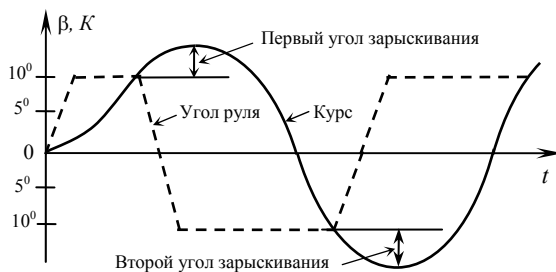


Рис. 2.9. Зигзаг  $10^\circ/10^\circ$

**Зигзаг** – это тестовое испытание для получения характеристик управляемости судна в практически важном диапазоне частот. Его результаты позволяют судить о начальной поворотливости, об одерживаемости судна, о запаздывании его реакции по отношению к управляющему сигналу, об эффективности рулевого устройства. Стандартные зигзаг-тесты:  $10^\circ/10^\circ$  (рис. 2.9) и  $20^\circ/20^\circ$ , где в числителе

– угол руля  $\beta_Z$  для отворотов судна, а в знаменателе – отклонение курса от начального, при достижении которого руль переключается на угол  $\beta_Z$  противоположного борта.

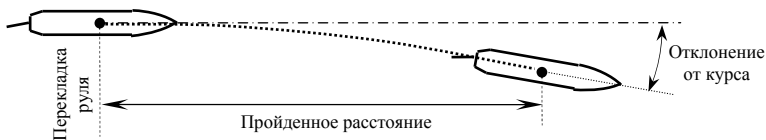


Рис. 2.10. Тест начальной поворотливости

**Тест начальной поворотливости** служит для оценки способности судна быстро изменять направление движения в ответ на малую кладку руля. Эта способность характеризуется расстоянием вдоль линии первоначального курса (рис. 2.10), по прохождении которого после кладки руля на  $10^0$  судно изменит свой курс на  $10^0$ . Чем меньше это расстояние, тем начальная поворотливость лучше.

**Торможение** (крэш-стоп) – это активное торможение, которое выполняется со скорости  $V_T = V_p \cdot \delta$  при максимальной мощности работы машины на ЗХ (см. рис. 2.5).

**Тест устойчивости на курсе** представляет собой маневр выхода из циркуляции с рулем в ДП. Он выполняется следующим образом. Вначале судно вводится в циркуляцию с определенной кладкой руля. Когда скорость поворота станет постоянной, руль приводится в ДП. Если судно устойчиво на курсе, то по истечению определенного времени оно придет к прямолинейному движению. Неустойчивое судно снизит скорость вращения только до определенного, присущего ему значения.

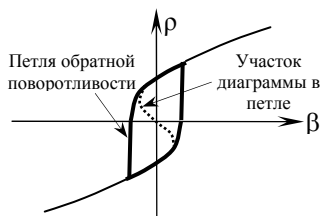


Рис. 2.11. Петля обратной поворотливости

**Маневр «прямая спираль»** (спираль Дидонне) служит основой для построения важной статической характеристики судна – диаграммы поворотливости. Обычно он используется для определения петли обратной поворотливости (рис. 2.11) у неустойчивых на курсе судов. Маневр выполняют следующим образом. При движении судна

постоянной скоростью на прямом курсе руль переключают на  $20^0$  правого борта и удерживают его в таком положении до момента достижения постоянства угловой скорости. Она должна оставаться

неизменной приблизительно одну минуту. После этого угол руля уменьшают на  $5^0$ , и оставляют его неизменным пока угловая скорость вновь не станет постоянной. В указанной последовательности продолжают испытания до тех пор, пока руль не будет переложен с  $20^0$  правого борта на  $20^0$  левого борта. В диапазоне углов руля  $\pm 5^0$  шаг перекладки уменьшают до  $1^0$ .

Маневр «прямая спираль» занимает много времени, особенно у больших и тихоходных судов. Кроме того, он очень чувствителен к погодным условиям. Поэтому вместо него иногда выполняется упрощенная спираль.

**Маневр «упрощенная спираль»** состоит из трех этапов. На первом руль перекачивается на борт и по достижению установившегося вращения корпуса измеряется значение угловой скорости. На втором этапе руль устанавливается в ДП. Если угловая скорость приходит по истечению определенного времени к нулю, то судно устойчиво на курсе и третий этап не выполняется. Если же судно при нулевом положении руля приходит к вращению с установившейся угловой скоростью, то производится ее измерение и переход к третьему этапу. На третьем этапе руль переводится в противоположную начальной максимальной кладке руля сторону и устанавливается в положении, равном половине допускаемой ширины петли обратной поворотливости. Допускаемая ширина этой петли принимается  $0^0$  при отношении  $L/V < 9c$ ;  $[-3 + (L/V)/3]^0$  для  $9 < L/V < 45c$  и  $12^0$  для  $L/V > 45c$ . Если судно в этом случае не изменяет первоначального направления вращения, то его неустойчивость превышает допустимую.

**Маневр «обратная спираль»** (маневр Беха) предназначен для получения участка диаграммы в зоне обратной поворотливости неустойчивых судов (см. рис. 2.11). С этой целью на движущемся судне с помощью руля поддерживается малое значение угловой скорости поворота судна и регистрируется необходимое для ее стабилизации среднее положение руля. Выполнив эту процедуру для нескольких малых значений угловой скорости, по ним и соответствующим им средним положениям руля определяется участок диаграммы в петле обратной поворотливости. Для осуществления маневра *обратная спираль* требуются высокоточные указатели скорости поворота и положения руля. Точность может быть повышена при непрерывной записи значений скорости поворота и угла руля. Следует отметить, что этот маневр можно выполнить с помощью

конвенционного АР, используя в режиме «Автомат» функцию поворота с заданной угловой скоростью.

**Маневр «очень малый зигзаг»** (VSZZ – very small zig-zag) – это зигзаг  $0^0/5^0$ , который в основном предназначен для определения степени неустойчивости на прямом курсе неустойчивого судна. Этот маневр включает большее число циклов, чем обычный зигзаг. В VSZZ нужно рассматривать порядка 20 перерегулирований, в то время как в обычном зигзаге – два-три. Амплитуда отклонений от курса в VSZZ, как и в обычном зигзаге, является функцией  $L/V$ . По ней судят о степени неустойчивости судна. Для выполнения VSZZ может использоваться конвенционный АР при нулевом усилении сигнала производной курса (настройка «Counter Rudder»), максимальном коэффициенте пропорционального звена (настройка «Rudder») и ограничении переключков руля значением  $5^0$  («Rudder limit»).

**Условия выполнения маневров.** Стандартные испытания на маневренность проводятся с использованием только главных средств управления. Чтобы иметь возможность сравнивать управляемость судов, испытания проводятся при **стандартных условиях**:

- глубокая нестесненная акватория (глубина больше 4-х осадков);
- спокойная обстановка (ветер до 5-ти баллов по шкале Бофорта, состояние моря не более 4-х баллов, течение – отсутствует или постоянное);
- полная загрузка на ровный киль (осадка по летнюю марку);
- постоянная, в пределах оговоренной, скорость.

Допускается отклонение до 5% от полной загрузки. Метацентрическая высота должна соответствовать рациональной для судна при полной загрузке в условиях эксплуатации. Положение топливной рейки ГД при маневрах курсом должно быть постоянным, т.е. автоматический регулятор оборотов должен быть отключен.

При выполнении маневров через интервал времени, не превышающий 20 с, должны измеряться и регистрироваться: *положение, курс, скорость судна, угол руля и скорость поворота судна, частота вращения винта и скорость ветра.*

В последние годы в практику испытаний управляемости судов введено большое число *новых стандартных маневров*: выход судна из циркуляции при неработающих движителях, поворот с места путем переключки руля одновременно с пуском двигателя и др. [9]. Использование этих маневров позволяет получить дополнительные сведения об управляемости судна.

**Критериями управляемости** называются количественные показатели, по которым судят об удовлетворительности маневренных



качеств судов. Они позволяют сравнивать маневренные возможности различных судов, обеспечивать требуемую управляемость при постройке и намечать пути ее улучшения. Критерии управляемости формируются на основании специальных исследований, опыта кораблестроения и судовождения. Проявление качеств управляемости зависит как от характеристик судна, эффективности его движительно-рулевого комплекса, так и эксплуатационных условий, в которых совершается движение судна. Поэтому среди критериев управляемости выделяются *стандартные* (основные) и *эксплуатационные*. **Стандартные критерии** соответствуют оговоренным выше *стандартным условиям* для проведения тестовых испытаний маневренности. **Эксплуатационные критерии** используются для проверки управляемости при определенных нагрузке, скорости и гидрометеорологических условиях.

Разработка официальных стандартов управляемости началась сравнительно недавно. Этому способствовало глубокое осознание обстоятельства, что хорошая управляемость судов – это важный вклад в обеспечение безопасности судовождения и в повышение степени защиты окружающей среды. Из международных требований к управляемости следует назвать «Стандарты маневренных качеств судов», установленные Резолюцией ИМО MSC.137(76) от 05.12.2002.

**Стандарты маневренных качеств** были выработаны ИМО для судов с традиционными движительно-рулевыми комплексами. Они должны применяться к судам, оборудованным любыми типами рулевых устройств и двигательных установок длиной 100 м и более, а также к танкерам-химовозам и газовозам независимо от их длины. Данные стандарты не распространяются на высокоскоростные суда. Скорость судна на испытаниях ( $V$ ), используемая в стандартах, есть скорость, равная, по меньшей мере, 90% скорости судна при 85% максимальной мощности, развиваемой ГДУ.

Согласно требованиям Резолюции ИМО MSC.137(76) маневренные качества судна считаются удовлетворительными, если они соответствуют следующим *нормам*.

**Поворотливость (максимальная)** считается приемлемой, если на циркуляции с предельной кладкой руля выдвиг судна не превышает  $4,5L$ , а тактический диаметр –  $5L$ , где  $L$  – длина судна между перпендикулярами. **Начальная поворотливость** удовлетворительна, если при угле кладки руля на  $10^0$  вправо/влево за время изменения курса на  $10^0$  судно проходит дистанцию, не большую  $2,5L$ .

**Контроль рыскливости и устойчивости на курсе** нормальны, когда:

- первый угол зарыскивания зигзага  $10^0/10^0$  (см. рис. 2.9) не превышает:  $10^0$  при  $L/V < 10$ ,  $20^0$  при  $L/V \geq 30$ ,  $(5 + 0,5 \cdot L/V)^0$  при  $10 \leq L/V < 30$ , где  $L$  выражено в м,  $V$  – в м/с,  $L/V$  – в с;
- второй угол зарыскивания зигзага  $10^0/10^0$  не больше:  $25^0$  при  $L/V < 10$ ,  $40^0$  при  $L/V \geq 30$ ,  $(17,5 + 0,75 \cdot L/V)^0$  при  $10 \leq L/V < 30$ ;
- первый угол зарыскивания зигзага  $20^0/20^0$  не превышает  $25^0$ .  
При активном торможении с помощью работы машины на полный ход назад **тормозной путь** не должен превышать:  $15L$  при  $\sigma < 1$ ,  $(5 + 10\sigma)L$  при  $1 \leq \sigma < 20$ . В этих выражениях

$$\sigma = \frac{D}{N_{\text{МД}}} V_{\text{МД}} F_R, \quad (2.6)$$

где  $D$  – водоизмещение судна в т;  $N_{\text{МД}}$  – максимальная длительная мощность ГДУ в л.с.;  $V_{\text{МД}}$  – скорость судна в м/с при  $N_{\text{МД}}$ ;  $F_R$  – число Фруда при скорости на испытаниях.

Если при стандартных испытаниях будут замечены признаки, указывающие на неустойчивость судна на курсе, то могут быть выполнены маневры «прямая спираль» или «выход из циркуляции» для определения величины зоны обратной поворотливости.

**Другие критерии управляемости.** На практике управляемость морских судов оценивают и по другим критериям [7, 21].

**Устойчивость** судна на курсе, согласно исследованию Е.Б.Юдина, является удовлетворительной, если отношение  $\bar{R}_{\text{Ц}} / \bar{R}_{\text{Ц}0} \leq 0,2$ , где  $\bar{R}_{\text{Ц}}$ ,  $\bar{R}_{\text{Ц}0}$  радиусы установившейся циркуляции при максимальной и нулевой кладке руля. Предварительное суждение об устойчивости на курсе может быть сделано по критерию Г.В.Соболева [24]: если  $\delta \cdot B / T < 1,7$ , то судно неустойчиво на курсе. **Устойчивость системы** «УУ-судно» на курсе считается удовлетворительной, если для стабилизации курса в тихую погоду требуется порядка  $1,8 \div 2,0$  переключений руля за время, равное  $L/V$  секундам. **Выход из циркуляции** всегда возможен, когда отношение радиусов установившейся циркуляции при кладке  $10^0$  и максимальной не меньше двух.

**Поворотливость** среднетоннажных судов считается достаточной, когда отношение радиуса установившейся циркуляции при

предельном угле руля к  $L$  меньше двух. *Начальная поворотливость* удовлетворительна, если интервал времени от момента начала перекладки руля до момента начала поворота судна меньше интервала времени, необходимого для перекладки руля из нулевого положения на максимальный угол. Для обеспечения требуемой поворотливости *скорость перекладки руля* должна быть достаточно большой. Согласно международным требованиям время перекладки руля от  $35^0$  одного борта до  $30^0$  другого для всех судов должно быть не больше 28 с.

Из эксплуатационных критериев приведем относящийся к *управляемости судна при ветре*. Он определяет, что скорость ветра  $v_a$ , при которой морское судно способно идти полным ходом постоянным курсом при перекладке руля  $\beta \leq 20^0$  с углом дрейфа  $\alpha \leq 20^0$ , должна быть не менее 25 м/с. При движении в канале малым ходом ( $V \approx 5$  уз) морское судно должно обладать способностью идти прямолинейно при ветре  $v_a = 12$  м/с.

## 2.7. Понятие о влиянии различных факторов на управляемость судна

На управляемость судна влияют многочисленные факторы, что усложняет управление им.

**Загрузка судна.** При загрузке меняются масса и подводная часть корпуса судна, что сказывается на его управляемости. В балласте и в грузу суда в общем случае обладают разной устойчивостью на курсе. Обычно при уменьшении осадки устойчивость судна на курсе снижается. С небольшим дифферентом на корму судно стабильно на курсе, а при дифференте на нос у него появляется рыскливость. Большой дифферент на корму приводит к ощутимому снижению скорости. При наличии крена судно «уходит» в сторону возвышенного борта, и поворотливость его вправо и влево становится неодинаковой.

**Скорость судна.** Обеспечиваемая рулем управляемость судна при уменьшении скорости ухудшается, так как боковая сила руля, пропорциональная квадрату скорости набегающего на него потока, становится меньше. Силы реакции водной среды на движение судна также пропорциональны квадрату скорости судна. Поэтому параметры поворотливости судна с изменением скорости меняются мало. Элементы установившихся циркуляций на разных режимах хода практически не отличаются. Больше того, на малых скоростях несколько ускоряется реакция судна на перекладки руля. Ухудшение

управляемости судна с уменьшением скорости хода выражается в снижении способности противодействия возмущениям: ветру, волнению, переменному течению, взаимодействию со встречными или обгоняющими судами. Например, при боковом ветре на малом ходу прямолинейное движение судна обеспечивается смещением среднего положения руля. При некоторой малой скорости в условиях сильного ветра, когда необходимое смещения руля превышает его предельное значение, управление судном с помощью руля вообще становится невозможным. Причиной потери управляемости является малая боковая сила руля, как пассивного средства. Эта сила оказывается недостаточной, чтобы противодействовать возмущениям среды, обусловленным ветром, волнением, течением, мелководьем.

**Асимметрия обводов корпуса и упора винта.** Любое судно обладает некоторой асимметрией обводов корпуса и упора винта, что обуславливает уклонение при движении в определенную сторону. Одновинтовое судно с винтом правого вращения и пером руля, установленным за диском винта, при движении передним ходом стремится уклониться вправо по ходу. Для погашения момента от боковой силы гребного винта на установившемся переднем ходу на одновинтовых судах в среднем необходимо сместить положение руля на один градус.

**Обрастание подводной части корпуса** морскими организмами способствует снижению скорости хода и ухудшению маневренности. Увеличение буксировочного сопротивления судна из-за разрушения краски, коррозии и обрастания в тропических морях может достигать 0.5% в сутки. Величина обрастания зависит от района и сезона плавания, температуры воды, длительности стоянки, биологических особенностей различных акваторий, времени после докования, типа и размеров судна и ряда других причин. С ростом размеров судов потеря скорости от обрастания увеличивается.

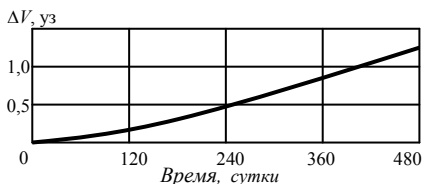


Рис. 2.12. Потеря хода от обрастания

Обрастание является основной причиной снижения скорости судов, увеличения нагрузки на их двигатели и роста расхода топлива. Поэтому заметное обрастание корпуса считается недопустимым. Для его устранения корпус очищается при доковании судна или на плаву. При докованиях после очистки поверхность корпуса покрывается противообрастающей краской. Ввиду сложной

природы, прогноз обрастания и его влияния на движение судна затруднен. Для представления о характере роста влияния обрастания на рис. 2.12 для танкера дедвейтом 75 тыс.т. приведен график потерь скорости из-за обрастания в зависимости от времени после докования.

**Мелководье.** При рассмотрении вопросов управляемости судов выделяют два вида акваторий, в которых близость грунта оказывает влияние на движение судна: мелководье и ограниченный фарватер (канал). *Мелководьем* называется акватория, в которой на движение судна влияет только глубина под килем. Под *ограниченным фарватером* понимается водный путь с твердыми границами, расположенными близко к судовому ходу и оказывающими влияние на движение судна. Мелководье определяется отношением глубины к осадке судна:  $H/T \leq 4$ . Критерием канала является отношение  $S_K/S_C \leq 16$ , где  $S_K$  и  $S_C$  - соответственно площади поперечного сечения канала и судна на миделе.

Важной характеристикой рассматриваемых ограниченных акваторий является *критическая скорость*. Для мелкой воды ее значение определяется по формуле

$$V_{KP} = \sqrt{gH} \approx 3,13\sqrt{H} \text{ м/с} \approx 6,1\sqrt{H} \text{ уз.} \quad (2.7)$$

Для канала значение критической скорости меньше

$$V_{KP} = \sqrt{gr} \approx 3,13\sqrt{r} \text{ м/с} \approx 6,1\sqrt{r} \text{ уз.} \quad (2.8)$$

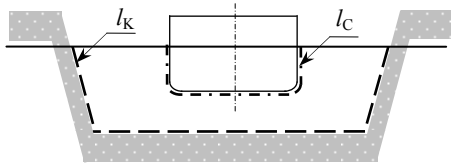


Рис. 2.13. Судно в канале

В этом выражении  $r = S_K / (l_K + l_C)$ , где  $l_K$  и  $l_C$  - соответственно длина смоченной границы сечения канала и судна (рис. 2.13). Нормальное (не скоростное) судно не может двигаться со

скоростью, превышающей  $(0,75 \div 0,80)V_{KP}$ .

Мелководье существенно влияет на поведение судна:

- буксировочное сопротивление судна возрастает и, как следствие, падает его скорость;
- осадка судна увеличивается (проседание), дифферент изменяется;
- маневренные качества изменяются.

Явления, сопровождающие движение судна по каналу, во многих отношениях аналогичны процессам движения на мелководье, однако они еще сложнее и имеют большую интенсивность [29, 31].

Эффект влияния ограниченности акватории на буксировочное сопротивление характеризуется графиками на рис. 2.14 [25]. С ростом сопротивления перегружается двигатель, возрастает расход топлива. При приближении скорости судна к критической интенсивность негативных явлений растет. Попытки здесь увеличить скорость за счет резерва мощности ГД положительного эффекта не дают и приводят лишь к избыточному расходу топлива, увеличению проседания и ухудшению устойчивости на курсе [29].

**Падение скорости на мелководье** при установившемся по скорости движении одним курсом зависит от следующих факторов:

- отношения глубины к осадке ( $H/T$ ),
- отношения скорости хода к критической скорости ( $V/V_{кр}$ ),
- коэффициента полноты водоизмещения ( $\delta$ ),
- отношения ширины судна к осадке ( $B/T$ ).

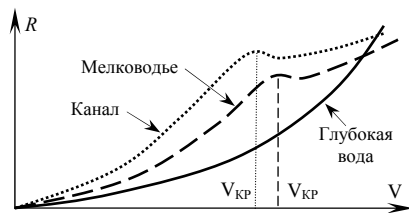


Рис. 2.14. Влияние ограниченных вод на буксировочное сопротивление

Первые два фактора являются основными. В зависимости от них коэффициент  $\mu_V$ , связывающий скорость судна на мелководье  $V$  со скоростью судна на глубокой воде  $V_\infty$  ( $V = \mu_V V_\infty$ ), при плавании в зоне докритических скоростей может быть рассчитан по

эмпирической формуле С.И.Демина [11]:

$$\mu_V \approx 1 - 0.044 \frac{H}{T} + 0.34 \frac{V_\infty}{V_{кр}}. \quad (2.9)$$

**Просадка судна** на мелководье создает угрозу касания грунта. Проседание носа  $\Delta T_H$  и кормы  $\Delta T_K$  обычно неодинаковы, что приводит к изменению дифферента судна (рис. 2.15). У судов с полными обводами и малым отношением  $L/B$  (например, у крупнотоннажных танкеров) больше проседает нос, а у судов с острыми образованиями – корма. С достаточной для судовождения точностью  $\Delta T_H$  и  $\Delta T_K$  определяются по методу Ремиша [17]. Величину проседания на миделе можно оценить по простой формуле Барраса. Согласно ей  $\Delta T_{СР}$  в метрах для мелководья и канала рассчитываются соответственно по формулам:

$$\Delta T_{CP} \approx 0,01 \cdot \delta \cdot V^2 \text{ при } H/T = 1,1 \div 1,2 ; \quad (2.10)$$

$$\Delta T_{CP} \approx 0,02 \cdot \delta \cdot V^2 \text{ при } S_K / S_C = 3 \div 16 ; \quad (2.11)$$

где  $V$  в узлах.

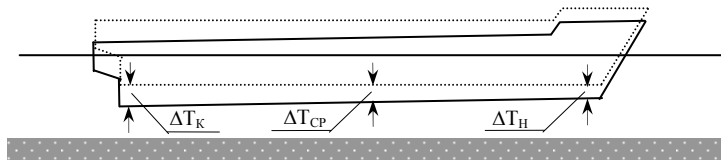


Рис. 2.15. Просадка судна на мелководье

Следует учитывать, что возникающий при повороте угол крена на малых глубинах возрастает из-за появления сил присасывания (рис. 2.16). Это приводит к дополнительному  $\Delta T_D^T$  увеличению осадки судна и в некоторых случаях к угрозе касания грунта.

При следовании на мелководье с неровным рельефом дна вода, вытесняемая носовой оконечностью судна, встречает препятствие со стороны повышенного участка. В результате

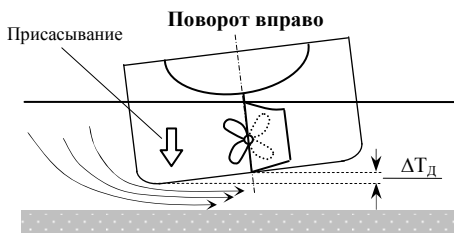


Рис. 2.16. Присасывание на повороте

возникает явление «отталкивания» носовой части судна от отмели. В районе кормы развивается сила притягивания судна к более мелкому участку. Это обусловлено уменьшением поступления потока воды со стороны более мелкого участка к гребному винту и падением давления перед винтом с этого борта [29]. При движении в канале вблизи берегового откоса возникают силы притяжения кормы и отталкивания носа от стенки канала.

**Маневренные качества** судна на мелководье существенно изменяются: поворотливость и устойчивость на курсе снижаются, способность торможения ухудшается мало. Исследования А.Д.Гофмана показали, что *увеличение радиуса установившейся циркуляции* на мелководье носит закономерный характер и зависит от отношения  $T/H$  [9]

$$R_{Ц} = \frac{R_{\infty}}{1 + 0,1 \cdot T/H - 0,71 \cdot (T/H)^2}, \quad (2.12)$$

где  $R_\infty$  – радиус циркуляции на глубокой воде.

В условиях мелководья на циркуляции угол дрейфа меньше, чем на глубокой воде. Значения отношения  $\mu_\alpha = (\alpha/\rho):(\alpha_\infty/\rho_\infty)$  угла дрейфа  $\alpha$  к относительной кривизне траектории  $\rho = L/\bar{R}_\Pi$  для различных значений  $H/T$  даны в табл. 2.4. На глубокой воде согласно приближенной формуле Мунка  $\alpha_\infty/\rho_\infty \approx 0,4 \div 0,45$ .

Таблица 2.4 – Значения  $\mu_\alpha$

$H/T$	5.0	3.0	2.0	1.5
$\mu_\alpha$	1.0	0.87	0.60	0.40

Таблица 2.5 – Значения  $\mu_\Delta$

$H/T$	5.0	3.0	2.0	1.5
$\mu_\Delta$	1.0	0.80	0.50	0.30

Уменьшение угла дрейфа на мелководье приводит к снижению относительной величины падения скорости на циркуляции, а также к тому, что с уменьшением глубины выдвиг увеличивается в меньшей степени, чем тактический диаметр циркуляции (рис 2.17). Приближенные значения  $\mu_\Delta = (\Delta V/V_0):(\Delta V_\infty/V_{0\infty})$  ( $V_0$  – скорость перед циркуляцией) для различных значений  $H/T$  приведены в табл. 2.5.

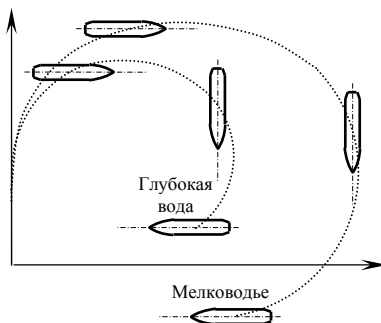


Рис. 2.17. Изменение циркуляции на мелководье

**Течения.** При выполнении рейсов судоводителям приходится сталкиваться с различными видами течений: ветровыми, приливными, речными и другими. Морские и океанские течения характеризуются тем, что в них протяженность слоев воды с одинаковой поступательной скоростью движения значительно больше геометрических размеров судов. Эти течения вызывают только плоскопараллельный снос судна и не влияют на вращательное движение судна и его управляемость. Скорость океанических поверхностных течений редко превышает 1÷2 узла, хотя скорость Гольфстрима на поверхности может достигать 5 узлов.



При плавании против течения в узкости судно управляется лучше, чем по течению. Узкости, внутренние водные пути, прежде всего реки, характеризуются различными течениями. Протяженность слоев воды с одинаковой поступательной скоростью перемещения таких течений часто меньше геометрических размеров судов.

Течения на реках разделяются на правильные и неправильные. *Правильные течения* по направлению совпадают с направлением берегов реки. На изгибах рек они имеют криволинейный характер и кроме поступательного вызывают и вращательное движение судна. Криволинейное течение оказывает существенное влияние на управляемость судна и может вызвать потерю его управляемости. *Неправильные течения* обусловлены обычно местными причинами. По направлению они не совпадают с общим ходом воды и могут быть вращательными и вращательно-поступательными. Неправильные течения в общем случае вызывают как смещение судна, так и его разворот. Они могут служить причиной аварийных ситуаций.

Силу действия течения на судно приходится учитывать при анализе вопросов стоянки на якорь, швартовки, например, при рассмотрении движения лагом под действием носовых и кормовых подруливающих устройств на малой глубине и в ряде других ситуаций. Для практических целей при расчете силы  $F_T$  воздействия течения на судно используют формулу:

$$F_T \approx f_H S_{\perp} V_T^2 \quad (2.13)$$

где  $V_T$  – скорость течения в узлах;  $S_{\perp}$  – проекция подводной части корпуса на плоскость, перпендикулярную вектору скорости течения;  $f_H$  – зависящий от глубины судна под килем коэффициент (рис. 2.18). Когда течение направлено вдоль ДП, то  $S_{\perp} = B \cdot T$ , а если поперек ДП:  $S_{\perp} = L \cdot T$ .

Следует заметить, что при глубине под килем  $0,2T$  сила действия течения на судно в три раза больше, чем при  $3T$ .

**Ветер.** Вопросы управления судами при плавании в различных акваториях, особенно в каналах, фарватерах, узкостях, при

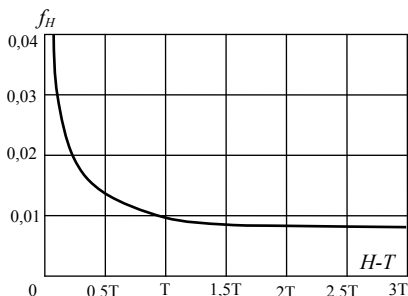


Рис. 2.18. Диаграмма для определения  $f_H$

швартовках, не могут быть рассмотрены без учета влияния ветра. Действующая на судно сила ветра зависит от его скорости и направления, курса, скорости, площади и конфигурации надстроек судна. Учет действия ветра особенно актуален для судов, имеющих большую парусность: автомобилевозов, контейнеровозов, судов типа река-море. Ветер представляет собой воздушный турбулентный поток, скорость которого имеет пульсационный характер. В скорости ветра выделяют среднее значение и переменное отклонение от него. В судовождении обычно учитывают только среднюю скорость ветра.

Скорость ветра вблизи поверхности моря за счет трения нижнего слоя воздуха о поверхность воды меньше, чем в более высоких слоях. Ветер, направленный под углом к ДП, является причиной дрейфа судна. Обычно точка приложения силы давления ветра отстоит по горизонтали от центра массы судна. В результате на корпусе возникает момент, стремящийся развернуть судно в определенную сторону. Этот момент складывается с моментом силы реакции воды на движение корпуса с углом дрейфа. Поэтому прямолинейное движение судна при ветре обеспечивается с помощью смещения среднего положения пера руля на величину, при которой момент от руля компенсирует суммарный возмущающий момент.

Суда различных типов по-разному реагируют на действие ветра. Одни суда *уваливаются по ветру*, когда руль судна находится в ДП. Для удержания такого судна на одном курсе руль необходимо переключать на определенный угол наветренного борта. Другие суда при неотклоненном руле *приводятся к ветру*, т.е. разворачиваются носом на ветер. Для удержания приводящегося к ветру судна на прямом курсе среднее положение руля смещается на определенный угол подветренного борта. Иногда, особенно при малых скоростях хода, случается так, что даже максимальным смещением руля нельзя обеспечить движение прямым курсом. В этом случае судно теряет управляемость.

**Волнение** является одним из самых распространенных видов воздействий на судно в открытом море. Действие волн отражается на управляемости судна: теряется скорость, возрастает рыскание, ухудшается режим работы гребного винта и руля. Величина рыскания зависит от курсового угла и степени волнения. При движении против волн амплитуда рыскания минимальна. Максимальных значений она достигает на волнении с кормовых курсовых углов  $130 \div 150^{\circ}$ . При неблагоприятных условиях, когда скорости судна и волны близки на попутном волнении, углы рыскания могут достигать  $40^{\circ}$ . При

дифференте на корму углы рыскания на попутном волнении уменьшаются, а на встречном возрастают.

Судоводитель должен знать все виды воздействий волн на судно и учитывать их при управлении судном в шторм, чтобы избежать таких опасных для судна явлений как слеминг, вилинг, брочинг, резонанс качки и другие. Величины гидродинамических сил и моментов на корпусе судна от действия морских волн пропорциональны квадрату высоты волн и зависят от интенсивности килевой, вертикальной и бортовой качки, от скорости судна, от соотношения длин и высот волн с длиной судна, от курсового угла судна к направлению скорости распространения волнения. В общем случае в действии волн на судно можно выделить две составляющие: медленноменяющуюся и периодическую волновую. От первой появляется некоторый снос судна в направлении бега волн и разворачивающий судно момент. При прямолинейном движении судна этот момент парируется определенным смещением среднего положения руля. Волновое рыскание судна происходит с такой частотой, что практически не может быть уменьшено рулем.

## 2.8. Некоторые сведения из теории крыла

При характеристике гидродинамических сил на корпусе судна, руле, лопастях гребного винта и в ряде других ситуаций весьма полезным оказывается общий подход [26], состоящий в рассмотрении этих элементов как представителей одного класса объектов – **крыльев**. Это позволяет использовать при анализе управляемости судна сведения из хорошо разработанной теории крыла.

**Геометрические характеристики крыла.** Крылом называется тело, на котором при движении в газообразной или в жидкой среде развивается подъемная сила, направленная перпендикулярно к вектору скорости движения. Крыло характеризуется (рис. 2.19):

- **площадью**  $S$  и формой проекции в плане;
- **размахом (длиной)**  $d$  – размером крыла в направлении, перпендикулярном скорости его движения или скорости набегающего потока (в зависимости от того, какой элемент перемещается относительно другого);
- **профилем** – поперечным сечением;
- **хордой**  $L$  – отрезком прямой, соединяющим крайние точки профиля (при переменном по размаху крыле вводится понятие средней хорды  $L_{\text{ср}} = S/d$ ).

- *относительным удлинением* –  $\lambda = d / L_{CP} = d^2 / S$ .

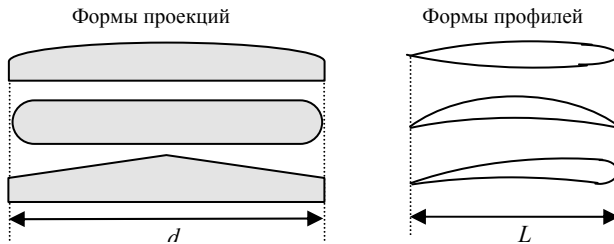


Рис. 2.19. Некоторые формы проекции и профиля крыла

**Крылом малого удлинения** называется крыло, у которого  $\lambda \leq 2$ . К крыльям малого удлинения относятся судовые рули ( $\lambda = 1 \div 2$ ) и корпуса судов ( $\lambda = 0,03 \div 0,20$ ).

**Кинематические параметры крыла.** Элементы движения крыла относительно водной среды называются его *кинематическими параметрами* либо *кинематическими характеристиками*. Одной из стандартных ситуаций, рассматриваемых в теории крыла, является его прямолинейное равномерное поступательное движение в направлении, перпендикулярном его размаху. Такое перемещение крыла характеризуется линейной скоростью  $V$  и *углом атаки*  $\gamma$  – углом между хордой крыла и направлением вектора скорости набегающего потока (рис. 2.20). При расчете гидродинамических сил на корпусе судна подводная его часть рассматривается как крыло, движение которого происходит с  $\gamma$ , равным углу дрейфа судна. Когда анализируются аэродинамические силы, надводная часть корпуса судна представляется как крыло. Углом атаки в этом случае является курсовой угол кажущегося ветра.

**Гидродинамические характеристики крыла.** Величины, характеризующие реактивную силу на крыле и обусловленные ей моменты, называются гидродинамическими характеристиками (ГДХ) крыла. ГДХ определяются геометрическими и кинематическими параметрами крыла, а также вязкостью среды. Под *гидродинамической силой крыла*  $P$  понимается равнодействующая сил давления потока на крыло:

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot k_p \cdot S \cdot V^2. \quad (2.14)$$

В этом выражении  $\rho$  – плотность воды;  $k_p$  – коэффициент силы, зависящий от угла атаки, чисел Рейнольдса и Фруда, числа кавитации

и ряда других величин. Силу  $P$  обычно разделяют на две компоненты (см. рис. 2.20): *силу сопротивления*  $R$ , направленную вдоль вектора движения крыла; и перпендикулярную по отношению к вектору движения – *подъемную силу*  $F$ . У крыльев малого удлинения форма профиля мало влияет на величину этих сил.

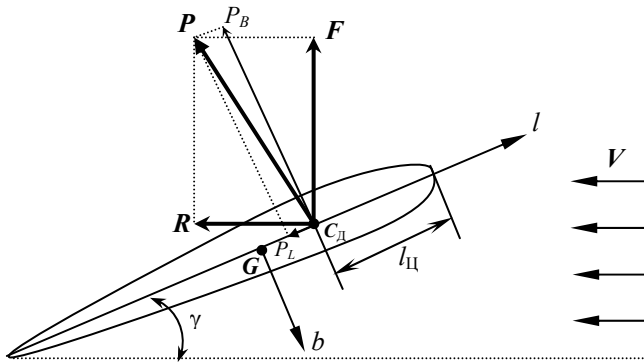


Рис. 2.20. Схема сил на крыле

В ряде случаев силу  $P$  представляют (см. рис. 2.20) продольной  $P_L$  и нормальной (поперечной, боковой)  $P_B$  составляющими в системе координат  $lGb$ , ориентированной по хорде крыла. Начало этой системы помещено в центр массы  $G$  крыла, ось  $Gl$  (продольная ось) направлена вдоль хорды к передней кромке крыла, а ось  $Gb$  (боковая, поперечная ось) перпендикулярна  $Gl$  и направлена вправо от направления  $Gl$ .

Точка  $C_D$  приложения равнодействующей гидродинамической силы называется **центром давления крыла**. Его положение характеризуется расстоянием  $l_{Ц}$  от передней кромки крыла (см. рис. 2.20). Отношение  $l_{Ц}/L$  называется коэффициентом центра давления  $k_D$ . Значение  $k_D$  зависит от  $\gamma$  и обычно лежит в пределах  $0,2 \div 0,5$ . Чем острее угол атаки, тем ближе центр  $C_D$  расположен к передней кромке крыла. При  $\gamma = 90^\circ$  центр давления располагается в точке, которая называется **центром бокового сопротивления** крыла (ЦБС). Смещение центра  $C_D$  изменяет гидродинамический момент  $M$  крыла

относительно оси его вращения. Если эта ось проходит через середину хорды, то

$$M = P_B(0,5 \cdot L - l_{Ц}). \quad (2.15)$$

Если ось вращения крыла проходит через его переднюю кромку, то

$$M = P_B l_{Ц}.$$

Для крыла малого удлинения с симметричным относительно хорды профилем в зависимости от  $\gamma$  сила  $F$  приблизительно может быть представлена ломаной линией «абвгде», а сила  $R$  – параболой «АБВ» (рис. 2.21). На этом рисунке  $\gamma_{кр}$  – наименьшее значение угла атаки, при котором происходит срыв потока на кромках крыла. Этот угол

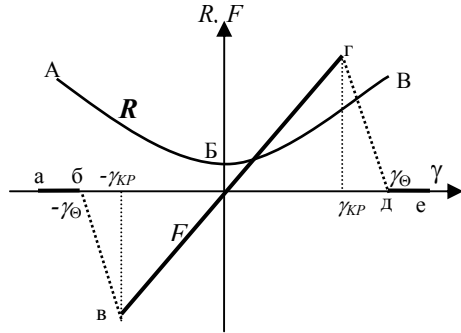


Рис. 2.21. Зависимость  $F$  и  $R$  от угла атаки.

называют **критическим**. Для судовых рулей  $\gamma_{кр} \approx 35 \div 40^\circ$ , поэтому нет смысла делать углы их перекалки больше этой величины. Для судовых корпусов  $\gamma_{кр} \approx 40 \div 60^\circ$ . Так как количественные соотношения для определения угла срыва потока на корпусе пока отсутствуют, то обычно для судовых корпусов  $\gamma_{кр}$  принимают  $45^\circ$  для носовых углов и  $135^\circ$  – для кормовых.

При углах атаки, больших  $\gamma_{кр}$ , подъемная сила крыла резко уменьшается. На графике значение  $\gamma$ , при котором силу  $F$  можно считать равной нулю, обозначено как  $\gamma_\Theta$ . Гидродинамические процессы при наличии срыва потока на корпусе характеризуются сложностью и слабой предсказуемостью. Поэтому на графике для углов атаки в интервале  $[\gamma_{кр}, \gamma_\Theta]$  значения силы  $F$  представлены пунктиром, что означает область ее неоднозначного изменения.

**Сила сопротивления крыла малого удлинения** приблизительно пропорционально квадрату  $\gamma$  и представляется выражением

$$R \approx (K_0 + k_R S \cdot \gamma^2) V^2; \quad (2.16)$$

где  $K_0$  – коэффициент сопротивления крыла при  $\gamma = 0$ ;  $k_R$  – удельный коэффициент силы сопротивления крыла при  $\gamma \neq 0$ .

**Подъемная сила крыла малого удлинения** в интервале  $[-\gamma_{кр}, \gamma_{кр}]$  пропорциональна  $\gamma$

$$F = k_F S \cdot \gamma \cdot V^2 . \quad (2.17)$$

Здесь  $k_F$  – удельный коэффициент. Если искусственно ввести **приведенный угол атаки**  $\hat{\gamma}$

$$\hat{\gamma} = \begin{cases} \gamma & \text{при } \gamma \leq \gamma_{кр}; \\ \frac{\gamma_{кр}(\gamma_{\Theta} - \gamma)}{\gamma_{\Theta} - \gamma_{кр}} & \text{при } \gamma_{кр} < \gamma \leq \gamma_{\Theta}; \\ 0 & \text{при } \gamma_{\Theta} < \gamma \leq 90^0; \end{cases} \quad (2.18)$$

то формулу (2.17) можно распространить на весь диапазон  $\gamma$

$$F = k_F S \cdot \hat{\gamma} V^2 . \quad (2.19)$$

**Продольная и боковая составляющие гидродинамической силы** по значениям сил  $F$  и  $R$  могут быть получены по формулам

$$\left. \begin{aligned} P_L &= F \sin \gamma - R \cos \gamma \\ P_B &= F \cos \gamma + R \sin \gamma \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

### **3. Корпус судна как элемент управляемой системы**

#### **3.1. Геометрические характеристики корпуса и их влияние на управляемость судна**

Геометрические характеристики корпуса. Важную роль при обеспечении управляемости судна играет форма корпуса. При ее выборе учитываются требования управляемости, мореходности, устойчивости, грузовместимости и ряд других. В корпусах грузовых и пассажирских судов выделяют носовую, кормовую части и цилиндрическую вставку. Выбор носовых обводов определяется в основном соображениями снижения сопротивления движению судна. Применение цилиндрической вставки позволяет получить определенные эксплуатационные преимущества – большую грузовместимость, удобство размещения грузов и др. Выбор формы кормы определяется главным образом соображениями снижения сопротивления движению судна, обеспечения требуемой поворотливости и хороших условий работы гребного винта.

При рассмотрении вопросов управляемости корпус судна делится на две части: надводную и подводную. Геометрические характеристики подводной части используются при анализе реакции водной среды на движение судна. По геометрическим элементам надводной части учитывается влияние на управляемость ветра. В формуляре маневренных характеристик приводятся следующие данные о корпусе судна:

- валовая вместимость, дедвейт и водоизмещение при осадке по летнюю грузовую марку;
- главные размерения: длина наибольшая, длина между перпендикулярами, ширина на миделе, высота борта, осадка по летнюю грузовую марку и в балласте;
- коэффициенты полноты (общей, ватерлинии, мидель-шпангоута), соответствующие летней осадке;
- максимальная высота судовых конструкций от киля;
- профили носа и кормы;
- проекции надводной части корпуса на ДП и на плоскость миделя для судна в грузу и в балласте;
- длина параллельной ДП части ватерлинии для судна в грузу и в балласте.



Геометрические характеристики подводной и надводной части судна меняются при изменении загрузки, скорости хода, на мелководье, на волнении.

**Форма подводной части корпуса** характеризуется размерными и безразмерными величинами. *Главные размеры* подводной части: длина между перпендикулярами ( $L$ ), ширина на миделе ( $B$ ), средняя осадка ( $T$ ), осадки носом ( $T_H$ ) и кормой ( $T_K$ ), дифферент ( $d$ ). Основными *безразмерными параметрами* являются отношения  $L/B$  и  $B/T$ , коэффициенты полноты: общей –  $\delta$ , ватерлинии –  $\delta_T$ , диаметральной –  $\delta_L$ , миделя –  $\delta_B$ , ДП по кормовой оконечности –  $\delta_{LK}$ . Диапазоны  $L/B$ ,  $B/T$ ,  $\delta$ ,  $\delta_B$  для различных типов судов представлены в табл.3.1 [25].

Таблица 3.1 – Характеристики подводной части корпуса судов

Типы судов	$L/B$	$B/T$	$\delta$	$\delta_B$
Пассажирские	7,9-10,0	2,0-2,8	0,45-0,71	0,85-0,96
Грузопассажирские	6,0-9,0	2,0-3,8	0,50-0,76	0,84-0,98
Грузовые	4,7-7,5	1,9-2,9	0,60-0,90	0,85-0,98
Буксиры	3,5-6,5	2,0-5,0	0,40-0,60	0,75-0,84

По параметрам корпуса рассчитываются масса судна, момент его инерции, площадь ДП и другие характеристики. **Весовое водоизмещение (масса) судна  $D$**  определяется по формуле:

$$D = \rho \cdot \delta \cdot L \cdot B \cdot T, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды.

**Момент инерции относительно ЦМ** для морских судов может быть вычислен по приближенной формуле [21]:

$$J_Z \approx 0,05 \cdot D \cdot L^2. \quad (3.2)$$

**Площадь  $S_{ДП}$  погруженной части ДП, и площадь  $S_{МШ}$  погруженной части мидель-шпангоута** находятся так:

$$\left. \begin{aligned} S_{ДП} &= \delta_L L T \\ S_{МШ} &= \delta_B B T \end{aligned} \right\}. \quad (3.3)$$

**Коэффициент  $\delta_{LK}$**  характеризует величину подреза кормовой оконечности:

$$\delta_{LK} = 1 - \frac{S_{ПК}}{LT}, \quad (3.4)$$

где  $S_{ПК}$  – площадь, ограниченная кормовым перпендикуляром, линией киля и контуром кормы (рис. 3.1).

**Параметры надводной части корпуса** применяются при расчете воздействий ветра. Для этой цели обычно используют боковую и лобовую площадь парусности ( $S_{аБ}$ ,

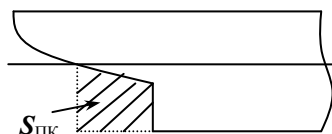


Рис. 3.1. Схема площади кормового подреза

$S_{аЛ}$ ), расстояние от центра боковой парусности до миделя ( $l_{ЦЦ}$ ).

**Влияние геометрических характеристик на управляемость.** На свойства судна как объекта управления влияют, прежде всего, отношения  $L/B$ ,  $\delta \cdot B/T$ , форма кормы и дифферент.

**Отношение  $L/B$ .** Увеличение  $L/B$  приводит к улучшению ходкости судна, его устойчивости на курсе и к ухудшению поворотливости. Изменение длины судна в пределах  $\pm 15\%$  практически не влияет на радиусы установившихся циркуляций с малыми кладками руля ( $\beta < 10^0$ ). Относительный радиус циркуляции  $\bar{R}_{Ц}/L$  с предельным углом руля практически пропорционален длине судна. С увеличением  $B$  возрастает скорость поворота судна и нелинейность диаграммы поворотливости  $L/\bar{R}_{Ц} = f(\beta)$ .

**Отношение  $\delta \cdot B/T$**  существенно влияет на зависимость  $L/\bar{R}_{Ц} = f(\beta)$ . С ростом  $\delta \cdot B/T$  ухудшается устойчивость судна на курсе. Начиная с  $\delta \cdot B/T < 1,7$ , у судна может появиться обратная поворотливость, т.е. оно становится неустойчивым на курсе [24]. Значение  $\delta \cdot B/T$  для среднетоннажных судов составляет  $1,5 \div 1,7$ . Отсюда следует наблюдаемая устойчивость их на курсе. Для современных судов-гигантов характерны значения  $\delta \cdot B/T$ , лежащие в пределах  $2,0 \div 2,5$ . Как показывает практика, они неустойчивы на курсе.

Уменьшение осадки сопровождается определенным ухудшением устойчивости судна на курсе. Судно стабильное на курсе в грузу может стать неустойчивым в порожнем состоянии. При уменьшении осадки судна возрастает кривизна циркуляций, особенно при малых и средних кладках руля.

**Коэффициент общей полноты.** С ростом  $\delta$  ухудшается устойчивость судна на курсе, улучшается его поворотливость,

увеличивается сопротивление воды движению судна. Быстроходные суда имеют более низкие значения этого коэффициента ( $\delta < 0,65$ ), чем тихоходные. Заметное возрастание сопротивления воды движению судна при увеличении  $\delta$  начинает проявляться при  $\delta > (0,60 \div 0,65)$ . При больших  $\delta$  судно обычно неустойчиво на курсе.

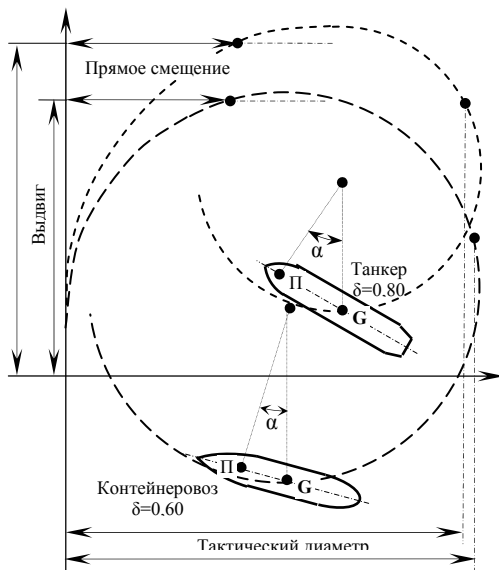


Рис. 3.2. Влияние  $\delta$  на параметры циркуляции

У танкера ( $\delta = 0,80$ ) и контейнеровоза ( $\delta = 0,60$ ) одинаковой длины и ширины циркуляции имеют вид, показанный на рис. 3.2, где  $G$  – центр массы судна,  $\Pi$  – полюс поворота,  $\alpha$  – угол дрейфа. Тактические диаметры и прямые смещения у этих судов почти равны, однако другие параметры циркуляций существенно отличаются.

**Отношение  $T/L$**  оказывает слабое влияние на управляемость. С ростом  $T/L$  устойчивость судна на курсе несколько возрастает.

**Дифферент.** Увеличение дифферента на корму приводит к улучшению устойчивости на курсе и ухудшению поворотливости судна на переднем ходу, а при дифференте на нос – судно теряет устойчивость и становится рыскливым.

**Величина подреза кормовой оконечности.** По рис. 3.1 можно заключить, что увеличение площади подреза кормовой оконечности

ухудшает стабилизирующий эффект корпуса судна на переднем ходу. В результате у судна уменьшается устойчивость на курсе и увеличивается поворотливость. Как показывают расчеты, изменение  $\delta_{LK}$  в пределах от 0,99 до 0,90 приводит к возрастанию скорости поворота при максимальной кладке руля почти вдвое. Уже при небольших подрезах кормового дейдвуда судно начинает терять устойчивость на курсе.

**Наличие у судна бульбообразной носовой насадки** улучшает поворотливость судна, ухудшает устойчивость на курсе и способствует увеличению скорости хода.

**Расположение центра парусности.** Геометрические характеристики надводной части корпуса влияют на управляемость при ветре. От расположения центра боковой парусности зависит, уваливается ли судно под ветер, либо приводится к ветру.

Результаты анализа влияния геометрических характеристик корпуса на управляемость судна на курсе сведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. – Изменение качеств управляемости на курсе

Характеристика	Устойчивость лучше, поворотливость хуже	Поворотливость лучше, устойчивость хуже
Отношение L/B	большое	малое
Козф. полноты $\delta$	малый	большой
Носовая оконечность	без бульбы	с бульбой
Площадь подреза кормы	малая	большая
Дифферент	на корму	на нос

### 3.2. Основные системы координат, кинематические параметры судна

**Основные системы координат.** Управление надводным судном касается его перемещения в горизонтальной плоскости, где любой маневр может быть представлен поступательным и вращательным движениями. Обычно они рассматриваются в жесткосвязанной ( $Igb$ ) и в несвязанной ( $хоу$ ) с судном координатных системах.

Начало **системы координат  $Igb$**  (рис.3.3) связано с ЦМ судна  $G$ , а оси ориентированы по осям симметрии корпуса (ниже корпус считается симметричным как относительно ДП, так и плоскости мидель-шпангоута). Расположенная в ДП ось  $Gl$  направлена к носу судна и называется *продольной*. Другая *поперечная (боковая)* ось  $Gb$  лежит в плоскости мидель-шпангоута и направлена в сторону правого

борта. Выбор координатной системы  $Igb$  обусловлен следующим. Во-первых, в этой системе измеряют элементы движения датчики навигационной информации, такие как курсоуказатели и лаги. А во-вторых, в системе  $Igb$  описание динамики судна получается наиболее простым, так как ее начало находится в ЦМ, а оси совпадают с осями симметрии корпуса.

**Система координат  $хоу$**  служит для учета движения судна относительно местности. Она ориентируется по меридиану: ось  $оу$  направлена на север, а ось  $ох$  – на восток. Начало системы связывается с той или иной точкой поверхности Земли. Перемещение судна может представляться также и в других системах координат.

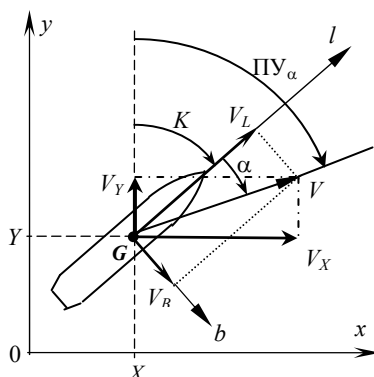


Рис. 3.3. Параметры движения судна

**Кинематические параметры судна.** В судовождении судно обычно характеризуется кинематическими параметрами ЦМ.

**Движение судна относительно грунта** представляется: перемещениями  $X$  и  $Y$  центра массы по оси  $ох$  и  $оу$ , вектором истинной скорости  $\vec{V}_И$ , угловой скоростью  $\omega$  вращения относительно ЦМ. Отражает такое перемещение и *путевой угол*  $ПУ_C$  (угол между плоскостью меридиана и вектором  $\vec{V}_И$ ). Вектор  $\vec{V}_И$  при необходимости может показываться своими проекциями  $V_{ИХ}$  и  $V_{ИУ}$  на оси  $ох$  и  $оу$ .

Перемещение судна относительно грунта состоит из движения относительно воды и переноса вместе с водной массой течением, т.е. вектор  $\vec{V}_И$  является геометрической суммой вектора скорости судна относительно воды  $\vec{V}$  и вектора скорости течения  $\vec{V}_Т$ :

$$\vec{V}_И = \vec{V} + \vec{V}_Т.$$

Когда нет течения,  $\vec{V}_И = \vec{V}$ . Для этого случая на рис. 3.3 представлены основные кинематические параметры судна.

**Движение судна относительно воды.** Управление судном предполагает прогноз его перемещения на определенное время вперед. Для прогнозирования необходимо иметь представление о силах, действующих на корпус судна. Главные из этих сил, гидродинамические, зависят от скорости судна относительно воды. Поэтому вектор  $\vec{V}$  – один из основных кинематических параметров судна. Движение судна относительно воды может характеризоваться модулем  $V$  этого вектора и его проекциями  $V_L$ ,  $V_B$  на оси  $G1$  и  $Gb$  (см. рис. 3.3). Показателями этого перемещения также являются *путевой угол*  $\text{ПУ}_\alpha$  (угол между меридианом и вектором  $\vec{V}$ ) и *угол дрейфа*  $\alpha$  (угол при ЦМ между ДП и вектором  $\vec{V}$ ).

В *системе координат*  $хоу$  движение судна относительно воды характеризуют проекции  $V_X$ ,  $V_Y$  вектора  $\vec{V}$  на оси  $ох$  и  $оу$ , *курс судна*  $K$  (угол между плоскостью меридиана и ДП судна), *угол сноса*  $\gamma = \text{ПУ}_C - K$ .

### 3.3. Инерционные силы и моменты

Инерционные силы и моменты определяются массой судна  $D$ , его моментом инерции  $J_Z$  и ускорениями в движении судна. Инерционные силы всегда направлены в сторону, противоположную направлению ускорений. С учетом реакции водной среды на ускорения в движении массы судна  $m_L$ ,  $m_B$  по продольной и боковой осям и момент инерции  $J_\omega$  находятся по формулам [33]:

$$m_L = (1 + k_{11})D, \quad m_B = (1 + k_{22})D, \quad J_\omega = (1 + k_{66})J_Z. \quad (3.5)$$

Здесь  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{66}$  – коэффициенты присоединенных масс. Они для морских транспортных судов на переднем ходу находятся в пределах:  $k_{11} = 0,05 \div 0,15$ ;  $k_{22} = 0,7 \div 1,2$ ;  $k_{66} = 0,6 \div 1,3$ . На заднем ходу присоединенные массы больше приблизительно на 12%.

При неравномерном криволинейном движении судна инерционные силы могут быть разделены на два вида: *вызываемые ускорениями в изменении величины линейной и угловой скорости; определяемые центростремительным ускорением*, обусловленным изменением направления линейной скорости (центростремительное ускорение появляется и при равномерном движении судна по

криволинейной траектории). Составляющие силы первого вида в системе  $IGb$  получаются по формулам:

$$P_{\Lambda L} = -m_L \frac{dV_L}{dt}; \quad P_{\Lambda B} = -m_B \frac{dV_B}{dt}; \quad M_{\Lambda} = -J_{\omega} \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.6)$$

Для расчета определяемой центростремительным ускорением **центробежной силы**  $P_{Ц}$  используется выражение:

$$P_{Ц} = D \cdot \omega_{\text{ПУ}} V;$$

где  $\omega_{\text{ПУ}} = \omega - d\alpha/dt$  – скорость изменения путевого угла судна.

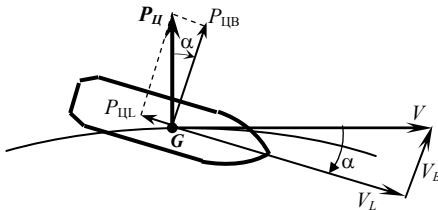


Рис. 3.4. Центробежная сила

Проекции центробежной силы на оси системы  $IGb$  находятся по формулам, которые поясняются рис. 3.4:

$$\left. \begin{aligned} P_{ЦЛ} &= -D \cdot \omega_{\text{ПУ}} V_B \\ P_{ЦВ} &= -D \cdot \omega_{\text{ПУ}} V_L \end{aligned} \right\}.$$

Учитывая силы вязкостной природы, получаем

$$P_{ЦЛ} = -m_B \omega_{\text{ПУ}} V_B; \quad P_{ЦВ} = -m_L \omega_{\text{ПУ}} V_L. \quad (3.7)$$

Таким образом, инерционные силы и момент на корпусе могут быть представлены в виде суммы составляющих (3.6) и (3.7)

$$\left. \begin{aligned} P_{ИЛ} &= -m_L \frac{dV_L}{dt} - m_B \omega_{\text{ПУ}} V_B \\ P_{ИВ} &= -m_B \frac{dV_B}{dt} - m_L \omega_{\text{ПУ}} V_L \\ M_{И} &= -J_{\omega} \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (3.8)$$

### 3.4. Гидродинамические характеристики корпуса

Маневры надводного судна, как упоминалось, представляются поступательным и вращательным его движениями. В соответствии с этим гидродинамическая сила на корпусе, обусловленная вязкостью воды, подразделяется на *позиционную* и *демпфирующую*. **Позиционная сила**  $P_K$  – это воздействие, которое развивается на корпусе судна при его равномерном поступательном перемещении. **Демпфирующей**

называется сила реакции воды на равномерное вращательное движение корпуса.

Позиционная сила, когда корпус судна рассматривается как крыло, представляется *подъемной силой*  $F_K$  и *силой сопротивления*  $R_K$  поступательному перемещению (рис. 3.5). Приблизительно эти силы могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в параграфе 2.8.

**Подъемная сила.** Для учета явления срыва потока на корпусе при расчете подъемной силы вводится понятие приведенного угла дрейфа, обозначаемого ниже как  $\hat{\alpha}$ :

$$\hat{\alpha} = \begin{cases} \alpha & \text{при } \alpha \leq \alpha_{\text{кр}}; \\ \alpha_{\text{кр}}(\alpha_{\Theta} - \alpha) & \text{при } \alpha_{\text{кр}} < \alpha \leq \alpha_{\Theta}; \\ 0 & \text{при } \alpha_{\Theta} < \alpha \leq 90^{\circ}. \end{cases} \quad (3.9)$$

У судовых корпусов  $\alpha_{\text{кр}} \approx 45^{\circ}$ ,  $\alpha_{\Theta} \approx 75^{\circ}$ . В соответствии с (2.19)

$$F_K \approx k_f S_{\text{ДП}} \hat{\alpha} \cdot V^2. \quad (3.10)$$

В этом выражении  $k_f$  – удельный коэффициент подъемной силы,  $S_{\text{ДП}}$  – площадь проекции подводной части корпуса судна на ДП.

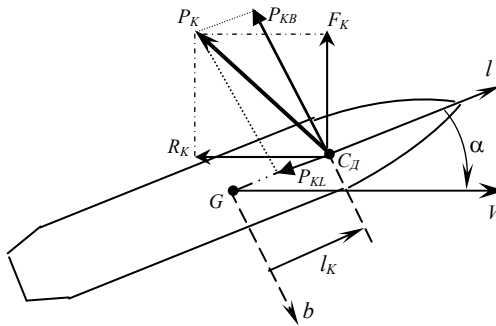


Рис. 3.5. Позиционная сила и ее компоненты

**Сила сопротивления** находится по формуле, аналогичной (2.16)

$$R_K \approx (K_{K0} + k_r S_{\text{ДП}} \alpha^2) V^2 = K_{K\alpha} V^2, \quad (3.11)$$

где  $K_{K0}$ ,  $K_{K\alpha}$  – коэффициент силы сопротивления на корпусе при угле атаки, соответственно равном нулю и  $\alpha$ ;  $k_r$  – удельный



коэффициент силы сопротивления при углах атаки, не равных нулю. Значения  $K_{K0}$ ,  $k_r$  для  $V \geq 0$  и  $V < 0$  несколько отличаются.

Коэффициент  $K_{K0}$  для переднего хода можно рассчитать по формуле С.И.Демина [32]

$$K_{K0} \approx 5.88 + 0.000654 \cdot S_{CM} \sqrt{\frac{B}{T}}, \quad (3.12)$$

где площадь смоченной поверхности корпуса

$$S_{CM} \approx D^{\frac{2}{3}} \left( 4,854 + 0,492 \frac{B}{T} \right).$$

Кроме выражения С.И.Демина, для расчета  $S_{CM}$  применяют и другие формулы: для судов с малым  $\delta$  – С.П.Муратова, с большим  $\delta$  – В.А.Себеки, для промысловых судов – В.А.Ерошина, для речных судов без тоннелей – А.Б.Карпова [26]. Все упомянутые выше зависимости обеспечивают расчет  $S_{CM}$  с погрешностью, не превышающей 2÷4% от точного значения.

**Продольная и боковая составляющие позиционной силы** по значениям  $F_K$  и  $R_K$  находятся по формулам, аналогичным (2.20)

$$\left. \begin{aligned} P_{KL} &= F_K \sin \alpha - R_K \cos \alpha \\ P_{KB} &= F_K \cos \alpha + R_K \sin \alpha \end{aligned} \right\}. \quad (3.13)$$

**Момент позиционной силы.** Точка приложения позиционной силы  $P_K$  на корпусе меняется в зависимости от угла дрейфа. Когда  $\alpha = 90^\circ$ , она совпадает с центром бокового сопротивления (ЦБС) корпуса. Приблизительно можно считать, что ЦБС представляет собой центр проекции на ДП погруженной части судна. При посадке судна на ровный киль ЦБС и ЦМ практически находятся в плоскости мидель-шпангоута. При дифференте как ЦМ, так и ЦБС смещаются относительно ее. Расстояние  $l_K$  от точки приложения позиционной силы до ЦМ в зависимости от  $\alpha$  можно найти по формуле [17, 32]

$$l_K = l_{ЦБС} + k_{Ц} L \left( 0.5 - \frac{\alpha}{\pi} \right),$$

где  $l_{ЦБС}$  – расстояние от ЦБС до ЦМ судна;  $k_{Ц} \approx 0,4 \div 0,5$ .

Относительно ЦМ судна момент позиционной силы равен

$$M_K = P_{KB} l_K. \quad (3.14)$$

**Момент демпфирующей силы** может представляться двумя компонентами

$$M_{\text{д}} \approx -(C_0 \omega^2 + C_V \omega V), \quad (3.15)$$

где  $C_0$ ,  $C_V$  – коэффициенты. Первая компонента  $M_{\text{д}}$  отражает сопротивление вращению судна без хода. Вторая – учитывает дополнительный стабилизирующий эффект корпуса при его движении со скоростью  $V$ .

**Момент гидродинамической силы на корпусе** равен сумме моментов позиционной и демпфирующей сил

$$M_{\text{Г}} = M_{\text{К}} + M_{\text{д}}. \quad (3.16)$$

Формулы для определения коэффициентов подъемной силы, силы сопротивления и момента гидродинамической силы можно найти в Справочниках по теории корабля.

### 3.5. Аэродинамические силы на корпусе судна

Ветер характеризуется *силой и направлением*  $K_a$ , отсчитываемым от меридиана. За направление ветра принимается сторона горизонта, откуда он приходит (ветер дует в компас). Если ветер рассматривать как воздушный поток, то направление движения этого потока будет отличаться от  $K_a$  на  $180^\circ$ . Сила ветра определяется в зависимости от его средней скорости  $v_a$ . Переменной составляющей скорости ветра при расчете его воздействия на судно обычно пренебрегают. Когда судно движется, направление и скорость перемещения воздушного потока относительно судна отличаются от направления и скорости перемещения этого потока по отношению к Земле.

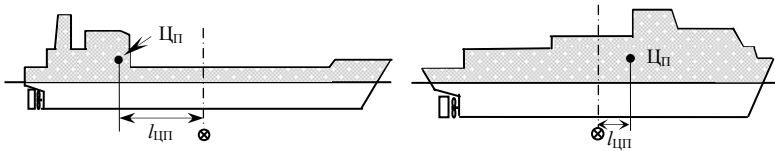


Рис. 3.6. Боковая площадь парусности судна и ее центр

В судовождении движение воздушного потока относительно Земли называется *истинным ветром*, а относительно судна – *кажущимся*. Направление и скорость истинного ветра обозначим  $K_a$ ,  $v_a$ , а кажущегося –  $K_{ak}$ ,  $v_{ak}$ . Курсовой угол кажущегося ветра равен

$q_k = K_{ak} - K$ . Вектор скорости истинного ветра является геометрической суммой векторов скоростей судна и кажущегося ветра:

$$\vec{v}_a = \vec{V} + \vec{v}_{ak}. \quad (3.17)$$

Отсюда следует, что если известны элементы кажущегося ветра, то могут быть найдены параметры истинного ветра и наоборот. Элементы кажущегося ветра получаются на судне путем измерений.

Влияние ветра на судно зависит от площади и конфигурации надводной части судна. Нередко при расчете действия ветра учитывается только боковая парусность судна, так как она значительно превосходит лобовую. На рис. 3.6 показана площадь  $S_{\alpha\beta}$  боковой парусности (заштрихована) и ее центр  $\Pi_{\Pi}$  для двух судов, где  $l_{\Pi\Pi}$  – расстояние от  $\Pi_{\Pi}$  до ЦМ. Это расстояние имеет знак «плюс», когда  $\Pi_{\Pi}$  смещен в сторону носа от ЦМ, и «минус» – когда в сторону кормы. Величина  $l_{\Pi\Pi}$  зависит от расположения надстроек и других надводных частей корпуса, а также от осадки и дифферента судна. Площадь и центр парусности определяются обычно по чертежу бокового вида судна.

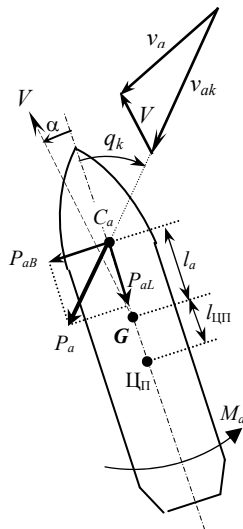


Рис. 3.7. Схема сил от ветра

Схема воздействий ветра на судно представлена на рис. 3.7. На ней:  $P_a$ ,

$P_{aL}$ ,  $P_{aB}$  – сила давления ветра и ее продольная и боковая компоненты;  $M_a$  – момент силы  $P_a$ ;  $C_a$ ,  $l_a$  – центр давления ветра и расстояние от него до ЦМ.

**Продольная и поперечная составляющие силы  $P_a$  находятся по известным соотношениям [9, 19]:**

$$\left. \begin{aligned} P_{aL} &= \frac{\rho_a}{2} c_{aL} S_{aB} v_{ak}^2 \\ P_{aB} &= \frac{\rho_a}{2} c_{aB} S_{aB} v_{ak}^2 \end{aligned} \right\}; \quad (3.18)$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $c_{aL}$ ,  $c_{aB}$  – безразмерные коэффициенты.

Характер зависимости  $c_{aL}$ ,  $c_{aB}$  от кажущегося курсового угла ветра представлен на рис. 3.8. Приблизительно эти коэффициенты находятся по формулам:

$$\left. \begin{aligned} c_{aL} &= (0,8 \div 1,0) \cos q_k \\ c_{aB} &= (1,0 \div 1,2) \sin q_k \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

**Плечо силы  $P_{aB}$  и ее момент** получают так:

$$l_a \approx l_{ЦП} + (0,25 - \frac{q_k}{2\pi})L, \quad M_a = P_{aB}l_a. \quad (3.20)$$

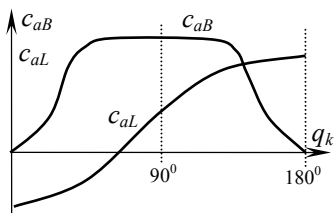


Рис. 3.8. Зависимость  $c_{aL}$ ,  $c_{aB}$  от  $q_k$

Этот момент стремится развернуть судно относительно вертикальной оси в направлении уваливания наветренной оконечности судна.

В **формуляре маневренных качеств** для судна в грузу и в балласте для различной силы и направления ветра приводятся:

- расчетные значения сил и моментов от ветра;
- диаграммы пределов управляемости судна;
- данные о скорости дрейфа судна с остановленными двигателями.

### 3.6. Силы и моменты от действия волн

Волнение моря является одним из основных возмущений, действующих на судно. Благодаря знакопеременности действия волнение не вызывает значительных отклонений в траектории ЦМ судна при его перемещении.

Эксплуатационная устойчивость судна на курсе ухудшается при ходе на попутном волнении. Однако потеря ее может произойти только в штормовых условиях при равенстве скорости судна и скорости бега волн большой высоты. Волнение существенно

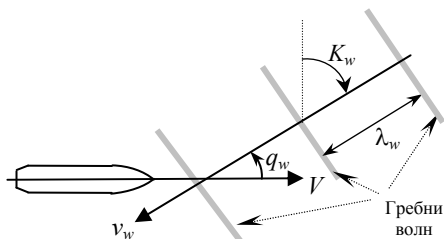


Рис. 3.9. Взаимное движение судна и волн

влияет на скорость и величину рыскания судна. Оно ухудшает условия работы руля и гребного винта.

Наблюдаемые на идущем судне параметры волнения отличаются от их истинных значений и называются *кажущимися*. Как следует из рис. 3.9, движение гребней волн относительно судна происходит со скоростью:

$$v_{wk} = v_w + V \cos q_w; \quad (3.21)$$

где  $V$  – скорость судна;  $q_w$  – курсовой угол волнения.

Исходя из этого, кажущиеся период и частота волнения могут быть представлены выражениями:

$$T_k = \lambda_w / v_{wk}, \quad \omega_k = 2\pi / T_k. \quad (3.22)$$

### Силы и моменты на корпусе судна от действия волн.

Воздействие на корпусе судна морских волн содержит переменную и медленноменяющуюся составляющие. Последняя компонента на определенных отрезках времени может считаться постоянной.

Наиболее полно изучено влияние волнения на скорость прямолинейного перемещения судна. Для приближенного расчета потерь  $\Delta V$  скорости судна на волнении могут быть применены эмпирические формулы Аэртсена, П.М.Хохлова и других исследователей. В частности для этих целей можно использовать выражение:

$$\Delta V \approx \frac{0,01 \cdot V_0}{\sqrt{1 + (5q_w/\pi)^2}} \left( \frac{175 \cdot h_z \sqrt{h_z}}{L} + 0,32 \cdot h_z^2 \right), \quad (3.23)$$

где  $h_z$  – высота значительных волн.

В координатной системе  $IGb$  компоненты постоянной составляющей действия волн на судно представляются в виде [5]:

$$\left. \begin{aligned} R_{wL} &= c_{wL} R_{K0} \\ R_{wB} &= c_{wB} h_z^2 \sin q_w \\ M_{wR} &= R_{wB} l_w \end{aligned} \right\}, \quad (3.24)$$

где  $c_{wL} = (\Delta V / V_0)^2$ ,  $c_{wB}$  – коэффициенты продольной и поперечной составляющих медленноменяющейся силы от волн;  $l_w$  – плечо составляющей  $R_{wB}$  относительно ЦМ судна. Приближенно его можно оценить по формуле:

$$l_w \approx (0.3 - \frac{q_w}{\pi}) L.$$

**Переменную составляющую** волнового возмущения (боковую силу и момент рыскания) рассчитывают по формулам [5, 21]:

$$\left. \begin{aligned} Q_{wB} &= k_{wB} g \cdot m_B \sin q_w \cdot \gamma_w(t) \\ M_{wQ} &= (k_{wM} g \cdot J_\omega \sin 2q_w - k_{wD} \frac{L \cdot S_{ДП} V}{\omega_\lambda \omega_w} \sin q_w) \cdot \dot{\gamma}_w(t) \end{aligned} \right\}, \quad (3.25)$$

где  $\gamma_w(t)$  – угол волнового склона;  $k_{wB}$ ,  $k_{wM}$  – редуцированные коэффициенты;  $k_{wD}$  – поправочный коэффициент.

Для регулярного волнения функция угла волнового склона и ее производная имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_w(t) &= A_w \omega_\lambda \cos \omega_{wk} t \\ \dot{\gamma}_w(t) &= -A_w \omega_\lambda \omega_{wk} \sin \omega_{wk} t \end{aligned} \right\}. \quad (3.26)$$

Соответствующие нерегулярному волнению реализации  $\gamma_w(t)$ ,  $\dot{\gamma}_w(t)$  получаются моделированием на компьютере случайного процесса с корреляционной функцией, описывающей изменения волнового склона.

При анализе систем стабилизации курса требуется учитывать волновое рыскание судна относительно заданного курса. Если считать судно линейной системой, то волновое рыскание будет иметь такую же частоту, как и вызвавший его момент. Приблизительно изменение угла  $\psi$  волнового рыскания судна можно представить в виде:

$$\psi = |c_\psi \sin 2q_w - c_{\psi D} \sin q_w| r_w(t); \quad (3.27)$$

где  $r_w(t)$  – ордината волнения;  $c_\psi$ ,  $c_{\psi D}$  – коэффициенты волнового рыскания.

На попутном волнении амплитуда рыскания больше, чем на встречном. Максимум она достигает при  $q_w \approx 135^\circ$ . Зависимость амплитуды угла рыскания от курсового угла волнения имеет приведенный на рис. 3.10 вид.

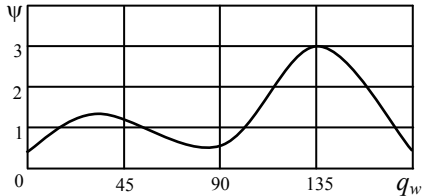


Рис. 3.10. Зависимость амплитуды рыскания от  $q_w$

**Гидродинамические силы и момент на корпусе судна от действия волн** записываются в виде суммы медленноменяющейся и переменной составляющих

$$\left. \begin{aligned} P_{wL} &= R_{wL} + Q_{wL} \\ P_{wB} &= R_{wB} + Q_{wB} \\ M_w &= M_{wR} + M_{wQ} \end{aligned} \right\}. \quad (3.28)$$

### 3.7. Влияние дифферента на динамические характеристики корпуса

Наличие дифферента влияет на управляемость и ходкость судна. При небольшом дифференте на корму улучшается устойчивость судна на курсе, а поворотливость становится хуже. При дифференте на нос появляется рыскливость, радиус циркуляции судна уменьшается, буксировочное сопротивление судна возрастает. Большой дифферент на корму приводит к снижению скорости хода. Названные явления обусловлены изменением ГДХ корпуса судна при изменении его дифферента.

При посадке судна на ровный киль ЦМ и ЦБС судна находятся близко к плоскости мидель-шпангоута. Наличие дифферента приводит к их смещению. Когда дифферент изменяется на корму, то эти точки отклоняются от миделя в сторону кормы. Если дифферент увеличивается на нос, то положение ЦМ и ЦБС смещается к носу судна. Центр бокового сопротивления обычно смещается больше ЦМ. Расстояние ЦБС от миделя при дифференте может быть приближенно определено по формуле [11, 17]:

$$l_{\text{ЦБС}} = L \left[ \frac{1 + 2 \cdot T_H / T_K}{3(1 + T_H / T_K)} - 0,5 \right].$$

При дифференте меняется по сравнению с посадкой на ровный киль и величина расстояния от миделя до центра давления позиционной гидродинамической силы при одинаковых углах дрейфа. Расчет смещения ЦМ и ЦБС относительно миделя при изменении дифферента может быть выполнен по приближенным формулам. Надежных формул, чтобы оценить в зависимости от дифферента смещение центра давления позиционной гидродинамической силы, пока нет.

Следует также отметить, что при росте дифферента на корму увеличивается площадь кормовой оконечности погруженной части ДП судна по отношению к площади носовой. В результате повышается стабилизирующий эффект корпуса при движении передним ходом. Соответственно, при дифференте на нос стабилизирующий эффект

корпуса при движении передним ходом становится меньше, а при движении задним ходом – повышается. Изменение стабилизирующего эффекта корпуса при дифференте может считаться основным фактором, влияющим на поворотливость судна. Учет его можно выполнить увеличением коэффициента составляющей  $C_V \omega \cdot V$  момента демпфирующей силы (3.15).

**Влияние дифферента на аэродинамические характеристики корпуса судна.** При дифференте по сравнению с посадкой судна на ровный киль меняют положение ЦМ, Ц<sub>П</sub> и центр давления ветра на надводную часть корпуса. Когда дифферент изменяется на нос, ЦМ судна смещается в сторону носа, а Ц<sub>П</sub> – в сторону кормы. При увеличении дифферента на корму ЦМ смещается в сторону кормы, а Ц<sub>П</sub> – в сторону носа. В обоих этих случаях величина смещения Ц<sub>П</sub> больше, чем ЦМ. Изменение положения ЦМ судна при дифференте обычно считается малым. Смещение Ц<sub>П</sub> при изменении дифферента учитывается приближенно.

Изменение в зависимости от дифферента положения центра давления ветра на корпус при одинаковых курсовых углах ветра пока не может быть определено. Поэтому оценка влияния дифферента на аэродинамические характеристики корпуса сводится к учету смещения только центра боковой парусности судна.

### 3.8. Влияние мелководья на гидродинамические характеристики корпуса

Мелководье существенно изменяет силы реакции водной среды на перемещение судна. По сравнению с этим влияние малых глубин на ГДХ движительно-рулевого комплекса считается незначительным.

Малые глубины приводят к заметному *возрастанию присоединенных масс* из-за увеличения местных скоростей обтекания корпуса. Это изменение определяется отношением  $H/T$  и мало зависит от главных размерений, полноты и формы обводов судна. Относительный рост коэффициентов присоединенных масс  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{66}$  при уменьшении  $H/T$  почти одинаков. В табл. 3.3 представлены приближенные значения отношения  $\mu_m$  коэффициента присоединенной массы на мелководье к его значению на глубокой воде в зависимости от  $H/T$ .



Таблица 3.3. – Увеличение коэффициентов присоединенных масс на мелководье

$H/T$	5.0	2.5	2.0	1.7	1.4	1.25
$\mu_m$	1.1	1.4	1.6	1.9	2.3	2.7

При движении на мелководье *возрастают позиционная и демпфирующая составляющие гидродинамической силы*. Это приводит при следовании прямым курсом к снижению скорости хода, устойчивости на курсе, а при циркуляции – к уменьшению угла дрейфа, к увеличению радиуса циркуляции. Вследствие уменьшения угла дрейфа *скорость судна на циркуляции в условиях мелководья падает в меньшей степени, чем на глубокой воде*.

Формулы для определения ГДХ на мелководье можно найти в Справочниках по теории судна. В формуляре маневренных данных для судна в полном грузу, движущегося передним средним ходом в условиях мелководья ( $H/T = 1,2$ ), приводятся расчетные элементы и графики циркуляций с предельной кладкой руля, показывается на них след кормы, а также время, скорость, контур корпуса в точках поворота на  $90^0$ ,  $180^0$ ,  $270^0$ .

## 4. Главные движительные устройства

### 4.1. Назначение и состав ГДУ

Главные движительные устройства предназначены для создания движущей судно продольной силы и ее изменения при управлении скоростью хода. Они включают в себя два основных элемента: *двигатель* и *движитель*.

**Судовым двигателем** называют установку, непрерывно преобразующую энергию рабочего тела в механическую энергию, необходимую для работы движителя. В зависимости от типа главного двигателя ГДУ бывают дизельными, турбинными, электрическими, атомными и комбинированными.

На теплоходах используются двигатели внутреннего сгорания – **дизели** (рис.4.1). Они получили на флоте наибольшее применение, поэтому им посвящается отдельный параграф 4.2. Современные дизели работают на тяжелых, т.е. более дешевых сортах топлива, имеют достаточно низкий его расход. С учетом утилизации тепловых потерь их КПД может достигать до 75%. Обычно он составляет порядка 52%. Мощность главного двигателя на теплоходах передается на движитель непосредственно или через редуктор.

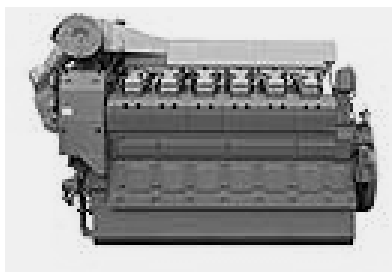


Рис. 4.1. Главный судовой дизель

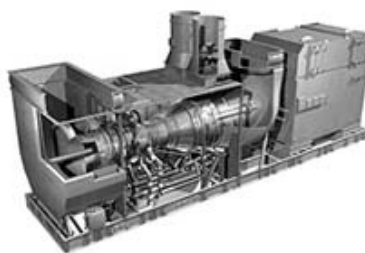


Рис. 4.2. Газовая турбина

Главными двигателями турбоходов служат **турбины**. По принципу своей работы они нереверсивные. Поэтому в турбинных установках с ВФШ используются две отдельные турбины: одна – для работы гребного винта на ПХ, другая – на ЗХ. Первая из этих турбин называется турбиной переднего хода, а вторая – турбиной заднего хода. Эти турбины располагаются в одном корпусе. При работе одной

из них другая вращается вхолостую. На турбоходах мощность двигателя передается на движитель через зубчатую передачу, поэтому их ГДУ называют также турбозубчатыми. По роду рабочего тела судовые турбины делятся на паровые и газовые.

*Паротурбинная двигательная установка* (ПТДУ) включает в себя одну или несколько паровых турбин и вспомогательные устройства. Смена режима хода в ПТДУ производится изменением количества подводимого к турбине пара, а для реверсирования ВФШ отключают турбину переднего хода и переходят к работе турбины заднего хода. Ее мощность обычно составляет 40-50% мощности турбины переднего хода. ПТДУ менее эффективны, чем дизели (КПД обычно не более 30%), но они компактны, меньше по весу, быстро запускаются. Кроме того, паровая турбина в настоящее время является единственным реальным тепловым двигателем, обеспечивающим возможность использования на судах ядерной энергии. Массовое применение ПТДУ нашли на газовозах – LNG судах (Liquefied Natural Gas Carriers). До недавнего времени история флота LNG судов была связана в основном с работой на его пользу паровых турбин. На современных газовозах преобладающими становятся дизельные установки. Используются ПТДУ и на большегрузных танкерах и контейнеровозах.

*Газотурбинная двигательная установка* (ГТДУ) состоит из газовой турбины (рис. 4.2) и механизмов, обеспечивающих ее работу. Главными достоинствами ГТДУ являются высокая эксплуатационная надежность, низкий удельный вес (4-6 кг/кВт), высокий уровень готовности, быстрый запуск, возможность комплексной автоматизации и быстрой агрегатной замены (4-6 часов), незначительные расходы на текущее обслуживание и ремонт, высокая маневренность. Основные недостатки – более высокий, чем у дизелей, удельный расход топлива, относительно низкий моторесурс, работа на более дорогих легких сортах топлива, высокая стоимость.

Современные газовые турбины обладают приемлемым уровнем надежности, стоимости эксплуатации и производства. Применяются они на крупнотоннажном пассажирском флоте, военных кораблях.

На электроходах гребной винт приводится во вращение **электродвигателем**. Питание для электродвигателя вырабатывается дизель- или турбо-генератором. Суда с такими типами движительных установок называют *электроходами*. Они по существу имеют два двигателя: первичный и вторичный. Первичным служит дизель или турбина, а вторичным – электромотор, связанный с гребным винтом. В зависимости от первоисточника энергии электроходы подразделяются на дизель- и турбоэлектроходы. Первичный двигатель на электроходах

является неререверсивным. Вращение от него передается генератору, питающему гребной электромотор. Ревёрс гребного винта на электроходах производится путем коммутирования напряжения, питающего гребной электромотор. Турбины заднего хода в турбоэлектрических установках нет. Регулирование частоты вращения гребного винта выполняется изменением напряжения генератора и одновременно потока возбуждения гребного электромотора.

Главные преимущества электрической пропульсивной установки: возможность использования неререверсивного первичного двигателя; унификация электропитания для судовых нужд и гребного двигателя; гибкость выработки и распределения мощности; повышенная маневренность (благодаря высокому стартовому моменту на валу электромотора); высокая эффективность; экономия топлива от 8 до 10% и уменьшение вредных выбросов дизеля (объясняется его работой в неизменном близком к оптимальному режиме); малая шумность и меньшая вибрация корпуса; простой и быстрый реверс с переднего на задний ход. Основной недостаток – более высокая стоимость. Обычно электроходами являются комфортабельные пассажирские суда, паромы и ледоколы.

**Атомная судовая силовая установка** преобразует используемую в ней ядерную энергию топлива в механическую. Она сочетает в себе атомный реактор, в котором основная часть освобождающейся ядерной энергии преобразуется в теплоту, и тепловой двигатель (паровую турбину), использующий эту теплоту для ее преобразования в энергию вращения гребного винта. Суда с атомными ГДУ называются атомоходами. Применяются атомные энергетические установки на крупных и мощных специализированных судах типа ледоколов и подводных лодок.

Примером *комбинированных ГДУ* может служить дизель-газотурбинная установка судна, в которой в качестве основных двигателей служат дизели, а газовые турбины применяются для кратковременного развития больших мощностей.

*При выборе двигателя для судна* используется комплекс критериев: стоимость и надежность; массогабаритные характеристики; обеспечение маневренности, автономности плавания и заданной мореходности; эффективность использования энергетических характеристик топлива; гибкость выработки и распределения мощности; уровень загрязнения воздушной и водной среды и ряд других. Результаты регрессионного анализа Регистра Ллойда показывают, что мощность ГДУ в л.с. в зависимости от дедвейта судна приближенно описывается выражениями, приведенными в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Статистическая зависимость мощности ГДУ от дедвейта

Тип судна	Мощность двигателя, л.с.
Балкера и танкера	9070+0,101(DWT)
Сухогрузы	3046+0,288(DWT)
Контейнеровозы/ РоРо/ Реф.суда/ Автомобилевозы	2581+0,719(DWT)

**Движители** преобразуют энергию, получаемую от двигателей, в энергию поступательного перемещения судна. Они могут быть лопастными и водопроточными. *Лопастные движители* делят на винтовые, колесные и крыльчатые. К винтовым движителям относятся гребные винты постоянного (ВФШ) и регулируемого (ВРШ) шага. *Водопроточные движители* делятся на водометные и гидрореактивные. Преобладающее применение на морских судах получили ГДУ с гребными винтами, состоящими из насаживаемой на гребной вал ступицы с 2÷6 лопастями, закрепленными на ней под некоторым углом к плоскости вращения. Гребные винты изготавливаются из бронзы, латуни, легированной стали и др. При работе гребные винты захватывают определенную массу воды, закручивают ее и затем отбрасывают в направлении, противоположном движению судна. Создаваемая таким образом струя винта представляется обычно в виде соосного с винтом и закрученного в сторону вращения винта потока цилиндрической формы с диаметром, равным диаметру винта. Скорость каждой частицы жидкости в таком потоке имеет радиальную (тангенциальную) и осевую (аксиальную) составляющие. *За вектор скорости струи от гребного винта принимается ее осевая компонента.*

**Передача энергии на гребные винты от двигателя** может быть механической, гидравлической и электрической. При *механической передаче* двигатель связывается с гребным винтом с помощью валопровода непосредственно (напрямую), либо через редуктор. Валопровод – это конструктивный комплекс, обеспечивающий передачу крутящего момента от судового двигателя гребному винту. Он состоит из системы валов, соединенных болтами на фланцах, и обычно включает гребной, промежуточный и упорный валы, подшипники, дейдвудное, уплотнительные, тормозное и токосъемное устройства, торсионный вал и другие части.

Когда *передача гидравлического типа*, связь двигателя с движителем осуществляется через гидравлическую муфту или через гидротрансформатор.

При *электрической передаче* энергия от двигателя к гребному винту поступает через систему «генератор – гребной электромотор» (электроходы). К основным преимуществам электрической передачи следует отнести: возможность в качестве первичного использовать нереверсивный высокооборотный двигатель, способность изменения частоты вращения гребного винта при неизменной частоте вращения первичного двигателя.

В формуляре маневренных характеристик судна приводится такая **информация о ГДУ для целей маневрирования**:

- Тип двигателей, их число, эффективная мощность (на валу).
- Тип гребных винтов, их число, шаг, диаметр, направление вращения, заглубление.
- Определенные на испытаниях либо расчетным путем таблицы соответствия скорости судна и частоты вращения гребного винта (для судна в грузу и в балласте). Соответствие режимам переднего хода оборотов двигателя, скорости судна, силы упора винта.
- Критические обороты.
- Время отработки двигателем команд машинного телеграфа при переходе с режимов переднего хода на ЗПХ и СТОП при нормальном и аварийном реверсах.
- Предельное время работы машины в режиме заднего хода.
- Минимальная рабочая частота вращения (для дизеля) и соответствующая ей скорость хода.
- Максимальное количество последовательных пусков (для дизеля).

## 4.2. Общие сведения о судовых дизелях

В настоящее время на судах дизели являются преобладающим типом главных двигателей. Развиваемый дизелем крутящий момент и соответствующая ему частота вращения гребного винта определяются количеством впрыскиваемого в цилиндр топлива. Основным типом дизелей на судах речного флота служат среднеоборотные и высокооборотные тронковые, четырехтактные, реверсивные и нереверсивные дизели.

Главным видом ГД на морских судах являются крейцкопфные, двухтактные, реверсивные, малооборотные дизели с частотой вращения до  $180 \text{ мин}^{-1}$ . Они используются для прямой передачи мощности на ВФШ или ВРШ. Основные показатели современных судовых малооборотных двигателей: удельная масса  $20 \div 35 \text{ кг/кВт}$ , агрегатная мощность до  $100 \text{ МВт}$ , удельный расход топлива  $150 \div 170 \text{ г/кВт}\cdot\text{час}$ , удельный расход масла на угар  $0,4 \text{ г/кВт}\cdot\text{час}$ .

Основными производителями судовых малооборотных дизелей являются фирмы **MAN-B&W**, **New Sulzer Diesel** (часть корпорации **Wärtsilä NSD**, Финляндия) и **Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.** Технические характеристики двух типов судовых дизелей фирмы **MAN-B&W** приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Дизели фирмы **MAN-B&W**

Тип дизеля	Число цилиндр	Макс. длит. мощность (кВт)	Частота вращения (об/мин)	Уд. расход топлива (г/кВт.час)
S50MC-C	4	6 320	127	171
	5	7 900		
	6	9 480		
	7	11 060		
	8	12 640		
S60MC-C	4	9 020	105	170
	5	11 275		
	6	13 530		
	7	15 785		
	8	18 040		

**Классификация дизелей.** По назначению судовые дизели разделяются на *главные*, передающие мощность на движитель судна, и *вспомогательные*, работающие на привод вспомогательных механизмов (дизель-генераторы, дизель-компрессоры и др.). По изменению направления вращения коленчатого вала двигатели делятся на *реверсивные*, у которых направление вращения изменяется специальным устройством, и *нереверсивные* с постоянным направлением вращения вала. В зависимости от частоты вращения коленчатого вала различают: *малооборотные* (до 350 об/мин), *среднеоборотные* (350-750 об/мин) и *высокооборотные* (750-2500 об/мин) двигатели. По способу осуществления рабочего цикла судовые дизели бывают *двухтактными* и *четырёхтактными*. У первых рабочий цикл происходит за два хода поршня, а у вторых – за четыре. По исполнению кривошипно-шатунного механизма дизели классифицируют на *крейцкопфные* и *тронковые*. В зависимости от способа наполнения цилиндра дизели бывают *без наддува*, когда всасывание воздуха осуществляется поршнем, и *с наддувом*, когда воздух в цилиндр подается под давлением, создаваемым специальным компрессором. Все современные судовые двигатели внутреннего сгорания имеют наддув. Это позволяет получить большую эффективную мощность на выходе.

**Режимы работы.** В работе дизеля выделяют несколько режимов. Из них отметим только два: *максимальный длительный* и *крейсерский*. *Максимальным длительным* называют режим двигателя с

наибольшей (при оговоренных внешних условиях) мощностью, при которой предприятие-изготовитель гарантирует надежную работу двигателя в течение длительного времени. Этот режим именуют также *номинальным*. Параметры работы двигателя в этом режиме называются максимальными длительными или номинальными. Например, *максимальная длительная мощность двигателя, номинальное число оборотов*. **Крейсерский режим работы** – это режим, используемый при выполнении рейсов с пониженной по сравнению с номинальным режимом мощностью. В нем гарантируется надежная работа двигателя в течение всего его срока службы без ограничения длительности непрерывной работы. Для крейсерского режима характерно близкое к минимуму значение отношения потребной мощности к скорости хода. КПД винта у судов с ВФШ в стандартных условиях (тихая погода, глубокая неограниченная акватория, и т.д.) в крейсерском режиме максимальный. Параметры работы двигателя в этом режиме называются крейсерскими. Например, *крейсерская мощность двигателя, крейсерское число оборотов*. Этот режим называют и **длительным эксплуатационным**. Его определяют как режим работы двигателя с пониженной (порядка на 5÷20% от номинальной) мощностью, на котором двигатель должен надежно работать весь срок службы. Эксплуатационная мощность зависит от условий плавания судна и состояния подводной части его корпуса.

**Параметры и характеристики двигателя.** *Параметры работы двигателя* характеризуют эффективность и экономичность его функционирования, тепловую и динамическую напряженность деталей и другие свойства. Эти параметры могут изменяться в зависимости от условий работы. Важными параметрами работы двигателя являются его мощность, часовой/суточный и удельный расход топлива, число оборотов и ряд других.

**Максимальная длительная мощность** (МДМ) указывается в паспорте двигателя и характеризует наибольшую мощность, которую можно получить на рабочем валу двигателя и использовать длительное время без угрозы выхода его из строя вследствие перегрузки. В течение одного часа дизели должны развивать *максимальную (кратковременную) мощность*, составляющую 110% МДМ. **Мощности для основных режимов переднего хода** устанавливаются в зависимости от МДМ. Режиму ППХ соответствует длительная эксплуатационная мощность (*крейсерская мощность*). Определяется также мощность ЗПХ и время, в течение которого допустима работа с этой мощностью на задний ход. Нагрузка двигателя в процентах от МДМ, выбираемая на судах для основных ходовых режимов,



составляет в среднем (согласно статистическим данным Регистра Ллойда) для разных типов судов значения, приведенные в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Нагрузка дизеля для ходовых режимов (% от МДМ)

Тип судна	ППХ	ПМХ	ПСМХ
Балкеры и танкера	80	40	20
Сухогрузы	80	35	20
Пассажирские суда	80	20	10
Контейнеровозы/РоРо/Реф.суда/Автомобилевозы	80	30	15

В зависимости от указанных выше мощностей для спокойных условий устанавливается *максимальная длительная частота вращения, частоты вращения для основных режимов хода*, а также *минимальная рабочая частота вращения и частота, соответствующая мощности ЗПХ*.

**Максимальная частота вращения** определяется как наибольшее допустимое при эксплуатации число оборотов коленчатого вала дизеля в единицу времени. **Минимальная рабочая частота** – это устойчивая наименьшая частота вращения коленчатого вала дизеля под нагрузкой, допустимая в эксплуатации. На этой частоте не произойдет непредусмотренной остановки дизеля при управлении движением судна на малых скоростях хода. Она составляет порядка  $0,2 \div 0,25$  крейсерской частоты. Среди частот вращения еще выделяют, так называемые, **критические (резонансные) обороты**. Под ними понимается частота вращения двигателя, совпадающая с частотой свободных колебаний вала. В результате такого совпадения возникает резонанс, вызывающий усиление крутильных колебаний вала. Оно может повлечь за собой негативные последствия, включая поломку вала. Сущность этого явления заключается в том, что от вспышек топлива в цилиндрах двигателя, а также в результате действия инерционных сил поступательно движущихся частей двигателей и от неравномерности потока в диске гребного винта, в линии гребного вала возникают вынужденные периодические колебания. Но гребной вал, вследствие упругости, имеет свои свободные колебания. Когда число собственных колебаний гребного вала совпадет с частотой внешних силовых импульсов, возникают скручивающие усилия, намного превышающие нормальные.

Эффективность рейса существенно зависит от стоимости затраченного на переход топлива. Поэтому важными параметрами двигателя являются *часовой и удельный расход* топлива. Под **часовым расходом топлива** понимается количество потребляемого двигателем

топлива за час. **Удельный расход** – это количество топлива, расходуемого в двигателе за единицу времени, приходящееся на единицу развиваемой двигателем мощности. Он обычно определяется как отношение часового расхода топлива в граммах к мощности двигателя в кВт. Удельный расход топлива является важнейшим показателем, характеризующим экономичность двигателя и судна в целом. Он зависит от типа двигателя, скорости хода, внешних условий и некоторых других факторов.

**Характеристики двигателя.** Характеристика двигателя – это зависимость какого-либо основного показателя (показателей) работы двигателя от другого его показателя или от фактора, влияющего на работу двигателя. Обычно она отражает, как на основные показатели работы двигателя, в первую очередь его мощность и эффективный удельный расход топлива, влияет изменение других показателей работы двигателя или определенных факторов, в первую очередь числа оборотов двигателя, скорости хода, давления наддува и т.д. Среди характеристик двигателя выделяют скоростные (внешние, винтовые, ограничительные), регуляторные и нагрузочные [22].

**Скоростные характеристики** отражают зависимость основных параметров рабочего процесса двигателя от частоты его вращения. Ограничительные характеристики двигателя определяют допустимую область состояния двигателя по условиям обеспечения надежной его работы без перегрузок или с некоторой заранее установленной степенью и продолжительностью перегрузок.

Зависимости, характеризующие работу всережимного регулятора частоты при данной его настройке, и отражающие зависимость частоты вращения вала дизеля от его мощности, среднего эффективного давления и ряда других параметров, называются **регуляторными**.

Под **нагрузочными характеристиками** понимают зависимость основных показателей рабочего процесса дизеля от его нагрузки при постоянной частоте вращения.

**Основные требования к дизельным установкам.** ГОСТ 10150-88 России определено, что главные судовые дизели должны надежно работать при температуре: забортной воды от  $-2^{\circ}\text{C}$  до  $32^{\circ}\text{C}$ , наружного воздуха – от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $45^{\circ}\text{C}$ , воздуха в машинном отделении – от  $5^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ , а также при крене/дифференте кратковременном – до  $45^{\circ}/10^{\circ}$ , длительном – до  $15^{\circ}/5^{\circ}$ . Минимальная устойчивая частота вращения дизеля под нагрузкой не должна превышать 30% номинальной частоты. Допускаемое время непрерывной работы на этой частоте должно быть не менее 4-х часов при прямой передаче мощности на

винт и 3-х часов – при передаче через редуктор. Главные реверсивные дизели должны устойчиво работать на заднем ходу при мощности не менее 85% номинальной. Продолжительность реверсирования дизеля с малого хода судна не должна превышать 15 с. Зоны критических оборотов главного дизеля должны отстоять не менее чем на 3% от минимально устойчивой и крейсерской частот вращения.

**Согласно СОЛАС-74** главные и все вспомогательные механизмы, необходимые для обеспечения движения и безопасности судна, должны иметь такую конструкцию, чтобы после установки надежно работать как при положении судна на ровном киле, так и при крене до 15<sup>0</sup> включительно при статических условиях, при бортовой качке до 22,5<sup>0</sup> включительно (динамические условия), при одновременной бортовой качке (до 22,5<sup>0</sup>) и килевой качке (до 7,5<sup>0</sup> включительно). Администрация может допускать отклонения от этих значений, принимая во внимание тип, размеры и условия эксплуатации судна.

**Вспомогательные системы главных дизелей.** Для обеспечения рабочего процесса дизеля применяются специальные системы: топливная, масляная, охлаждения, пуска, реверса и управления.

**Топливная система** служит для приема топлива, подготовки его к сжиганию и подачи в цилиндры в необходимой дозировке. **Масляная система** предназначена для подачи смазочного масла на трущиеся поверхности деталей движения и для охлаждения этих деталей. **Система охлаждения** обеспечивает отвод избытка теплоты от деталей цилиндропоршневой группы и других узлов.

**Пусковая система** служит для первоначальной раскрутки дизеля сжатым воздухом до определенной пусковой частоты вращения, при которой возможно надежное воспламенение топлива, подаваемого в цилиндры. Пуск дизеля сжатым воздухом широко применяется на крупных дизелях. Основными элементами пусковой системы сжатого воздуха являются компрессоры (не менее двух), баллоны сжатого воздуха (не менее двух), трубопроводы, главный пусковой (маневровый) клапан, воздухораспределитель, и пусковые клапаны на цилиндрах дизеля. По правилам Регистра вместимость каждого пускового баллона главного дизеля (без подкачивания воздуха) должна обеспечивать 12 пусков реверсивного дизеля и 6 пусков нереверсивного из холодного состояния. Заполнение пусковых баллонов сжатым воздухом производится компрессорами.

**Система реверсирования** служит для смены направления вращения гребного ВФШ с целью изменения направления движения судна с переднего на заднее и наоборот. Реверсирование включает остановку дизеля, изменение положения распределительного вала и

запуск дизеля на обратный ход. Если дизель при реверсировании не отключается от гребного вала, то должна учитываться его тормозная характеристика, так как запуск на обратный ход может производиться, только когда создаваемый сжатым воздухом момент превышает момент вращающихся масс двигателя. Реверсирование начинается со снятия с дизеля нагрузки путем выключения подачи топлива. При этом дизель продолжает вращаться за счет инерции своих вращающихся масс и действия потока воды, вращающего гребной винт в прежнем направлении (работа винта в турбинном режиме). Уменьшение частоты вращения двигателя при этом происходит довольно медленно. Этот процесс, называемый *свободным выбегом двигателя*, может занимать время до нескольких минут. С целью сокращения времени реверса после отсечения топлива применяют торможение дизеля контрвоздухом от пусковой системы, т.е. сжатым воздухом, препятствующим вращению. Для снижения оборотов на некоторых судах применяются также специальные механические тормозные устройства. Процесс уменьшения частоты вращения дизеля после выключения подачи топлива с применением специальных мер для его торможения называют *ограниченным выбегом дизеля*.

Запуск большинства главных судовых дизелей на ЗХ с ППХ возможен лишь тогда, когда частота вращения вала снизится на 25÷35% от частоты ППХ. При свободном выбеге дизеля это соответствует снижению скорости хода судна до значения 60÷70% от скорости ППХ. В результате процесс реверсирования дизеля с полного переднего хода затягивается. Когда частота вращения гребного вала, приводимого в движение попутным потоком, снизится до требуемой величины, дизель запускается в обратном направлении. Для этого открывается главный пусковой клапан. Под действием пускового воздуха двигатель раскручивается в заданном направлении вращения. После достижения определенной частоты вращения начинается подача топлива и работа на нем двигателя, главный пусковой клапан закрывается. С малого переднего хода процесс запуска дизеля на ЗХ может начинаться сразу после отсечения подачи топлива.

Реверс с полного и среднего хода при свободном выбеге двигателя называется *нормальным*. Реверс с полного и среднего хода при ограниченном выбеге дизеля носит название *ускоренного*. Самый быстрый по возможностям дизеля реверс – *экстренный (аварийный)*. Такой реверс с ППХ на ЗПХ (маневр «крэш-стоп») сопровождается резким ростом давления в цилиндрах дизеля, стуками от чрезмерных механических воздействий, подрывом предохранительных клапанов.

Такой реверс неблагоприятен для дизеля и, по возможности, его надо избегать. Выбег судна при экстренном реверсе наименьший.

**Система управления двигателем** служит для обеспечения его пуска, остановки, изменения эксплуатационной мощности, поддержания заданного режима хода, реверсирования и текущего контроля работы. Системы управления двигателем могут быть неавтоматизированными и с разной степенью автоматизации. Наиболее совершенными из них в настоящее время являются электронные системы дистанционного автоматического управления главным двигателем (СДАУ<sub>ГД</sub>) на судах с классом автоматизации А1 (безвахтенное обслуживание машинного отделения). Независимо от наличия дистанционных систем управления главные судовые двигатели должны иметь органы местного (аварийного) управления, расположенные непосредственно на дизеле, и комплектоваться приборами текущего контроля параметров.

Изменение состояния двигателя при работе происходит под действием управляющих сигналов и воздействий среды. Поэтому при выборе управляющих воздействий и при изменении внешних условий необходимо, чтобы состояние двигателя при работе находилось в допустимых пределах. Также следует учитывать, что в одних условиях эффективность работы двигателя оценивается *быстротой отработки* сигналов управления, а в других – *экономичностью*, характеризуемой величиной расхода топлива. В неавтоматизированных и частично автоматизированных системах управления двигателем команды судоводителя об изменении режима хода преобразует в последовательность допустимых и эффективных команд управления двигателем механик, хорошо знающий особенности работы двигателя. В частично автоматизированных дизельных установках средства автоматики обычно применяются на уровне воздействий (управления приводами насосов, золотниками, вентилями и др.). Так, ряд находящихся в эксплуатации дизельных установок оборудованы автоматическими регуляторами частоты вращения вала, температуры воды, масла и надувочного воздуха, автоматическими регуляторами уровня топлива в расходной цистерне и др.

Одной из решаемых средствами автоматики задач является сохранение заданной частоты вращения вала двигателя. Работа двигателя при одной частоте вращения является устойчивой, так как изменение его эффективного крутящего момента в общем случае влечет соответствующее изменение момента сопротивления. Момент сопротивления вращению двигателя не остается постоянным при изменении внешних условий. Он возрастает при плавании на

мелководье и во льдах, в условиях волнения, при обрастании корпуса. Это приводит к уменьшению частоты вращения винта. В ряде случаев момент сопротивления может резко упасть, например, при оголении винта в штормовую погоду. В результате двигатель может развить частоту вращения, превышающую допустимую. Поэтому судовые двигатели снабжаются автоматическими регуляторами для сохранения заданной частоты вращения при изменении нагрузки. Такие регуляторы бывают однорежимными (предельными), двухрежимными и всережимными.

*Всережимный регулятор* при изменении нагрузки на гребном винте стремится изменением подачи топлива сохранить скорость вращения вала постоянной. *Предельный регулятор* оказывает влияния на двигатель путем уменьшения подачи топлива только при возрастании частоты вращения вала до предельно допустимых максимальных значений. *Двухрежимный регулятор* уменьшает подачу топлива на двигатель, когда его частота возрастает до максимально допустимой, и увеличивает подачу топлива, когда частота вращения снижается до минимального допустимого значения. При увеличении нагрузки на гребном винте частота вращения гребного вала установки с предельным регулятором уменьшается, а с всережимным регулятором остается практически неизменной.

Дизели имеют также автоматические регуляторы температуры надувочного воздуха и жидкостей в системах охлаждения и смазки.

Частично автоматизированные дизельные установки оборудуются системой аварийно-предупредительной сигнализации с числом контролируемых параметров 3÷5 (давление в системе смазки, температура воды на выходе из системы охлаждения двигателя и др.) и системой защиты от аварий при достижении предельных значений вращения коленчатого вала, при падении давления масла в системе смазки, при повышении температуры охлаждающей воды и масла в системе смазки сверх допустимых значений.

**В СДАУ<sub>ГД</sub> необслуживаемых машинных установок** управление работой главных двигателей полностью автоматизировано [14]. Сами двигатели также «подготовлены» к такому управлению и приспособлены для оборудования микропроцессорными системами управления, регулирования, контроля, диагностирования. Они содержат встроенные датчики, информация которых необходима при организации автоматического управления и контроля, а также электронные устройства управления на уровне элементарных процессов. Современные СДАУ<sub>ГД</sub> являются интегрированными электронными системами, включающими ряд взаимосвязанных

подсистем. Они выполняют определенные функции. Например, *электронная подсистема маневрирования* осуществляет пуск, остановку и выбор эффективных режимов работы двигателя при изменении его мощности. *Электронный регулятор* поддерживает заданную частоту вращения вала двигателя. *Электронная подсистема защиты двигателя* ограждает двигатель от неправильных действий судоводителя, от перегрузок и поломок. Неправильные действия судоводителя с органами управления двигателем блокируются этой подсистемой и не приводят к поломкам. *Подсистема мониторинга и аварийно-предупредительной сигнализации* выявляет неполадки, производит их диагностику, сигнализирует о нарушениях в работе двигателя и осуществляет мониторинг его работы.

Современные СДАУ<sub>ГД</sub> являются компьютерными системами управления с тремя-пятью уровнями иерархии. Более подробно эти системы рассмотрены в главе 9.

### 4.3. Основные характеристики двигателя как объекта управления

Зависимости между управляющим входным сигналом двигателя и его выходными кинематическими параметрами называются характеристиками управления. Ниже они представляются с точностью, достаточной для судовождения. Использование более детального математического описания в этих целях является излишним, так как в большинстве задач управления судном процесс изменения частоты вращения вала с одного значения на другое (исключая реверс) может считаться мгновенным. Основными, с точки зрения управления движением судна, кинематическими параметрами двигателя являются частота вращения гребного винта  $n$  и скорость ее изменения  $\eta = \dot{n}$ .

**Статические характеристики** связывают значение установившейся частоты вращения двигателя с положением органа, управляющего подачей энергоносителя. Положение  $Z$  этого органа определяет частоту вращения винта. Максимальное значение  $Z$  представим, как  $Z_{mx}$ . Отвечающую  $Z$  частоту вращения двигателя обозначим  $\bar{n}$ , а соответствующую  $Z_{mx}$  –  $\bar{n}_{mx}$ . Здесь и ниже черта над обозначением параметра показывает, что это его значение в установившемся режиме. Чтобы не зависеть от принятой размерности величины  $Z$ , положение задающего подачу энергоносителя органа охарактеризуем безразмерной величиной  $Z/Z_{mx}$ .

В общем случае частота  $\bar{n}$  зависит от нагрузки на валу двигателя, а, следовательно, и от скорости  $V$  судна. Поэтому  $\bar{n}$  и  $\bar{n}_{mx}$  могут рассматриваться как функции  $V$ . Отношение  $\bar{n}(V)/\bar{n}_{mx}(V)$  от скорости зависит мало и приближенно может считаться только функцией  $Z/Z_{mx}$ . Для упрощенной характеристики установившегося режима работы двигателя используются зависимости  $\bar{n}_{mx}(V)$  и  $\bar{n}/\bar{n}_{mx} \approx \vartheta(Z/Z_{mx})$ . По ним всегда можно установить  $\bar{n}(V)$  для заданной скорости движения судна:

$$\bar{n}(V) = \vartheta(Z/Z_{mx}) \cdot n_{mx}(V). \quad (4.1)$$

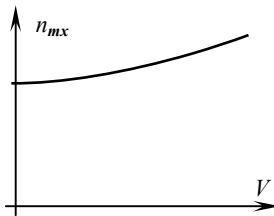


Рис. 4.3. Статическая характеристика  $\bar{n}_{mx}(V)$

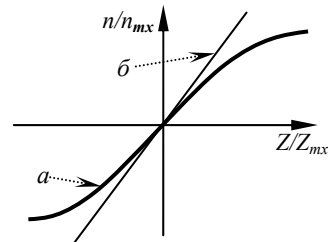


Рис. 4.4. Зависимость  $\bar{n}/\bar{n}_{mx} \approx \vartheta(Z/Z_{mx})$

**Статические характеристики**  $\bar{n}_{mx}(V)$ ,  $\bar{n}/\bar{n}_{mx} \approx \vartheta(Z/Z_{mx})$  показаны на рис. 4.3, 4.4, где *a*) – зависимость для дизельных ГДУ, *б*) – для ПГДУ.

**Переходные характеристики двигателей.** Переходной процесс ГД представляет собой изменение во времени его кинематических параметров при переходе от одной установившейся частоты вращения к другой. Различают изменения режима работы двигателя без реверса двигателя и с ним.

**Переходные процессы без реверса** наблюдаются при запуске и остановке двигателя, изменении его мощности при работе. Процесс увеличения/снижения частоты вращения называется *разгоном/торможением двигателя*. Длительность этих процессов зависит от типа двигателя, массы его вращающихся частей, состояния установки и элементов движения судна. В ПГДУ при разгоне турбины из-за возникающих тепловых напряжений и деформаций частота вращения вала в верхнем диапазоне может нарастать значительно медленнее, чем в области малых значений. Чтобы термические нагрузки сохранялись в допустимых пределах, разгон в ПГДУ осуществляется



по специальной программе. При использовании СДАУ<sub>ГД</sub> запуск, разгон, торможение, реверсирование и остановка двигателя производятся в соответствии с программами, которые учитывают текущее состояние двигателя и характер движения судна.

Двигатель представляет собой сложную нелинейную систему с большим количеством элементов. Для управления судном значение имеют лишь связи между входными и выходными величинами двигателя. По изменению частоты вращения *двигатель упрощенно может рассматриваться как построенная по принципу обратной связи система, следящая за задаваемой частотой вращения вала* (рис. 4.5, где ИУ – условно выделенное исполнительное устройство).

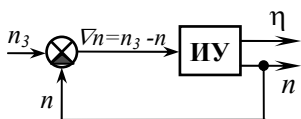


Рис. 4.5. Упрощенная схема двигателя

При ручном управлении подаваемое на двигатель задающее воздействие  $n_3$  равно значению  $n_{3B}$ , устанавливаемому оператором с помощью телеграфа. При управлении с помощью СДАУ<sub>ГД</sub> по внешней команде  $n_{3B}$ , образуется внутреннее (программное) задающее

воздействие  $n_3$ , которое изменяется от старого до нового  $n_{3B}$  значения, согласуясь с внутренними рабочими критериями. На двигатель подается программно-изменяемое внутреннее воздействие.

Работа двигателя с помощью приведенной схемы может быть представлена следующим образом. При управлении скоростью сигнал, определяющий заданное значение  $n_3$  частоты вращения винта, поступает на ИУ. Оно начинает его обрабатывать, изменяя частоту вращения двигателя. Сигнал, характеризующий действительную частоту вращения двигателя, поступает на компенсацию задающего сигнала. Когда текущее значение  $n$  частоты вращения вала двигателя станет равным  $n_3$ , сигнал на входе ИУ будет нулевым и обработка заданного значения прекратится. Как видно из схемы, управляющий работой ИУ сигнал равен  $\nabla n = n_3 - n$ .

Наиболее важными переходными характеристиками процессов разгона и торможения двигателя являются зависимости:

$$n_{\Pi}(t) = f_{\eta}[1(t)\nabla n]; \quad n_{\Pi}(t) = f_n[1(t)n_3]. \quad (4.2)$$

В этих выражениях  $1(t)$  – единичная ступенчатая функция:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

**Переходная функция**  $\eta_{\Pi}(t)$  отражает реакцию двигателя как разомкнутой системы по ускорению  $\eta$  вращения в ответ на ступенчатое изменение  $\nabla n$ . **Переходная функция**  $n_{\Pi}(t)$  характеризует двигатель как замкнутую систему. Она представляет его реакцию по частоте вращения винта на ступенчатое изменение  $n_3$ .

ИУ при входном сигнале  $\nabla n$  и выходном  $\eta$  упрощенно считается *реальным пропорциональным звеном*. Сигнал на выходе такого звена пропорционален входному сигналу, но изменение выходного сигнала по отношению к изменению входного происходит с небольшим запаздыванием. Переходной процесс в реальном пропорциональном звене описывается дифференциальным уравнением:

$$T_{\eta} \dot{\eta} + \eta = k_{\eta} \nabla n; \quad (4.4)$$

где  $k_{\eta}$  – передаточный коэффициент ИУ;  $T_{\eta}$  – постоянная времени ИУ, отражающая влияние инертности вращающихся масс двигателя.

Значение  $T_{\eta}$  двигателя мало и находится в пределах 1÷10 с. Обычно, чем больше масса вращающихся частей двигателя, тем больше его постоянная времени. У крупнотоннажных судов  $T_{\eta}$  составляет 8÷10 с. Естественно, как учитывать протекающие в ГДУ процессы, зависит от решаемой задачи управления. Там, где влиянием инертности вращающихся масс двигателя можно пренебречь, скорость изменения частоты вращения винта считается пропорциональной  $\nabla n$ . При решении других задач значение  $\eta$  принимается постоянным. В третьих случаях полагают, что изменение частоты вращения двигателя происходит мгновенно.

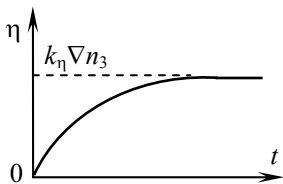


Рис. 4.6. Функция  $\eta_{\Pi}(t)$

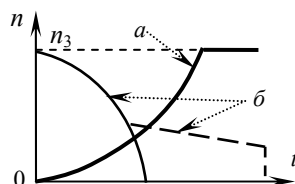


Рис. 4.7. Функция  $n_{\Pi}(t)$

Исходя из (4.4), можно получить выражение  $\eta_{\Pi}(t)$

$$\eta_{\Pi}(t) = k_{\eta} \nabla n_3 [1 - \exp(-\frac{t}{T_{\eta}})]. \quad (4.5)$$

Вид этой переходной функции представлен на рис. 4.6.

Из (4.4) также следует, что процесс изменения частоты вращения двигателя упрощенно, но с достаточной для судовождения точностью, описывается уравнением

$$T_{\eta} \ddot{n} + \dot{n} + k_{\eta} n = k_{\eta} n_3. \quad (4.6)$$

Переходные функции двигателя как замкнутой системы ( $a$  – при разгоне,  $b$  – при торможении двигателя) в упрощенном виде показаны на рис. 4.7. При торможении двигателя, когда винт начинает вращаться в турбинном режиме, число оборотов с запозданием приходит к заданному значению. В этом случае реальная переходная функция включает участок турбинного режима винта. На графике он показан пунктиром. Остановка винта происходит на скорости хода 4÷5 узлов.

**Переходные процессы, включающие реверс двигателя,** являются более сложными, чем разобранные выше. В **дизельных установках** реверс состоит из трех этапов: торможения дизеля до его остановки, запуска двигателя на обратный ход, разгона до заданной частоты вращения. Для *остановки дизеля* выключается подача топлива. Затем изменяется положение распредвала, в результате чего фазы воздухо- и газораспределения устанавливаются для работы двигателя в другом направлении. После этого производится *выдержка времени*, продолжающаяся до тех пор, пока частота вращения гребного винта, приводимого в движение попутным потоком, не снизится до определенной величины. Для *запуска дизеля* открывается клапан пускового воздуха. Под действием пускового воздуха двигатель раскручивается в заданном направлении вращения. После запуска начинается *разгон двигателя*. Для этого орган подачи топлива устанавливается в положение, соответствующее выбранному ходу. Двигатель начинает работать на топливе, закрывается главный клапан пускового воздуха, и двигатель постепенно выходит на заданную частоту вращения.

**В паротурбинных установках** при реверсировании закрываются клапана подвода пара на сопла турбины переднего хода, и открывается подача пара на турбину заднего хода. Для плавности перехода вращения гребного вала с одного направления на другое предусмотрено взаимное перекрытие процессов открывания и закрывания паровпускных клапанов названных турбин. Этим достигается определенное сокращение времени реверса. С целью предотвращения толчков, а, следовательно, и возможности

повреждения главного упорного подшипника, в процессе реверсирования момент турбины противоположного направления, необходимый для торможения гребного винта, создается с учетом градиента упора. После достижения определенного значения частоты вращения гребного винта производится разгон ротора турбины в противоположном направлении вращения до заданной величины.

Реверс в ПГДУ с полного переднего хода выполняется значительно быстрее, чем в ДГДУ, обычно не более, чем за 1 мин. Однако мощность турбины заднего хода равна 40÷50% мощности турбины переднего хода, а мощность дизеля на заднем ходу составляет не менее 85% мощности переднего хода. Поэтому *тормозные пути с полного и среднего ходов у теплоходов и турбоходов примерно одинаковы*. При торможении с малых ходов тормозные характеристики турбоходов из-за малой мощности турбины заднего хода хуже, чем у теплоходов.

**Математическое представление процесса реверсирования двигателя.** Реверсирование дизельной и паротурбинной ГДУ упрощенно представляются тремя этапами:

- снижения частоты вращения гребного винта до нуля или до наступления момента его вращения в турбинном режиме (изменение частоты вращения на этом этапе описывается уравнением 4.4.);
- перехода на вращение двигателя в противоположном направлении, включая: для ДГДУ – временную выдержку по снижению частоты вращения вала до значения, при котором может быть выполнен запуск дизеля на противоположный ход; для ПГДУ – время перехода на турбину заднего хода; и для обоих видов ГДУ – время запуска двигателя на противоположное направление вращения. При математическом представлении частота вращения двигателя на этом этапе считается равной нулю;
- разгона двигателя до требуемой частоты вращения. На этом этапе работа двигателя снова описывается уравнением 4.4.

Таким образом, процесс реверсирования сводится, по существу, к разобранным выше процессам торможения и разгона двигателя.

#### 4.4. Механизм поворота лопастей ВРШ

**Общие сведения.** Главные движительные устройства с ВРШ могут быть двух видов. В одних ГДУ частота вращения гребного вала постоянна, и переход на другой режим хода производится только изменением угла  $\theta$  лопастей гребного винта. Учитывая, что работа

ВРШ при неизменной частоте вращения гребного вала связана с определенными экономическими потерями, используются также ГДУ, которые обеспечивают заранее выбранную жесткую связь между положением лопастей и частотой вращения винта. В этих устройствах скорость судна меняется за счет поворота лопастей ВРШ и изменения частоты его вращения, однако, без реверсирования двигателя. Такие ГДУ могут иметь один задающий орган, положение которого  $Z$  определяет как угол лопастей  $\theta_3$ , так и частоту  $n_3$  вращения винта, либо отдельные органы для назначения  $\theta_3$ ,  $n_3$  в отдельности.

Лопастей ВРШ с помощью специального механизма можно разворачивать на ходу судна от шагового угла ППХ хода, до угла ЗПХ с обеспечением возможности фиксации лопастей в любом промежуточном положении. От значения нулевого упора угол разворота лопастей ВРШ составляет порядка  $30\div 40^0$  в направлении увеличения упора винта на передний ход, и  $20\div 30^0$  в обратном направлении. Механизмы разворота лопастей ВРШ весьма разнообразны. Принцип их действия состоит в том, что осевым перемещением или вращением специальной штанги, расположенной внутри полого гребного вала и связанной механической передачей с лопастями, обеспечивается разворот лопастей на заданный угол.

**Основными кинематическими параметрами** механизма поворота лопастей являются шаговый угол  $\theta$  и скорость его изменения  $\xi = \dot{\theta}$ . Максимальную скорость, обеспечиваемую рассматриваемым механизмом, обозначим  $\xi_{mx}$ .

**Обобщенная структурная схема.** Для судовождения при анализе работы механизма поворота лопастей ВРШ существенна лишь связь между его входной и выходной величинами. Обобщенно механизм поворота лопастей ВРШ можно рассматривать как построенную по принципу обратной связи систему, следящую за задаваемым углом лопастей. Упрощенно ее можно представить схемой (рис. 4.8), на которой ИМ – условно выделенный исполнительный модуль механизма поворота лопастей.

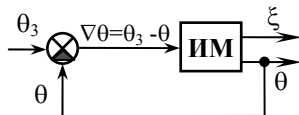


Рис. 4.8. Упрощенная схема механизма поворота лопастей

Работа механизма поворота лопастей с помощью приведенной схемы может быть пояснена следующим образом. При управлении скоростью судна сигнал, определяющий заданное значение  $\theta_3$  угла лопастей, поступает на ИМ.

Исполнительный модуль начинает обрабатывать  $\theta_3$ . При изменении шага винта сигнал, характеризующий его текущее значение  $\theta$ , поступает на компенсацию задающего сигнала. Когда текущее значение  $\theta$  сравняется с  $\theta_3$ , сигнал на входе ИМ станет нулевым, и обработка  $\theta_3$  прекратится. Как видно из схемы, управляющий работой ИМ сигнал равен  $\nabla\theta = \theta_3 - \theta$ .

**Основной статической характеристикой** механизма поворота лопастей ВРШ является зависимость скорости  $\xi = \dot{\theta}$  изменения шага винта от сигнала  $\nabla\theta$  на входе ИМ. В установившемся режиме она имеет вид, показанный на рис. 4.9, где  $\nabla\theta_H$  – это значение  $\nabla\theta$ , при котором наступает насыщение. В

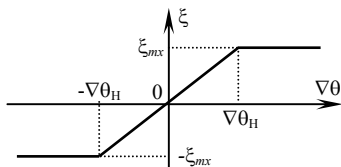


Рис. 4.9. Статическая характеристика  $\bar{\xi}(\nabla\theta)$

диапазоне от  $-\nabla\theta_H$  до  $+\nabla\theta_H$  значения  $\bar{\xi}$  пропорциональны  $\nabla\theta$ :  $\bar{\xi} = k_\xi \nabla\theta$ . Значение  $\xi_{mx}$  составляет порядка  $1 \div 5$   $^{\circ}/с$ , а коэффициент  $k_\xi = 0,5 \div 1,0$ . Обычно скорость разворота лопастей тем меньше, чем больше масса винта. У ВРШ

крупнотоннажных судов скорость разворота лопастей составляет порядка  $1^{\circ}/с$ . Если принять

$$\widehat{\nabla\theta} = \begin{cases} \nabla\theta & \text{при } |\nabla\theta| \leq \nabla\theta_H; \\ \nabla\theta_H & \text{при } \nabla\theta > \nabla\theta_H; \\ -\nabla\theta_H & \text{при } \nabla\theta < -\nabla\theta_H. \end{cases} \quad (4.7)$$

то для всего диапазона изменения  $\nabla\theta$  можно записать

$$\bar{\xi} = k_\xi \widehat{\nabla\theta}. \quad (4.8)$$

**Переходные характеристики.** Наиболее важными переходными характеристиками механизма поворота лопастей ВРШ являются:

$$\xi_{\Pi}(t) = f_\xi[1(t)\nabla\theta]; \quad \theta_{\Pi}(t) = f_\theta[1(t)\theta_3].$$

Переходная функция  $\xi_{\Pi}(t)$  характеризует механизм поворота лопастей как разомкнутую систему. Она описывает реакцию ИМ по  $\xi$  на ступенчатое изменение  $\nabla\theta$ . Переходная функция  $\theta_{\Pi}(t)$  отражает реакцию механизма поворота лопастей как замкнутой системы на

ступенчатое изменение  $\theta_3$ . Вид названных переходных функций представлен на рис. 4.10 и 4.11.

Процесс разворота лопастей ВРШ приближенно описывается уравнением:

$$T_\xi \dot{\xi} + \xi = k_\xi \nabla \theta, \quad (4.9)$$

где  $T_\xi \approx 1 \div 3$  с – постоянная времени ИМ.

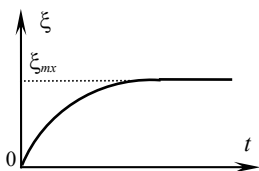


Рис. 4.10. Переходная функция  $\xi_{\Pi}(t)$

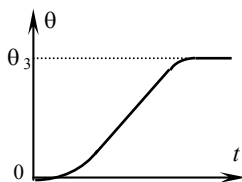


Рис. 4.11. Переходная функция  $\theta_{\Pi}(t)$

Для упрощения принимают скорость отработки шагового угла пропорциональной  $\nabla \theta$ , либо постоянной и равной  $\xi_{mx}$ . Поскольку продолжительность изменения режима движения судна существенно больше  $T_\xi$ , отработку  $\theta_3$  часто считают мгновенной.

## 4.5. Гребные винты и их геометрические характеристики

**Типы гребных винтов.** Гребной винт по принципу действия является гидрореактивным. Он создает силу тяги за счет реактивного воздействия захватываемой им массы воды, которая затем отбрасывается в направлении, противоположном движению судна. На морских судах используются винты фиксированного и регулируемого шага. ВФШ применяются чаще, что объясняется более сложной конструкцией и меньшей надежностью ВРШ.

**ВФШ** являются высоко эффективными в расчетном режиме хода, обладают простотой конструкции и передачи мощности от двигателя, низкой стоимостью изготовления, надежностью в эксплуатации. Однако их ГДХ жестко зависят от режима работы главного двигателя, что затрудняет их совместную работу. В ГДУ с ВФШ для изменения направления хода необходим реверс двигателя. Так как частота вращения дизеля имеет нижний предел, то значения малых упоров в установках с ВФШ ограничены.

Изменение скорости судов с ВФШ производится изменением частоты его вращения. Эти гребные винты обычно «соответствуют» двигателю и имеют максимальный КПД в режиме ППХ в условиях глубокой спокойной воды. В других режимах хода, а также на волнении, на мелководье, во льдах ВФШ не позволяет наилучшим образом использовать мощность двигателя.

**ВРШ** – гребной винт со встроенным в ступицу гидравлическим механизмом поворота лопастей на различные углы относительно плоскости вращения для изменения тяговых характеристик винта. ВРШ улучшают маневренные качества судна. В частности, при их использовании сокращается порядка на 30÷40% время реверса и длина выбега судна, быстрее производится разгон из состояния покоя и при увеличении скорости хода. В движительных установках с ВРШ применяются нереверсивные двигатели. В результате ГДУ получаются проще, надежнее, с меньшими массой и габаритами. При соответствующем изменении шага ВРШ возможно наилучшим образом использовать мощность двигателей на разных режимах хода и создавать наибольшее тяговое усилие в различных условиях плавания судна (на волнении, мелководье, во льдах, при обрастании корпуса и т.д.). Для каждого ходового режима судна ВРШ дает возможность обеспечить максимальный КПД двигателя и минимальный расход топлива на милю. ВРШ не имеют ограничения при установке значений малых упоров.

К недостаткам ВРШ относится сложность конструкции. Из-за этого у них выше стоимость, больше вес, ниже надежность и несколько меньший КПД на расчетном режиме, чем у ВФШ. Последнее обстоятельство объясняется увеличением диаметра ступицы до 28÷30% диаметра винта, вместо 18÷22% у ВФШ, а также несколько измененной формы контура лопасти. Ниже рассматриваются характеристики ВФШ, так как этот тип гребных винтов наиболее распространен на гражданском флоте.

Основными **геометрическими характеристиками гребных винтов** являются: *число лопастей, диаметр –  $D_p$ , геометрический шаг –  $H_p$ , шаговый угол, направление вращения, шаговое отношение –  $H_p / D_p$ , дисковое отношение*. Число лопастей у ВФШ бывает от 2 до 8. За  $D_p$  винта принимают диаметр окружности, описываемой краями лопастей. У морских судов  $D_p = 2 \div 10$  м. Площадь круга с диаметром  $D_p$  называется **площадью диска винта** ( $S_{\otimes}$ ). Частное от деления суммарной площади спрямляемых поверхностей всех



лопастей на  $S_{\infty}$  – это **дисковое отношение винта**. Оно находится в пределах от 0,3 до 1,2.

Под **шаговым углом** понимается угол  $\theta_p$  наклона лопасти к плоскости диска винта. ВФШ может иметь лопасти постоянного и переменного шага. У первых ВФШ угол  $\theta_p$  всех элементарных участков лопасти одинаков, а у вторых – он изменяется в зависимости от расстояния элемента лопасти от оси (радиуса) и/или расстояния вдоль оси винта (винты радиально- и/или осепопеременного шага). **Геометрическим шагом ВФШ** с лопастями постоянного шага называется осевое расстояние, проходимое винтом за один оборот без проскальзывания. У винтов с лопастями радиально переменного шага геометрическим шагом считается шаг элемента лопасти на расстоянии 0,7 радиуса винта от его оси. На современных судах в преобладающем большинстве случаев используются ВФШ с лопастями постоянного шага, реже – радиально переменного шага. **Шаговым отношением** винта называется частное  $H_p / D_p$ . Оно находится в пределах 0,6÷1,8.

В формуляре маневренных характеристик судна указан тип винтов, их количество, диаметр, шаг, направление вращения, погружение (для судна в грузу и в балласте).

**Влияние геометрических характеристик винта на управляемость судна.** Из геометрических характеристик винта на управляемость судна по скорости влияет главным образом *шаговое отношение*. С его увеличением упор винта и потребляемая им мощность увеличиваются. Когда подводимая к винту мощность двигателя при соответствующей частоте вращения его вала равняется потребляемой винтом мощности, то винт соответствует двигателю и его КПД максимален. Когда подаваемая на винт мощность больше потребляемой, то винт называется *«легким»*, если наоборот – то *«тяжелым»*. ВФШ судна подбирают таким, чтобы на расчетной скорости он был согласован с двигателем.

Качество работы винта зависит и от других его параметров. *Количество лопастей* влияет на шумность винта и создаваемую им вибрацию корпуса. При увеличении числа лопастей эти негативные явления уменьшаются. *Дисковое отношение* и *форма профиля лопасти* в основном влияют на шумовые и кавитационные характеристики винта.

## 4.6. Кинематические и гидродинамические характеристики гребных винтов

К **основным кинематическим характеристикам** гребного винта относятся: частота вращения –  $n$ , угловая скорость –  $\omega_p$ , скорость поступательного перемещения –  $V_h$ , поступь –  $h$ , относительная поступь –  $\lambda_p$ , угол атаки лопасти –  $\gamma_d$ .

Перемещение элементарной части лопасти винта относительно водной среды может быть разделено на поступательное (вдоль его оси) и вращательное. Линейную скорость  $v_h$  в первом движении называют *осевой* либо *аксиальной*, а во втором ( $v_r$ ) – *радиальной* или *тангенциальной*. Последняя связана с расстоянием  $r$  от элемента лопасти до оси винта известным соотношением

$$v_r = \omega_p r = 2\pi n r .$$

Таким образом, скорость элемента лопасти относительно невозмущенной воды может быть представлена геометрической суммой аксиальной и радиальной составляющих.

Важнейшей характеристикой режимов работы винта является его относительная поступь. **Поступью**  $h$  гребного винта называется проходимое им вдоль осевой линии за один оборот расстояние относительно воды, а **относительной поступью** – отношение

$$\lambda_p = h / D_p = v_h / (n D_p) . \quad (4.10)$$

В воде поступь гребного винта меньше его шага и зависит от сопротивления воды движению судна. Скорость поступательного перемещения винта связана с  $h$ :

$$v_h = h \cdot n . \quad (4.11)$$

При отсутствии попутного потока  $v_h$  равняется продольной скорости судна  $V_L$ . Работа гребного винта характеризуется также *скольжением* – разностью между шагом винта и его поступью. Отношение этой разности к шагу винта называется *относительным скольжением*:  $S_p = 1 - h / H_p$ . Скорость движущегося без скольжения гребного винта равна  $v_H = H_p n$ .

**Угол атаки лопасти.** У винтов *постоянного шага* угол атаки  $\gamma_d$  неизменен по длине лопасти, но зависит от поступи винта. Когда у такого винта  $h = 0$ , то угол атаки равен шаговому углу лопасти. При

увеличении поступи угол атаки уменьшается, а когда  $h = H_p$  – угол атаки равен нулю. У винтов с переменным шагом на различных участках лопасти угол атаки разный. Поэтому здесь говорят об эквивалентном угле атаки ВФШ с постоянным шагом, при котором его упор равен упору, развиваемому винтом переменного шага.

**Основными ГДХ винта** являются создаваемая им в осевом направлении сила тяги  $P_U$  (полезный упор), сила упора изолированного винта –  $P_p$ , момент сопротивления вращению винта –  $M_p$ . Силой упора винта  $P_p$  называется проекция на осевое направление винта вектора геометрической суммы сил, возникающих на всех элементарных участках лопастей винта при вращении. Отличие силы тяги  $P_U$  от  $P_p$  состоит в следующем. Работающий гребной винт вызывает увеличение скоростей движения потока воды перед собой за счет засасывания воды. В результате возрастает скорость обтекания кормовой оконечности судна и возникает соответствующее понижение давления воды в районе кормы. По этой причине повышается сопротивление движению судна, т.е. в определенной мере уменьшается  $P_p$ . Величину такого снижения упора винта принято называть силой засасывания. Тяга винта  $P_U$  равняется разности между  $P_p$  и силой засасывания [23]:

$$P_U = P_p(1 - k_t),$$

где  $k_t$  – коэффициент силы засасывания.

**Моментом  $M_p$  сопротивления винта** называется сумма моментов сопротивления всех элементарных участков его лопастей. Момент сопротивления элементарного участка лопасти представляет собой произведение проекции на окружное направление гидродинамической силы, возникающей на этом участке, на расстояние этого участка от оси винта. ГДХ гребного винта зависят от его частоты вращения и поступи.

Частоте и шагу гребного винта, работающего на передний ход, ниже присваивается знак «плюс», а когда винт вращается в обратную сторону – то «минус». Поступь винта считается положительной, когда ее направление совпадает с направлением переднего хода судна, в противном случае она имеет знак «минус».

Значения  $P_p$ ,  $M_p$  можно рассчитывать по формулам [26]:

$$P_p = K_1 \rho \cdot n^2 D_p^4, \quad M_p = K_2 \rho \cdot n^2 D_p^5; \quad (4.12)$$

где  $K_1, K_2$  – коэффициенты упора и момента гребного винта;  $\rho$  – плотность воды. Для гребного винта из распространенной серии с данным числом лопастей, шаговым и дисковым отношениями коэффициенты  $K_1, K_2$  могут быть получены в зависимости от  $\lambda_p$  с помощью аппроксимирующих полиномов, коэффициенты которых можно найти в Справочниках по теории судна.

Изменение упора ВФШ и момента сопротивления его вращению в зависимости от  $h/H_p$  в реальном случае имеет характер, представленный на рис. 4.12. Учитывая приближенное равенство  $V_L \approx v_h$ , можно считать  $V_L/v_H \approx h/H_p$ . Скорость  $V_L$ , при которой упор винта достигает максимума, обозначена на рисунке  $V_m$ .

**Точка нулевого упора**  $0_p$  гребного винта обычно приходится на значение  $h/H_p$  большее единицы. Поступь винта, при которой его упор равен нулю, называется **шагом нулевого упора** –  $H_{p0}$ .

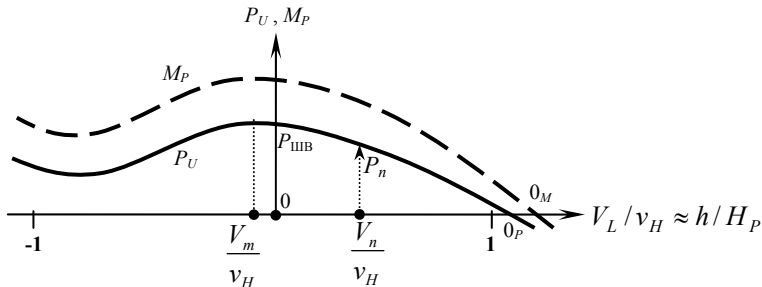


Рис. 4.12. Характер изменения упора и момента сопротивления винта в зависимости от  $V_L/v_H \approx h/H_p$

**Точка нулевого момента**  $0_M$  лежит правее от  $0_p$ . Момент сопротивления вращению винта при нулевом угле атаки лопастей ( $h/H_p = 1$ ) больше нуля из-за наличия силы сопротивления, обусловленной толщиной лопастей. Он становится равным нулю при малом отрицательном значении угла атаки ( $h/H_p > 1$ ). Поступь винта, соответствующая нулевому значению  $M_p$ , называется **шагом нулевого момента**. Ниже этот шаг обозначается как  $H_{M0}$ .

На основе анализа представленных на рисунке зависимостей можно заключить:

- при  $h/H_p < H_{p0}/H_p$  винт работает как движитель, развивающий положительный упор за счет крутящего момента, подведенного от двигателя к винту через гребной вал;
- при  $h/H_p > H_{M0}/H_p$  винт работает в турбинном режиме, тормозя движение судна. Он может передать гребному валу некоторый крутящий момент и вращаться вместе с ним под действием набегающего на винт потока воды;
- при  $H_{p0}/H_p < h/H_p < H_{M0}/H_p$  винт «парализован» и не является ни движителем, ни турбиной.

**Приближенная формула для расчета упора винта.** Район кормы судна является областью чрезвычайно сложного гидродинамического поведения, строгое математическое описание которого затруднено. Поэтому для расчета упора винта применяются приближенные формулы. В частном случае, при установившемся прямолинейном движении судна, упор винта равен силе сопротивления воды движению судна и, учитывая (3.11), может быть найден по формуле:

$$P_n = K_{K0} \bar{V}_n^2, \quad (4.13)$$

где  $P_n$ ,  $\bar{V}_n$  – соответствующие частоте вращения упор винта и установившаяся скорость судна при движения одним курсом.

Значения  $\bar{V}_n$  в зависимости от установки задающего скорость органа можно найти по статической характеристике управляемого гребным винтом судна (см. главу 6). Упор винта в ряде случаев удобно рассчитывать, пользуясь его приближенной зависимостью от хода судна (см. рис. 4.12). Она почти во всем диапазоне работы гребного винта близка к параболической и может быть выражена через  $\bar{V}_n$  и  $V_L$

$$P_U = K_{K0} [c_m \bar{V}_n^2 - (c_m - 1) \frac{\bar{V}_n^2}{(\bar{V}_n - V_m)^2} (V_L - V_m)^2], \quad (4.14)$$

где  $c_m \approx 1,2 \div 1,5$  – отношение соответствующего  $V_m$  максимального упора к  $P_n$ . Так как  $V_m \approx 0$ ,  $c_m$  можно считать отношением упора винта в швартовном режиме к упору  $P_n$  и записать

$$P_U = K_{K0} [c_m \bar{V}_n^2 - (c_m - 1) V_L^2]. \quad (4.15)$$

При работе гребного винта на ЗХ значение  $c_m$  почти одинаково со значением для ПХ, а значение  $K_{K0}$  для ЗХ – порядка на 20% больше, чем для ПХ.

При маневрировании скорость  $V$  судна может быть больше, равна или меньше  $\bar{V}_n$ . Если  $V < \bar{V}_n$ , то упор винта будет направлен на ускорение судна. Когда  $V > \bar{V}_n$ , то упор будет меньше требуемого для обеспечения движения со скоростью  $V$ .

**Режимы работы гребного винта.** Различают основной (расчетный), швартовный, нулевого упора, нулевого момента, турбинный режимы работы гребного винта [25]. **Основной (расчетный) режим переднего хода** соответствует  $0 < h/H_p < 1$  и положительной поступи, при которой винт создает полезный упор за счет подведенного от двигателя вращающего момента, причем КПД винта находится в области максимальных значений. **В швартовном режиме**  $h/H_p = 0$ ,  $V_h = 0$ , упор винта близок к максимальному. В этом режиме работа винта с полной частотой вращения нежелательна из-за перегрузки двигателя и его упорного подшипника. **Режим нулевого упора** определяется условием  $h/H_p = H_{p0}/H_p$ . **В режиме нулевого момента** ( $h/H_p = H_{M0}/H_p$ ) винт начинает оказывать набегающему потоку сопротивление, которое соответствует отрицательному значению упора. **Турбинный режим работы гребного винта** ( $h/H_p > H_{M0}/H_p$ ) характеризуется отрицательными значениями упора винта и момента сопротивления его вращению. Он не характерен для обычного движения судна, но может возникнуть в начале торможения судна, при использовании буксиров, на двухвинтовых судах при отключении одного из винтов и в некоторых других ситуациях.

**Поперечная (боковая) сила гребного винта.** Хотя ГДУ служит для создания движущей судно продольной тяги, в действительности на винте развивается и поперечная сила. Она включает компоненты, связанные с попутным потоком, с подсосом воздуха к лопастям винта, с набрасыванием на руль или на корпус винтовой струи [32].

**Боковая сила от попутного потока** возникает на гребном винте на ПХ. Увлекаемый судном поток воды в верхней части имеет скорость больше, чем в нижней. Распределение по вертикали скоростей  $v_s$  воды, натекающей на гребной винт, имеет вид, представленный на рис. 4.13,а. Поэтому в районе верхнего положения лопасти поступь винта будет меньше, чем в области нижнего. Следовательно, при работе винта на ПХ в районе верхней лопасти отношение  $h/H_p$  меньше, чем у нижней. В результате угол атаки и

сила сопротивления лопасти в верхнем положении будут больше, чем в нижнем. Так как силы лобового сопротивления лопасти в нижнем и верхнем положении направлены противоположно, то



Рис. 4.13. Боковая сила от попутного потока на ПХ

равнодействующая этих сил для винта правого вращения стремится сместить корму *влево* (рис. 4.13,б).

Если же на движущемся вперед судне винт работает назад ( $H_p$  имеет знак «минус»), для лопасти в верхнем

положении отношение  $h/H_p$  будет большим, чем для лопасти в нижнем положении. Следовательно, угол атаки и сила сопротивления лопасти в нижнем положении будут больше, чем в верхнем. Равнодействующая этих сил для винта правого вращения будет смещать корму *влево*.

**Поперечная сила, связанная с подсосом воздуха к лопастям.** Из-за разрежения воды, обусловленного подсосом винтом воздуха у поверхности воды, лопасти винта в верхнем положении испытывают меньшее сопротивление воды, чем в нижнем. В результате равнодействующая сил сопротивления лопасти в верхнем и нижнем положении для винта правого вращения стремится сместить корму *вправо* при вращении винта на ПХ, и *влево* – при вращении назад.

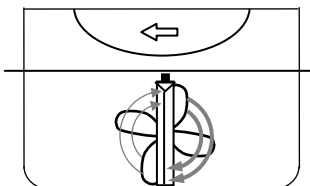


Рис. 4.14. Боковая сила взаимодействия винта и руля на ПХ

**Боковая сила взаимодействия винта и руля.** Когда руль находится в струе работающего на ПХ правого винта, закручивание потока винтом

приводит к косому натеканию воды на верхнюю половину руля слева, а на нижнюю – справа (рис. 4.14). Из-за неравномерности скоростей воды по вертикали в набегающем на винт потоке (см. рис. 4.13) в верхнем положении лопасти угол атаки больше. В результате захватываемая ей часть воды, которая затем набрасывается на нижнюю половину руля, больше чем та, которая натекает на его верхнюю половину. Поэтому сила воздействия струи на нижнюю половину руля больше силы на его верхней половине.

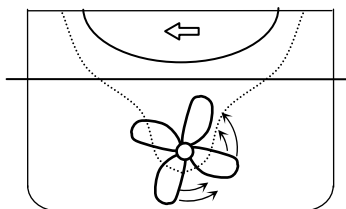


Рис. 4.15. Боковая сила на ЗХ от наброса струи винта в кормовую раковину

Равнодействующая этих сил при правом вращении винта стремится сместить корму *влево*.

**Боковая сила взаимодействия винта и корпуса.** При работе винта правого вращения на ЗХ струя воды от него набрасывается на верхнюю подводную часть правого борта и на нижнюю часть оконечности судна слева. Струя воды в верхней части встречает обшивку корпуса под углом, близким к прямому, а

нижнюю оконечность корпуса обтекает (рис. 4.15). В результате корма будет уходить влево.

Анализ работы винта показывает, что развиваемая им поперечная сила пропорциональна упору винта. В общем случае она стремится сместить корму в сторону левого борта.

**Приближенная формула для расчета боковой силы винта.**

Боковая сила от винта включает несколько составляющих и имеет сложный характер. В судовождении ее оценивают приближенно:

$$P_{UB} = c_B P_U, \quad (4.16)$$

где  $c_B$  – коэффициент пропорциональности.

Значения этого коэффициента при работе винта на ПХ и на ЗХ отличаются. При работе на передний ход  $c_B \approx 0,03 \div 0,05$ . При вращении винта назад у *одновинтовых судов* он может находиться в диапазоне  $0,05 \div 0,12$ . У *двухвинтовых судов* при работе винта на ЗХ этот коэффициент может достигать значения 0,3.

**Момент от боковой силы винта** на корпусе находится так

$$M_U = P_{UB} l_S; \quad (4.17)$$

где  $l_S$  – расстояние от ЦМ судна до плоскости вращения винта.

## 4.7. Поворотные пропульсивные системы

Одними из видов ГДРУ являются поворотные винтовые колонки (ПВК) и поворотные пропульсивные системы (ППС). Последние на английском языке называются *Pod Propulsion Systems*. Двигатель, вращающий гребной винт ПВК, обычно находится внутри судна. Он передает момент вращения на гребной винт через механическую



передачу. У гидравлических ПВК гидромотор находится в забортной части колонки и напрямую соединяется с гребным винтом.

ППС обычно является частью дизель-электрической установки судна и включает забортный комплекс «электродвигатель-винт» (рис. 4.16), который вращается относительно вертикальной оси (по отношению к плоскости главной ватерлинии). В последние годы поворотные пропульсивные системы стали применяться на гражданских морских судах в качестве ГДРУ.

**Назначение ППС.** Поворотные пропульсивные системы предназначаются для судов, которым по роду деятельности нужна хорошая маневренность на всех режимах хода и/или работа которых связана с частыми изменениями хода, а также для судов, требующих обеспечения повышенной безопасности плавания. К этим плавсредствам относятся пассажирские круизные суда, автомобильные паромы, суда Ро-ро, фидерные контейнеровозы, рефрижераторные суда, танкеры для перевозки химических и нефтяных грузов, ледоколы, суда для перевозки тяжеловесов, военные корабли.

**Состав.** ППС включает два основных модуля: *забортный* и *внутрисудовой*, соприкасающиеся по линии корпуса.



Рис.4.16. Поворотная часть ППС

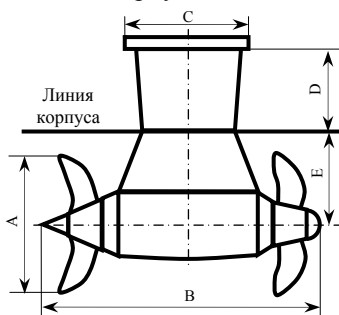


Рис. 4.17. ППС с 2-мя винтами

**Забортный поворотный модуль** состоит из герметической капсулы с электромотором, на валу которого расположен один или два гребных винта. Гребной винт может располагаться впереди капсулы (тянущий винт, рис. 4.16) или сзади нее (толкающий винт) либо с обоих концов (рис. 4.17). В ППС обычно используется ВФШ со съёмными лопастями по типу конструкции аналогичный винтам на российских подводных лодках, характеризующимся низким уровнем шума и вибрации. Использование съёмных лопастей позволяет легко заменять их в случае повреждения.

Главной частью подводного модуля ППС является гребной двигатель. В его качестве обычно используется синхронный электромотор с постоянным возбуждением, без щеток, с неподвижно закрепленным внутри капсулы статором. Магнитный поток возбуждения генерируется высокоэффективными постоянными магнитами. Эти электромоторы не требуют вентиляции, меньше по весу на 15% по сравнению с двигателями с электрическим возбуждением, позволяют уменьшить отношение диаметра капсулы к диаметру гребного винта до 35÷40%.

Кроме электромотора, в капсуле находятся направляющие подшипники и тормоз гребного вала, гидроизолирующее основное и аварийное устройства, блокирующая вал система, льяльная система и помпы, датчики для мониторинга параметров состояния мотора, его подшипников, гидроизолирующих устройств.

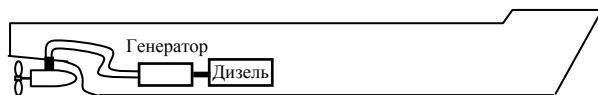


Рис. 4.18. Дизель-электрическая установка с ППС

**Внутрисудовая часть** включает: электрогидравлическую систему для разворота забортного модуля по азимуту; кольцевые скользящие контакты для передачи электропитания на электромотор и данных датчиков из капсулы, что позволяет разворачивать забортный модуль в любую сторону на неограниченный угол; местные индикаторы; систему активации аварийного гидроизолирующего устройства; систему смазки направляющих вращения; гидравлическую систему для блокировочного тормоза; систему мониторинга и ряд других.

**Внешнее оборудование.**

ППС обычно является частью дизель-электрической ГДРУ (рис. 4.18), дизель и генератор которой расположены в машинном отделении судна, а пульты управления – в ЦПУ и на мостике. Генератор снабжает электропитанием не только гребной электромотор, но и другие бортовые системы. Наилучшие пропульсивные и маневренные качества имеют

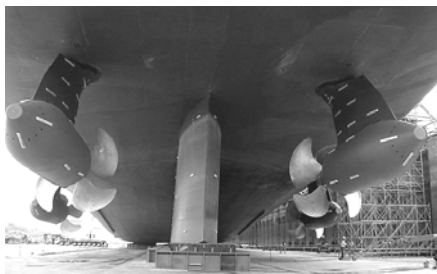


Рис. 4.19. Судно с двумя ППС

суда, оборудованные двумя ППС,

установленными симметрично ДП на правом и левом борту (рис. 4.19). Обычно линии «дизель-генератор-ППС» у них отдельные, что обеспечивает повышенную надежность пропульсивной установки.

**Основные режимы.** Основными у ППС являются два режима работы. Один предназначен для целей маневрирования, в нем забортный модуль может поворачиваться по азимуту на  $360^{\circ}$ . Другой режим используется на переходе морем полным передним ходом. В нем поворот забортного пропульсивного модуля ограничен значениями  $\pm 35^{\circ}$ .

**Достоинства.** Преимуществами азимутальных пропульсивных систем перед традиционными ГДУ являются:

- Улучшение маневренности судна на всех режимах хода, особенно на малых и предельно малых скоростях. Уменьшение тормозного пути при маневре *крузи-стоп*. Хорошая управляемость на ЗХ.
- Повышение эффективности пропульсивной установки (до 10%).
- Снижение расхода топлива и вредных выбросов.
- Ненужность традиционного рулевого устройства, валопровода, кормовых подруливающих устройств, системы охлаждения гребного электродвигателя. Уменьшение числа генераторов электропитания.
- Экономия места в корпусе благодаря нахождению гребного двигателя за бортом и отсутствию названного в предыдущем пункте оборудования (увеличение пассажирской или грузовой вместимости).
- Повышенная комфортность на борту благодаря уменьшению вибрации и шума.
- Уменьшение работ по обслуживанию и затрат на него.
- При наличии двух ППС при выходе из строя одной из них другая обеспечит движение с 50% мощностью.

Для иллюстрации улучшения маневренных качеств судна на рис. 4.20 показаны циркуляции двух судов одной серии, первое из которых имеет традиционные ГДУ и РУ, а другое снабжено ППС Azipod фирмы *ABB Industry*.

Достоинствами ППС при постройке судна являются: модульность конструкции, возможность упрощения формы и структуры кормовой части корпуса, возможность установки ППС на любой фазе изготовления судна, уменьшение времени и стоимости установки ГДРУ, возможность смены забортного модуля у судна на плаву.

**Ограничения.** Помимо преимуществ ППС имеют и недостатки:

- высокая сложность и стоимость;
- меньшая надежность;

- необходимость первичного двигателя и генератора;
- высокие требования к качеству электропитания;
- худшее качество стабилизации курса;
- увеличение обратного смещения при сильном маневре курсом;
- большее сопротивление капсулы ППС движению судна, чем обычного руля;
- ограниченная мощность;
- ограниченная скорость (до 30 узл).

**Применение на судах.** Поворотными пропульсивными системами

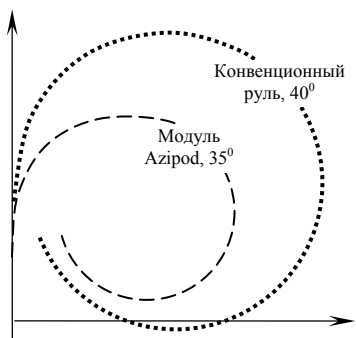


Рис. 4.20. Циркуляции на ППХ

уже снабжен ряд новых круизных судов и других плавсредств. Число заказов от судовладельцев на пассажирские суда с ППС возросло, так как комфортность их выше из-за снижения шумности и вибрации. Увеличилось и число заказов на другие типы судов с такой ГДРУ.

Основными изготовителями ППС в настоящее время являются: финская фирма **ABB Industry** (системы Azipod); совместно шведские фирмы **Kamewa** (часть корпорации Rolls-

Royce) и **Alstom** (системы Mermaid); совместно немецкие компании **Siemens** и **Schottel** (системы SSP); итальянская фирма **Dolphin** совместно с немецкой **STN Atlas Marine Electronics** и голландской **John Crane-Lips of Drunen**.

Таблица 4.4. – Технические данные систем SSP (см. рис. 4.17)

Модификации	SSP5	SSP7	SSP10	SSP14	SSP18	SSP20
Мощность на валу, кВт	5000	7000	10000	14000	18000	20000
Скорость вращения винта, об/мин	190	170	160	150	145	130
Момент на валу, кНм	251	393	597	891	1185	1469
Скорость поворота комплекса, об/мин	2	2	2	2	2	2
Вес, т	95	125	170	230	280	310
Диаметр винта, мм (А)	750	4250	4750	5250	5800	6250
Длина пропульсивного модуля, мм (В)	6625	7500	8380	9260	10590	11000
Диаметр фланца, мм (С)	3000	3500	3800	4200	4800	5000
Высота поддерживающего конуса, мм (D)	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Высота пропульсивного модуля, мм (Е)	2100	2975	3325	3675	4000	4375

Первый производитель ППС – финская фирма ABB Industry. Она изготавливает системы Azipod разных модификаций с мощностью от

500 кВт до 30 МВт. В модификации с наивысшей мощностью (30 МВт) диаметр гребного винта составляет 8 м. Начиная с 1990 г., эта фирма передала судостроительным компаниям более 100 систем Azipod. Производители Kamewa-Alstom предоставляют системы Mermaid с мощностью от 5 до 25 МВт. Эти системы предназначены для танкеров, круизных судов, Ро-ро паромов, военных кораблей. В табл. 4.4 приведены основные характеристики модификаций системы SSP фирм Siemens-Schottel, которые предназначены для пассажирских судов, танкеров, контейнеровозов, судов Ро-ро, судов для перевозки тяжеловесов.

## 5. Рулевые устройства

### 5.1. Общие сведения о рулевом устройстве

**Назначение.** Рулевое устройство (РУ) служит для создания поперечной силы, обеспечивающей управление движением судна по курсу. Рабочим органом этого устройства может быть руль, поворотная насадка на гребной винт, створки или поворотные сопла водометных движителей. Наибольшее распространение на морских судах получили РУ с перьевым обтекаемым *рулем*.

**Состав.** РУ включает в себя две основные части: **рулевой привод** (РП) и **руль**. Соединение их осуществляется с помощью механической или гидравлической передачи. *Руль* состоит из баллера и пера руля. Часто термином «руль» называют и только перо руля.

Основным элементом РП является *силовая установка* (рулевая машина – РМ). До недавнего времени в автоматизированных системах управления курсом между формирующим команды управления авторулевым (АР) и РП, преобразующим эти команды в силовые воздействия на судно, строгой границы не было. АР, например, включал в свой состав те или иные элементы преобразования выработанных сигналов управления в силовые воздействия: электромашинные усилители, сервомеханизмы и другое оборудование. РП состоял из рулевой машины и средства передачи ее усилия на баллер руля. Такому разделению системы управления судном по курсу имелись объективные причины. С появлением цифровых АР и рулевых механизмов, удовлетворяющих стандартам взаимодействия между судовой аппаратурой, функции АР и РП конкретизировались. АР начали выполнять функции формирования маломощного управляющего сигнала  $\beta_U$ , определяющего величину перекладки руля. Задачей РП стало обеспечение равенства действительной перекладки руля  $\beta$  значению  $\beta_U$ , задаваемому АР.

Для избежания путаницы и облегчения анализа систем управления курсом ниже везде термин «*рулевой привод*» используется в расширенном смысле – как системы, обеспечивающей равенство  $\beta$  значению  $\beta_U$ .

## 5.2. Рулевой привод и предъявляемые к нему требования.

**Назначение.** Рулевой привод предназначен для поворота руля в заданное положение. Его входной сигнал определяет требуемый угол руля –  $\beta_U$ . Он задается штурвалом, либо вырабатывается АР. К **основным кинематическим характеристикам** РП относят угловое положение руля ( $\beta$ ) и скорость его перекладки ( $\Omega = \dot{\beta}$ ). Следует отметить, что некоторые современные РП позволяют задавать им для отработки не только  $\beta_U$ , но и скорость, с которой эта перекладка должна быть выполнена.

**Состав РП.** На судах применяются РП разных видов [27, 34]. Ниже эти устройства характеризуются обобщенно. Конкретные РП могут теми или другими элементами отличаться от обобщенной схемы.

*Рулевой привод включает* в себя усилители, усилительно-преобразующие устройства, РМ, устройство передачи воздействия от РМ на баллер, рулевой датчик, переключатель режимов управления и местную систему управления. Все элементы РП находятся в румпельном отделении. Современные РП снабжаются датчиками значений параметров, характеризующих их работу: уровень, давление и температуру масла в гидравлической системе, наличие электропитания сервоприводов и параметров питающего напряжения и др. Такая информация позволяет электронной системе сигнализации и мониторинга тестировать работу РП, вовремя сообщать о нарушениях в его работе и предотвращать выход из строя.

*Усилители и усилительно-преобразующие устройства* усиливают входной сигнал до требуемой величины и преобразуют его в вид, необходимый для управления РМ.

*Рулевые машины* вырабатывают усилие, достаточное для перекладки руля в эксплуатационных условиях. На современном этапе широко распространены на судах гидравлические РМ [34]. Они используются на судах всех типах и по мощности не имеют ограничений (например, на супертанкерах устанавливаются РМ мощностью до 800 кВт с крутящим моментом более 20000 кН·м). Гидравлические РМ обладают следующими достоинствами: компактность, небольшая масса и габариты, возможность создания большого крутящего момента, высокая точность управления рулем, удобство автоматизации, способность выдерживать значительные

перегрузки без ухудшения эксплуатационных характеристик, длительный срок службы и безотказность работы в условиях вибрации, повышенной влажности и заливаемости.

*Рулевой датчик* вырабатывает сигнал о величине угла руля. *Переключатель режимов управления* служит для выбора местного или дистанционного управления рулевым приводом. *На посту местного управления* расположена рукоятка или две кнопки. При отклонении рукоятки в сторону выбранного борта (либо при нажатии соответствующей кнопки) начинается перекладка руля в требуемом направлении. Положение руля контролируется по шкале рулевого указателя. Возвращение рукоятки в нулевое положение (или отпускание кнопки) приводит к остановке руля. Для приведения руля в ДП рукоятка отклоняется в сторону противоположного положению руля борта (либо нажимается соответствующая кнопка). Когда руль придет в ДП, рукоятка устанавливается в нейтральное положение. Системы дистанционного управления рулевым приводом освещены в главе 7.

**Требования к РП.** Рулевые приводы являются наиболее ответственными механизмами на судах. От их эффективности и надежности зависит безопасность плавания и экономические показатели работы судов. К работе этих механизмов предъявляются высокие требования. Они устанавливаются ИМО и национальными классификационными обществами. Основные из этих требований освещены ниже.

Рулевое устройство каждого судна должно включать два РП: ***основной и вспомогательный***. Первый предназначен для работы в нормальных условиях эксплуатации, а второй – на случаи выхода из строя основного РП. Все наиболее важные узлы и элементы РП подлежат периодическим освидетельствованиям (ежегодным и очередным).

**Главный РП** и баллер руля должны иметь надлежащую прочность и выдерживать нагрузки на всех режимах переднего и заднего хода, включая максимальные. Время перекладки руля с 35° одного борта на 30° другого при предельной эксплуатационной осадке и скорости ППХ не должно превышать 28 с.

Требуется обеспечивать управление главным РП с ходового мостика и из румпельного отделения, где следует иметь указатели положения руля. Они должны работать независимо от системы управления РП и показывать угол руля с погрешностью, не превышающей: 1° для руля в ДП; 1,5° – при угле перекладки от 0 до 5°; 2,5° – в диапазоне от 5 до 35°.



Главный РП может включать две одинаковые силовые системы, обеспечивающие при совместной работе требуемое время перекладки руля (28 с). В этом случае вспомогательный РП не обязателен.

На всех судах вместимостью 70000 брт и более; на танкерах, газовозах, химовозах 10000 брт и выше; а также на всех атомных судах главный РП должен включать два или более силовых агрегата, каждый из которых обеспечивает необходимое время перекладки руля (28 с), либо, по меньшей мере, два одинаковых агрегата, выполняющие при одновременной работе это требование. Включение в работу одной из силовых установок, либо обоих вместе, должно производиться с поста управления, расположенного на ходовом мостике. В случае неисправности работающей силовой установки РП другая должна приводиться в действие автоматически. На этих судах необходимо иметь возможность обнаружения утечки рабочей жидкости из любой силовой системы РП и автоматической изоляции поврежденной системы с тем, чтобы другая оставалась в рабочем состоянии. На танкерах, танкерах-химовозах и газовозах вместимостью 10000 брт и более при потере управляемости судна из-за единичного повреждения в любой из силовых систем главного РП (исключая румпель, сектор или такого же назначения элементы, а также заклинивание исполнительного привода перекладки руля), РП должен ее восстановить в течение времени, не превышающего 45 с.

**Вспомогательный РП** должен иметь надлежащую прочность, обеспечивать управление судном на ППХ и маневренных скоростях, быстро приводиться в действие в экстренных случаях. Переход с главного РП на вспомогательный должен осуществляться за время, не большее 2 мин.

Вспомогательный привод должен переключать руль с 15° одного борта на 15° другого не более чем за 60 с. при полной осадке и скорости, равной половине ППХ, или 7 уз, смотря по тому, что больше. Этот РП должен управляться из румпельного отделения и с ходового мостика независимо от системы управления главным РП.

Требуется, чтобы на пассажирских, нефтеналивных, атомных судах, газовозах и химовозах вспомогательный рулевой привод удовлетворял требованиям главного РП при недействующей одной из его силовых установок.

**Главный и вспомогательный РП** должны иметь защиту от перегрузки деталей и узлов при возникновении на баллере момента в 1,5 раза превышающего расчетный. На каждом борту они должны иметь выключатели, автоматически прекращающие действие привода, прежде чем руль достигнет максимального угла поворота, но

допускающие движение руля в обратном направлении. Обычно эти ограничители устанавливаются на  $1,5^\circ$  меньше предельного угла руля. Если главный и вспомогательный РП полностью или частично расположены ниже самой высокой грузовой ватерлинии, то выше палубы переборки необходимо иметь аварийный РП, обеспечивающий перекладку руля при скорости переднего хода, не меньшей 4 узлов.

Требуется, чтобы системы управления главным и вспомогательным РП с ходового мостика отвечали следующим положениям. Если СУ РП электрическая, то должна получать питание по собственной линии, подключенной к силовой цепи РП в румпельном отделении или непосредственно к шинам распределительного щита, питающего эту силовую цепь. В румпельном отделении должны быть средства отключения любой СУ от РП, который она обслуживает. СУ должна приводиться в действие с поста на ходовом мостике. Между ним и румпельным отделением необходимо иметь средства связи.

В рулевой рубке и ЦПУ необходимо иметь световую и звуковую сигнализацию об исчезновении напряжения, обрыве фазы и перегрузке в цепи питания, исчезновении напряжения в системе управления и минимальном уровне масла в расходном баке.

**Румпельное отделение** должно быть легко доступно, отделено от машинных помещений, и обеспечивать свободный доступ к механизмам РП и органам его управления.

**Обобщенная структурная схема РП.** Рулевой привод – сложная нелинейная система с большим количеством элементов. Для

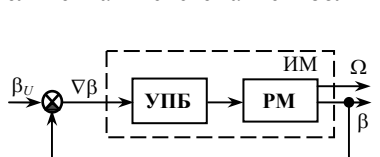


Рис. 5.1. Упрощенная схема РП

судовождения существенны лишь связи между входными и выходными величинами РП. Поэтому РП рассматривается как следящая за заданным положением руля система (рис. 5.1) с исполнительным модулем

(ИМ), включающем усилительно-преобразующий блок (УПБ) и рулевую машину.

При управлении РП электромеханическими АР отечественного производства УПБ может работать с двумя коэффициентами усиления входного сигнала, основным и уменьшенным [4]. Изменение усиления достигается за счет отключения одного из усилителей в УПБ. В нормальных условиях плавания РП работает в режиме «Точно» с основным коэффициентом усиления. Уменьшенный коэффициент

усиления соответствует работе АР в режиме «Грубо», применяемом при сильном рыскании судна от волн.

Работа РП согласно приведенной схеме может быть представлена следующим образом. При управлении курсом сигнал  $\beta_U$ , определяющий угол руля, поступает на УПБ. Здесь он усиливается и передается на РМ. Рулевая машина начинает поворачивать руль, обрабатывая этот сигнал. РМ является реальным интегрирующим звеном. Входной сигнал РМ определяет скорость перекадки руля. Она не может превышать максимальную скорость руля  $\Omega_{mx}$ , которую способна развивать РМ.

При повороте руля снимаемый с рулевого датчика сигнал, характеризующий действительный угол руля  $\beta$ , поступает на компенсацию задающего сигнала. Когда разность между  $\beta_U$  и  $\beta$  станет равной нулю, работа РМ прекратится. Как видно из схемы, управляющий работой РМ сигнал пропорционален  $\nabla\beta = \beta_U - \beta$ .

### 5.3. Характеристики рулевого привода

**Статические характеристики РП.** Наиболее важной является статическая характеристика РП как разомкнутой системы, связывающая сигнал  $\nabla\beta$  на входе ИМ и скорость перекадки руля  $\bar{\Omega} = \dot{\beta}$  на его выходе. Приблизительно ИМ по этим сигналам может считаться пропорциональным звеном с зоной насыщения. Статическая характеристика  $\bar{\Omega} = F(\nabla\beta)$  РП как такого звена показана на рис. 5.2.

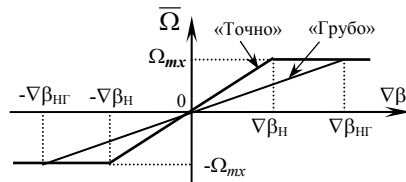


Рис. 5.2. Характеристика  $\bar{\Omega} = F(\nabla\beta)$

Максимальная скорость перекадки руля  $\Omega_{mx}$  у большинства гражданских судов лежит в диапазоне от  $2,4^0/c$  до  $7^0/c$ , в среднем она составляет  $5^0/c$ . У военных судов эта скорость выше, у атомных подводных лодок она достигает  $11^0/c$ . При  $\Omega_{mx} = 5^0/c$  интервал пропорциональности скорости руля величине  $\nabla\beta$  равен порядка  $7^0$  ( $\nabla\beta_H \approx 7^0$ ). При больших значениях  $\nabla\beta$  она равняется  $\Omega_{mx}$ .

В режиме «Грубо» диапазон пропорциональности  $\Omega$  величине  $\nabla\beta$  больше. Обозначим значение  $\nabla\beta$  насыщения характеристики как  $\nabla\beta_H$ , и введем величину  $\nabla\beta$  приведенной разности

$$\nabla\beta = \begin{cases} \beta_U - \beta & \text{при } |\beta_U - \beta| \leq \nabla\beta_H; \\ \nabla\beta_H & \text{при } \beta_U - \beta > \nabla\beta_H; \\ -\nabla\beta_H & \text{при } \beta_U - \beta < -\nabla\beta_H. \end{cases} \quad (5.1)$$

Тогда для всего диапазона  $\nabla\beta$  статическая характеристика ИМ может быть представлена так

$$\bar{\Omega} = k_{\Omega} \nabla\beta; \quad (5.2)$$

где  $k_{\Omega}$  – коэффициент передачи ИМ. Для основного режима РП он лежит в диапазоне  $0,6 \div 0,8$ .

По статической характеристике можно установить, что если задается малое изменение угла руля, то скорость перекладки руля пропорциональна заданному изменению. Для больших изменений положения руля  $\Omega$  можно принять постоянной и равной ее максимальному значению. Переход из основного режима к режиму «Грубо» уменьшает скорость перекладки руля в диапазоне  $\nabla\beta [0, 10^0]$ .

**Переходные характеристики.** Наиболее важными переходными характеристиками РП являются:

$$\Omega_{\Pi}(t) = f_{\Omega}[1(t)\nabla\beta]; \quad \beta_{\Pi}(t) = f_{\beta}[1(t)\beta_U].$$

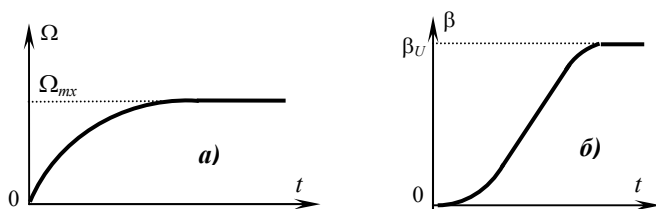


Рис. 5.3. Переходные функции  $\Omega_{\Pi}(t)$  и  $\beta_{\Pi}(t)$

Первая функция (рис. 5.3,а) относится к РП в разомкнутом состоянии. Она описывает реакцию ИМ по  $\Omega$  на ступенчатое изменение  $\nabla\beta$ . Вторая функция (рис. 5.3,б) отражает реакцию РП в замкнутом состоянии на ступенчатое изменение  $\beta_U$ .

По характеристикам  $\overline{\Omega}(\nabla\beta)$  и  $\Omega_{\Pi}(t)$  можно определить, что ИМ является реальным пропорциональным звеном с зоной насыщения. Поэтому процесс отработки перекладки руля можно описать выражением:

$$T_{\Omega}\dot{\Omega} + \Omega = k_{\Omega}\nabla\beta. \quad (5.3)$$

Здесь  $T_{\Omega} \approx 1 \text{ с}$  – постоянная времени ИМ. Преобразуя (5.3), получаем

$$T_{\Omega}\ddot{\beta} + \dot{\beta} + k_{\Omega}\beta = k_{\Omega}\beta_U. \quad (5.4)$$

Почти во всех задачах управления судном задержкой в наборе скорости при перекладке руля пренебрегают, так как она значительно меньше постоянной времени судна. В задаче стабилизации курса, когда углы перекладки руля малы, часто считают, что  $\Omega = k_{\Omega}\nabla\beta$ . При больших перекладках угловую скорость руля иногда принимают постоянной и равной  $\Omega_{mx}$ . Во многих задачах управления судном перекладка руля считается мгновенной.

## 5.4. Рули, их классификация и геометрические характеристики

**Назначение.** Руль предназначен для образования поперечной силы, которая служит управляющим воздействием при удержании судна на курсе и выполнении поворотов. Традиционный руль представляет собой симметричное (в плане) крыло ограниченных размеров, имеющее возможность поворачиваться вокруг вертикальной оси (баллера) вправо и влево от ДП. Поперечная сила развивается как подъемная сила на руле, когда судно имеет ход относительно воды.

Максимальный угол перекладки обычных рулей составляет, как правило,  $35^{\circ}$ . Дальнейшая перекладка руля нецелесообразна, поскольку она приводит лишь к небольшому увеличению его поперечной силы, но одновременно сопровождается резким увеличением силы сопротивления руля и момента на баллере, что диктует необходимость утяжеления рулевого привода и роста мощности РМ. Величина максимального угла перекладки обусловлена также возникновением кризиса обтекания рулей на переднем ходу в диапазоне  $30\div 40^{\circ}$ , что явилось основанием считать перекладку руля в  $35^{\circ}$  предельной конструктивной. При срыве потока с кромки руля происходит резкое падение его поперечной силы. Для повышения эффективности рули обычно размещают в струе движителей.

**Классификация рулей.** Для обеспечения необходимых маневренных качеств судов, имеющих разную форму кормы, неодинаковые РП и различного типа винты, а также по соображениям надежности, технологичности конструкции и ряда других причин рули выполняются во многих модификациях. Общее число таких модификаций рулей превышает пятьдесят. В последние годы, особенно на судах внутреннего плавания, широкое распространение получили также сложные системы рулей, образованные комбинацией двух, трех, четырех рулей с разными углами перекладки [9, 31]. Характеристика всех модификаций и систем рулей заняла бы много места. Поэтому ниже рассматриваются лишь основные виды рулей.

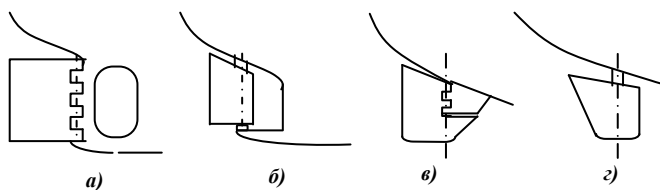


Рис. 5.4. Традиционные рули

Вначале охарактеризуем **традиционные виды рулей**. *По способу крепления на корпусе* они могут быть простыми двухопорными, простыми многоопорными, полуподвесными и подвесными. *Многоопорные рули* устанавливаются в основном за рудерпостом (рис. 5.4,а). *Простые двухопорные рули* помещаются чаще всего в окне ахтерштевня и опираются на его пятку (рис. 5.4,б). *Полуподвесные рули* крепятся на специальной кронштейне (рис. 5.4,в). Иногда они навешиваются на дейдвуд. *Подвесные рули* связаны только с баллером и не имеют прямого контакта с корпусом (рис. 5.4,г).

*По размещению площади руля относительно оси баллера* различают небалансирные, балансирные и полубалансирные рули. У *небалансирных рулей* (рис. 5.4,а) вся площадь размещается в корму от баллера. У *балансирных рулей* (рис. 5.4,г) по всему размаху (высоте) руля одна часть площади размещается в нос, а другая – в корму от оси баллера. *Полубалансирные рули* (рис. 5.4,в) в верхней половине являются небалансирными, а в нижней – балансирными.

*По форме профиля* рули бывают плоскими (пластинчатыми) и обтекаемыми (профилированными). На морских судах широко распространены обтекаемые балансирные и полубалансирные рули, сопротивление которых натекающему потоку значительно меньше, чем пластинчатых рулей.

Из специальных видов рулей рассмотрим руль с закрылком (рис. 5.5,а), роторный руль (рис. 5.5,в), роторно-перьевой руль (рис. 5.5,д) и роторно-перьевой руль с закрылком (рис. 5.5,жс). Все они позволяют улучшить управляемость судна на малых скоростях хода.

**Руль с закрылком** на ППХ и ПСХ в большинстве случаев применяется без работы закрылка как обычный обтекаемый руль. На малых скоростях закрылок вводится в действие (рис. 5.5,б) и его перекладка увеличивает боковую силу руля. В режиме экономии топлива для стабилизации курса в открытом море при невысокой степени волнения применяется только закрылок, а руль находится в ДП, увеличивая стабилизирующий эффект корпуса. Одним из видов рулей с закрылком является *руль Беккера*, предназначенный для тихоходных судов не очень большого тоннажа.

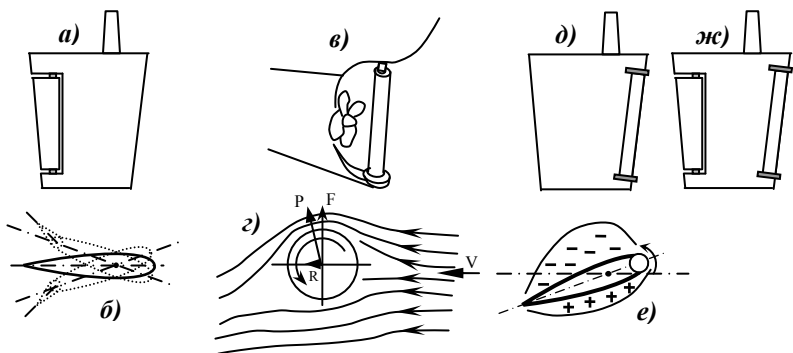


Рис. 5.5. Специальные рули

Действие **роторного руля** (рис. 5.5,в) основано на эффекте, открытом в 1852 немецким учёным Г.Г.Магнусом (H.G.Magnus). Эффект Магнуса – возникновение поперечной силы, действующей на тело, которое вращается в набегающем на него потоке жидкости или газа. Так, например, если вращающийся длинный круговой цилиндр (рис. 5.5,г) обтекается безвихревым потоком, направленным перпендикулярно его образующим, то вследствие вязкости жидкости скорость течения со стороны, где направление скорости  $V$  потока и вращения цилиндра совпадают, увеличивается, а со стороны, где они противоположны, – уменьшается. В результате давление на первой стороне падает, а на другой стороне возрастает, то есть появляется поперечная сила  $F$ . Направлена она всегда от той стороны вращающегося тела, на которой направление вращения и направление потока противоположны, к той стороне, на которой эти направления

совпадают. Сила сопротивления цилиндра движению потока обозначена на рисунке как  $R$ , а сумма  $F$  и  $R$  – как  $P$ . На некоторых судах роторный руль применяется как носовой подруливающий орган.

**Роторно-перьевой руль** – это высокоэффективный орган управления, объединяющий перо руля и ротор в передней его части. Это нововведение препятствует завихрению потока на всасывающей стороне руля при больших его перекалках. Наилучшие результаты достигаются при малых скоростях хода. При больших скоростях ротор не используется, и роторно-перьевой руль работает как обычный.

**Роторно-перьевой руль с закрылком** объединяет преимущества роторно-перьевого руля и гидравлически связанного с ним закрылка. Он позволяет достичь высокую маневренность судна при низких скоростях хода. Эффект этого руля сравним с действием пропульсивного средства. При больших скоростях ротор и закрылок не применяют, и руль работает как обычный. В режиме экономии топлива при движении в открытом море для управления движением используется только закрылок, а руль находится в ДП.

Характеризуя специальные конструкции рулей, следует упомянуть и **руль Шиллинга**, оригинальный профиль которого позволяет увеличить боковую силу руля.

**Геометрические характеристики руля.** Ниже рассматриваются только традиционные рули, которые обычно характеризуются своей площадью –  $S_R$ , высотой –  $h_R$ , длиной –  $L_R$  и относительным удлинением –  $\lambda_R$ . **Высотой руля** называется расстояние по баллеру от нижней кромки руля до точки пересечения оси баллера с верхней кромкой руля (размах крыла). Под **длиной руля** понимается его размер в направлении, перпендикулярном оси баллера (хорда крыла). **Относительное удлинение** руля равно отношению квадрата его высоты к площади, либо отношению его высоты к средней длине:

$$\lambda_R = \frac{h_R}{L_{Rcp}} = \frac{h_R^2}{S_R}. \quad (5.5)$$

Для оценки размера руля его площадь  $S_R$  принято выражать в долях произведения длины  $L$  судна на осадку  $T$  в полном грузу:

$$S_R = LT / A_R ;$$

где коэффициент  $A_R = 60 \div 80$  для грузовых судов, для эсминцев  $A_R = 35 \div 40$ , для легких крейсеров  $A_R = 45 \div 60$ .



В формуляре маневренных качеств приводятся такие **данные о руле**: тип, количество, общая площадь, площадь в струе винта, максимальный угол перекладки, число силовых агрегатов привода.

**Влияние геометрических характеристик руля на управляемость судна.** На управляемость судна влияет площадь руля, его относительное удлинение и расположение.

***Увеличение площади руля*** приводит к определенному улучшению поворотливости судна при средних и больших перекладках руля. Так увеличение  $S_R$  примерно в два раза приводит к возрастанию установившейся угловой скорости при максимальной перекладке руля примерно на 15%. При малых перекладках руля поворотливость при увеличении  $S_R$  практически не изменяется. Это обусловлено тем, что при возрастании площади повышается стабилизирующий эффект руля, компенсирующий его действие как средства управления.

***Увеличение относительного удлинения руля*** при неизменной его площади приводит к небольшому росту поворотливости судна, но уменьшает критический угол руля  $\beta_{кр}$ .

***Расположение руля.*** Рули могут располагаться в винтовой струе и вне ее. Когда руль находится в винтовой струе, то скорость натекания воды на руль возрастает. Это улучшает поворотливость судна. Влияние струи винта проявляется тем сильнее, чем большая площадь руля попадает в нее и чем выше коэффициент нагрузки винта по упору. Эффект улучшения поворотливости за счет влияния струи винта особенно существенен на одновинтовых судах в режиме разгона. По мере приближения скорости судна к назначенному значению этот эффект уменьшается. На быстроходных судах расположение рулей за винтами дает меньший выигрыш в поворотливости, так как их гребные винты, как правило, менее нагружены, чем на тихоходных.

## 5.5. Кинематические характеристики рулей

Основными кинематическими характеристиками традиционного руля являются: *угол перекладки* –  $\beta$ , *угол атаки* –  $\beta_e$  (*эффективный угол руля*), *скорость*  $V_S$  обтекающего руль потока и *угол*  $\delta\beta$  *отклонения вектора скорости потока от ДП судна* в районе руля (рис.5.6). ***Угол перекладки руля***  $\beta$  – это угол между ДП и средней плоскостью руля. Максимальное значение  $\beta$  составляет обычно  $30^0$

или  $35^\circ$ . **Углом атаки руля**  $\beta_e$  называется угол между плоскостью руля и вертикальной плоскостью, в которой лежит вектор скорости набегающего на руль потока. **Отклонение**  $\delta\beta$  вектора скорости потока от ДП судна в районе руля равно  $\beta - \beta_e$ .

Район кормы, где расположены руль и винт, отличается сложностью происходящих в нем гидродинамических процессов, особенно при маневрировании судна. О значениях кинематических характеристик руля здесь можно говорить лишь приближенно, в среднем, особенно если руль находится в струе винта. Так, например, элементы пера руля, расположенного в струе винта, из-за закручивания струи винтом обтекаются потоком с разной скоростью и под разным направлением. Поэтому об угле атаки и векторе скорости потока здесь можно говорить только усредненно. Под углом атаки в этом случае понимается угол между плоскостью руля и вертикальной плоскостью, в которой лежит вектор осевой составляющей набегающего на руль потока. При определении кинематических параметров руля различают два случая: *руль за винтом*, *руль в стороне от оси винта*.

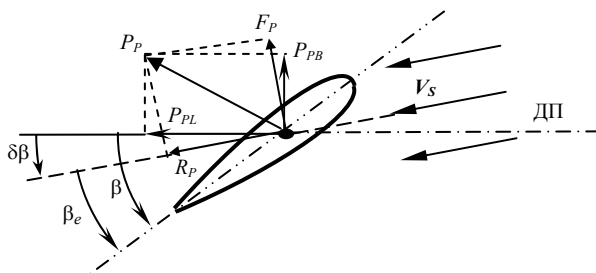


Рис. 5.6. Кинематические и гидродинамические характеристики руля

**Руль в стороне от оси винта.** В этом случае при **прямолинейном движении судна** передним ходом  $\beta_e = \beta$ , а скорость  $V_S$  натекания воды на руль равняется разности между скоростью  $V$  судна относительно воды и скоростью  $V_{\text{ПП}}$  попутного потока, увлекаемого судном:  $V_S = V - V_{\text{ПП}}$ . **На заднем ходу** при прямолинейном движении  $V_S = V$ ,  $\beta_e = \beta$ . **На криволинейной траектории** из-за искривления потока в районе кормы возникает отличие  $\delta\beta$  между углом атаки руля и углом его перекалки. Угол

$\delta\beta$  зависит от местного угла дрейфа  $\alpha_R$  в районе руля. При криволинейном движении судна (рис. 5.7) каждая точка его корпуса имеет свою скорость и свой угол дрейфа. Как можно заметить по рис. 5.7, боковая скорость  $V_{BR}$  движения кормы и угол дрейфа  $\alpha_R$  в районе руля могут быть определены по формулам:

$$\left. \begin{aligned} V_{BR} &= V_B + \omega \cdot l_R \\ \alpha_R &= \arctg \frac{V_{BR}}{V_L} \end{aligned} \right\}; \quad (5.6)$$

где  $l_R$  – расстояние от ЦМ судна до баллера руля. Скорость  $V_R$  движения кормы в районе руля равна  $V_R = \sqrt{V_L^2 + V_{BR}^2}$ .

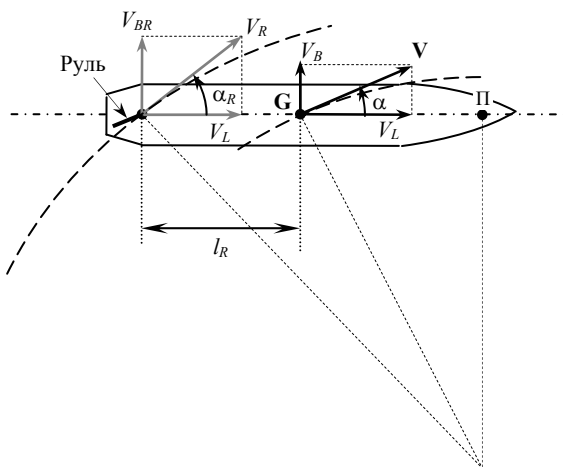


Рис. 5.7. Параметры движения ЦМ и кормы судна

При движении задним ходом ( $V_L < 0$ )  $\delta\beta = \alpha_R$  и  $V_S = V_R$ . Когда судно следует передним ходом ( $V_L > 0$ ), угол  $\delta\beta$  меньше  $\alpha_R$  из-за спрямляющего влияния корпуса на поток, обтекающий руль. Скорость  $V_S$  здесь меньше  $V_R$  на величину скорости попутного потока. Обозначив коэффициент спрямления потока корпусом как  $\chi_K$ , для  $V_L > 0$  получим

$$\left. \begin{aligned} \delta\beta &= \chi_K \alpha_R \\ V_S &= V_R - V_{III} \end{aligned} \right\},$$

где  $\chi_K \approx 0,5 \div 0,6$ .

**Руль за винтом** находится в струе работающего на ПХ винта. Если в этом случае *судно движется назад*, характер гидродинамических процессов в районе руля очень сложен и весьма разнообразен. Поэтому ничего не остается, как принять  $\delta\beta = 0$ .

**При установившемся прямолинейном движении судна** передним ходом  $\beta_e = \beta$ , а скорость  $V_S$  натекания воды на руль равняется:

$$V_S = V - V_{\text{ПП}} + \Delta_{VP} = V_{S0} + \Delta_{VP},$$

где  $V_{S0} = V - V_{\text{ПП}}$  – скорость натекающего на руль потока при остановленном двигателе,  $\Delta_{VP}$  – приращение скорости потока из-за работы винта. Значение  $\Delta_{VP}$  зависит от коэффициента  $\sigma_P$  нагрузки винта по упору и расстояния  $l_{PR}$  от диска винта до оси вращения руля

$$\Delta_{VP} = V_{S0} (k_{\Delta} \sqrt{1 + \sigma_P} - 1),$$

где  $k_{\Delta}$  – коэффициент, значение которого приближенно можно определить по табл. 5.1.

Таблица 5.1. – Значения  $k_{\Delta}$

$l_{PR} / D_P$	0,00	0,25	0,50	0,75	1,0
$k_{\Delta}$	0,50	0,79	0,88	0,94	0,96

Коэффициент нагрузки винта по упору находится по формуле:

$$\sigma_P = \frac{P}{0,5 \cdot \rho \cdot S_{\otimes} V_{S0}^2},$$

где  $P$  – полный упор, развиваемый движителем;  $\rho$  – плотность воды.

Когда руль находится в струе винта, то при установившемся прямолинейном движении передним ходом скорость натекающего на руль потока обычно составляет  $V_S = (1,2 \div 1,5)V$ . Приближенно считают  $V_S \approx 1,25 \cdot V$ .

*При работе винта на ПХ и перемещении судна вперед на криволинейной траектории* натекающий на руль поток спрямляется корпусом и действием струи от винта. Обозначив коэффициент спрямляющего влияния корпуса и винта как  $\chi_{KB}$ , для  $V_L > 0$  получим

$$\delta\beta = \chi_{KB} \alpha_R,$$

где  $\chi_{KB} \approx 0,3$ .

У одновинтовых судов руль обычно расположен за винтом и

$$\delta\beta = \begin{cases} \chi_{KB}\alpha_R & \text{при } V_L > 0; \\ \alpha_R & \text{при } V_L < 0, Z \leq 0; \\ 0 & \text{при } V_L < 0, Z > 0. \end{cases} \quad (5.7)$$

Значение эффективного угла руля равно

$$\beta_e = \beta - \delta\beta. \quad (5.8)$$

Осевая скорость воды в струе от винта больше скорости судна, что влияет на скорость натекающего на руль потока. Приблизительно на переднем ходу  $V_S$  можно считать равной [40]

$$V_S = \bar{V}_n - 0,25 \cdot (\bar{V}_n - V_L) + 0,25 \cdot V_L, \quad (5.9)$$

где  $\bar{V}_n$  – соответствующая оборотам винта установившаяся скорость прямолинейного движения судна.

При движении судна вперед и работе винта на ЗХ особого внимания заслуживает ситуация, когда струя от винта направлена против натекающего на руль потока и вызывает существенное уменьшение его скорости. При ЗПХ этот эффект настолько значителен, что руль теряет свои свойства как средство управления. Для одновинтовых судов, руль которых расположен за винтом, приближенно можно считать

$$V_S = \begin{cases} \bar{V}_n - 0,25 \cdot (\bar{V}_n - V_L) + 0,25 \cdot V_L & \text{при } Z \geq 0; \\ (V_L + \bar{V}_n) \cdot \delta_F(V_L + \bar{V}_n) & \text{при } V_L \geq 0; Z < 0; \\ V & \text{при } V_L < 0; Z < 0; \end{cases} \quad (5.10)$$

Здесь  $\delta_F(X)$  – дельта функция

$$\delta_F(X) = \begin{cases} 0 & \text{при } X < 0 \\ 1 & \text{при } X \geq 0 \end{cases}$$

## 5.6. Гидродинамические характеристики рулей

Основной гидродинамической характеристикой руля как органа управления является **боковая сила**. Продольная сила на руле оказывает тормозящее действие на ход судна. Боковая и продольная силы на руле обычно находятся по его подъемной силе и силе сопротивления.

**Подъемная сила  $F_R$  и сила  $R_R$  сопротивления руля** являются функциями  $S_R$ ,  $\beta_e$  и  $V_S$ . Характер их изменения показан на рис. 5.8. Подъемная сила руля как крыла малого удлинения меняется практически линейно с ростом угла атаки до значения  $\beta_{\text{КР}}$ , а величина силы сопротивления на руле приближенно пропорциональна квадрату  $\beta_e$ . При углах  $\beta_e > \beta_{\text{КР}}$  происходит срыв потока

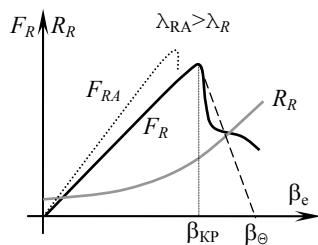


Рис. 5.8. Характер изменения сил  $F_R$  и  $R_R$

с кромки руля и величина его подъемной силы резко уменьшается. На рисунке показано, что с увеличением относительного удлинения руля ( $\lambda_{RA} > \lambda_R$ ) его подъемная сила несколько увеличивается ( $F_{RA} > F_R$ ), а критический угол уменьшается.

При приближенном расчете  $F_R$  участок ее изменения после  $\beta_{\text{КР}}$  заменяется прямолинейным (на рис. 5.8 пунктирная линия) и вводится понятие приведенного эффективного угла руля  $\hat{\beta}_e$

$$\hat{\beta}_e = \begin{cases} \beta_e & \text{при } \beta_e \leq \beta_{\text{КР}}; \\ \frac{\beta_{\text{КР}}(\beta_{\Theta} - \beta_e)}{\beta_{\Theta} - \beta_{\text{КР}}} & \text{при } \beta_{\text{КР}} < \beta_e \leq \beta_{\Theta}; \\ 0 & \text{при } \beta_{\Theta} < \beta_e \leq 90^{\circ}; \end{cases} \quad (5.11)$$

Для судовых рулей на ПХ можно считать  $\beta_{\text{КР}} \approx 35^{\circ}$ ,  $\beta_{\Theta} \approx 60^{\circ}$ . С учетом этого, расчет  $F_R$  и  $R_R$  выполняется по формулам

$$F_R = \frac{\rho}{2} c_f S_R V_S^2 \hat{\beta}_e, \quad R_R = \frac{\rho}{2} (C_{R0} + c_r \beta_e^2) S_P V_S^2, \quad (5.12)$$

где  $c_f$  - коэффициент подъемной силы руля;  $C_{R0}$ ,  $c_r$  - коэффициенты силы сопротивления руля;  $\rho$  - плотность воды. Значения  $c_f$ ,  $C_{R0}$ ,  $c_r$  для  $V_L \geq 0$  и  $V_L < 0$  несколько отличаются. Для ПХ они приближенно могут быть определены так:

$$\left. \begin{aligned} c_f &= \frac{2\pi\lambda_R}{2 + \lambda_R} \\ C_{R0} &= 0 \div 0.01 \\ c_r &= \left(2 - 5\frac{b_R}{L_R}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (5.13)$$

где  $b_R$  – максимальная толщина руля.

Ввиду малой по сравнению с корпусом длины руля, расстояние от ЦМ судна до центра давления воды на руль может считаться равным расстоянию от ЦМ судна до баллера руля.

**Боковая, продольная силы на руле и момент боковой силы.** По значениям  $F_R$  и  $R_R$  боковая и продольная силы на руле получаются по формулам, аналогичным (2.20)

$$\left. \begin{aligned} P_{RL} &= F_R \sin(\delta\beta) - R_R \cos(\delta\beta) \\ P_{RB} &= F_R \cos(\delta\beta) + R_R \sin(\delta\beta) \end{aligned} \right\}. \quad (5.14)$$

Момент от действия руля, приложенный к корпусу судна, находится по формуле

$$M_R = P_{RB} l_R. \quad (5.15)$$

где  $l_R$  – расстояние от ЦМ судна до баллера руля.

Следует подчеркнуть, что боковая сила руля (также и боковая сила на винтах) приложена к корме судна. Рельефно это проявляется, если на судне, которое движется прямолинейно малым ходом, переложить руль на борт и увеличить одновременно ход. В этом случае корма будет занесена в сторону, противоположную переключке руля. Эту характерную особенность поведения судна довольно точно сформулировал С.О.Макаров [16]: «Прежде всего, следует уяснить непреложную истину, что руль двигает в сторону не нос, а корму корабля, и что точка вращения корабля находится далеко впереди от середины судна».

Из-за этой особенности у одновинтового судна *лучше управляется на малых ходах кормовая оконечность*, что учитывается при швартовках судов.

## 5.7. Подруливающие устройства

Распространенным на морских судах вспомогательным средством управления являются подруливающие устройства (ПРУ). Они предназначены для управления судном в условиях, при которых

эффективность главных средств управления оказывается недостаточной (при маневрировании на малых скоростях либо при отсутствии хода, при поворотах в условиях ветра и/или течения и в ряде других ситуаций).

**Виды ПРУ.** На судах применяются различные виды ПРУ, что связано с типом судна, условиями размещения, требуемой мощностью, стоимостью и рядом других причин.

**По месту расположения** на судне ПРУ делятся на *носовые* (Bow thrusters) и *кормовые* (Stern thrusters). Как носовые, так и кормовые ПРУ устанавливают на возможно большем удалении от миделя с целью увеличения действующего на судно момента. Чаще всего судно имеет только носовое ПРУ. Это объясняется тем, что размещение кормовых ПРУ обычно сопровождается значительными трудностями, связанными с расположением в кормовой части судна валопроводов гребных винтов. Кроме того, у одновинтового судна носовая оконечность менее управляема, чем кормовая. При размещении носового ПРУ нельзя нарушать целостность таранной переборки. Не рекомендуется его также размещать в форпике. Наилучшим вариантом считается расположение носового ПРУ сразу за первой водонепроницаемой переборкой.

**В зависимости от направлений упора** различают *поперечные* (Transverse thrusters) и *азимутальные* (Azimuthing thrusters) ПРУ. Первые создают вектор силы упора, перпендикулярный к ДП судна. Вторые (поворотные винтовые колонки) обеспечивают выбор направления вектора упора в диапазоне курсовых углов от  $0^0$  до  $360^0$ .

**В зависимости от места выработки струи** от движителей (в канале внутри корпуса судна или вне корпуса) подруливающие устройства могут быть *туннельными* (Tunnel thrusters) и *ствольными* (Stem thrusters). *Туннельные* ПРУ бывают *одно-* и *двухканальными*. *Ствольные* ПРУ называют колонками. Они бывают *стационарными* (*неубирающимися*), *втягивающимися* и *заваливающимися*. Поворотные винтовые колонки могут иметь открытый винт и комплекс «винт-насадка». Применение насадки увеличивает создаваемый винтом упор.

**По типу движителя** различают *лопастные* (винтовые, крыльчатые) и *водопроточные* ПРУ (водомерные, гидромоторные, гидрореактивные). В англоязычной литературе винтовые ПРУ называют *Propeller thrusters*, а водопроточные – *Jet thrusters*. **Винтовые** ПРУ бывают с реверсивным ВФШ, с двумя нереверсивными ВФШ, с ВРШ. В *водопроточных* ПРУ используют центробежные осевые и эжекционные насосы, а также системы гребных винтов специальной конструкции с направляющими



устройствами между ними. На гражданских судах широко распространены винтовые ПРУ, которые при одинаковом создаваемом упоре потребляют в два раза меньше топлива, чем водопроточные.

**В зависимости от типа двигателя** ПРУ могут быть *дизельными, электрическими, гидравлическими*. Электрические и гидравлические моторы ПРУ являются вторичными двигателями. Первичным двигателем обычно служит дизель, расположенный в машинном отделении. Он вращает либо генератор, снабжающий энергией электромотор, либо насос, который создает давление в системе гидравлики ПРУ, необходимое для работы гидромотора. В зависимости от типа движителя электро- и гидромоторы могут быть реверсивными и неревверсивными. Они обеспечивают разную скорость вращения движителей. Особенно удобны гидромоторы, которые не требуют сложных передаточных механизмов, напрямую соединяются с валом импеллера и служат демпфером вибрации.

Классифицируются ПРУ и по ряду других признаков.

**Туннельные ПРУ.** На гражданских морских судах применяются главным образом поперечные ПРУ туннельного типа (рис.5.9). Они обычно **включают** в себя пульт управления, сквозной поперечный канал (туннель) в корпусе судна, расположенный в этом канале движитель, а также двигатель, который обеспечивает движитель необходимой энергией [26]. Канал ПРУ чаще всего имеет цилиндрическую форму и находится ниже ватерлинии. Входные отверстия канала (заборные сопла) снабжаются защитными решетками для предотвращения ПРУ от засорения посторонними предметами и от возможных поломок при таком засорении. Для снижения дополнительного сопротивления, вызванного наличием отверстий в корпусе, входные части канала ПРУ с кормовой стороны соединяются с корпусом с помощью ложкообразного выреза. У быстроходных судов с целью уменьшения сопротивления воды движению судна на переходе заборные сопла закрываются специальными обтекаемыми заслонками. Расположенный внутри канала движитель ПРУ может быть лопастным или водопроточным. Лопастные движители ПРУ называются *импеллерами*. Упор туннельного ПРУ создается за счет реакции потока, отбрасываемого движителем в сторону одного из бортов судна. Этот упор имеет направление противоположное направлению отбрасываемого потока.

**Управление туннельными ПРУ** (пуск, остановка, изменение направления и величины упора) осуществляются дистанционно с пульта ПРУ в рулевой рубке и с выносных постов управления на крыльях мостика. Для регулировки ПРУ предусматривается местное

управление непосредственно из помещения, где расположен их привод. Режимы работы ПРУ могут задаваться с помощью кнопок или рукоятки. В последнем случае может предусматриваться плавное изменение упора. На пульте ПРУ быстроходных судов могут быть органы для дистанционного закрытия крышек входных отверстий туннеля. Когда на судне имеются носовое и кормовое ПРУ, то каждое из них имеют свой пульт (секцию) управления. На рис. 5.10 приведена схема одного из пультов туннельного ПРУ.



Рис. 5.9. Туннельное ПРУ.

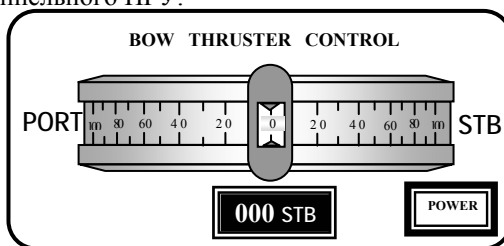


Рис. 5.10. Схема пульта туннельного ПРУ.

**Характеристики.** Туннельные ПРУ изготавливаются разной мощности (от 35 до 5000 лс). Современные винтовые туннельные ПРУ вырабатывают в швартовном режиме порядка  $20 \div 24$  lbf (фунтов силы) упора на одну лошадиную силу своей мощности. Эта цифра для водопроточных ПРУ примерно в два раза меньше. Заметим, что  $1\text{ lbf} = 0,45\text{ кгс} = 4,41\text{ Н}$ , а  $1\text{ лс} = 0,735\text{ кВт}$ .

По эмпирическому правилу, носовые ПРУ для возможности выполнения операций швартовки/отшвартовки должны быть способны развивать упор в lbf, равный двойной площади в квадратных футах подводной части продольного сечения судна по ДП; или двойной/тройной площади надводной части этого сечения (в зависимости от того, что больше). Если ориентироваться первым, то ПРУ в швартовном режиме должны развивать упор:

$$(P_{\text{ПРУ}})_{\text{lbf}} = 2 \times (L \times T)_{\text{ft}}^2.$$

Следует отметить, что эффективность ПРУ резко уменьшается по мере роста скорости хода. Наибольшую эффективность ПРУ имеют при работе в швартовном режиме. Это соответствует назначению ПРУ – обеспечению управляемости судна, не имеющего хода или движущегося с предельно малой скоростью. При таком ходе отличием в тяге ПРУ по сравнению со швартовным режимом можно пренебречь. Использование туннельных ПРУ эффективно на скоростях до 3 узлов.

На скорости 3 узла туннельные ПРУ теряют порядка 25% своего упора. При 7 узлах потери составляют более 50%.

**Основными геометрическими характеристикам** ПРУ являются диаметр туннеля и геометрические параметры движителя, а **кинематическими** – частота вращения импеллера, угол атаки его лопастей, скорость выброса воды из канала. В перечень **основных гидродинамических характеристик** туннельных ПРУ входят сила тяги и обусловленный этой силой вращающий судно момент. Сила тяги ПРУ, называемая также полной поперечной силой и полезным упором, равна разности силы упора и силы засасывания. Последняя представляет собой равнодействующую сил давления, развиваемых на неподвижных частях ПРУ. Сила засасывания всегда направлена в противоположную сторону вектора силы упора.

У туннельного ПРУ сила упора по отношению к корпусу судна имеет постоянную ориентацию, а движитель работает в близком к швартовному режиме. *Полезный упор* такого ПРУ определяется по формуле [26]:

$$P_{\text{ПУ}} \approx \rho \cdot S_{\text{ПУ}} v_{\text{ВВ}}^2, \quad (5.17)$$

где  $S_{\text{ПУ}}$  – площадь сечения канала;  $v_{\text{ВВ}}$  – скорость выброса воды.

*Вращающий судно момент* от работы ПРУ равен

$$M_{\text{ПУ}} = P_{\text{ПУ}} l_{\text{ПУ}}, \quad (5.18)$$

где  $l_{\text{ПУ}}$  – расстояние от канала ПРУ до ЦМ судна.

Рассмотрим движение судна от неподвижного состояния при использовании носового ПРУ. В начале работы под действием силы  $P_{\text{ПУ}}$  корпус судна начинает поворот относительно центра  $O$ , находящегося в кормовой части ДП судна или на ее продолжении (рис. 5.11,а). С увеличением скорости поворота растут окружная скорость ЦМ судна и центробежная сила  $P_{\text{Ц}}$ . В

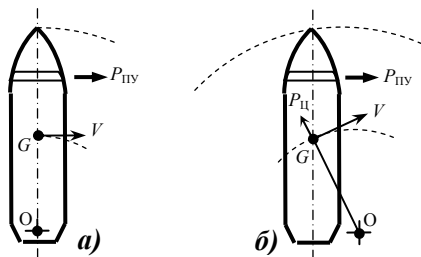


Рис. 5.11. Движение судна под действием носовых ПРУ

результате судно получает продольное движение, а центр циркуляции судна отходит от ДП в направлении борта поворота (рис. 5.11,б). Эту особенность следует учитывать при эксплуатации судна.

**Азимутальные ПРУ** (поворотные винтовые колонки) вначале были применены в системах динамического позиционирования буровых судов, а по истечению определенного времени ими стали оснащаться и другие плавсредства: суда для прокладки трубопроводов и кабелей, землесосы и землечерпалки, буксиры-спасатели и т.д. Нашли азимутальные ПРУ применение и на пассажирских лайнерах, паромах и на других судах, деятельность которых связана с частыми швартовками. Азимутальные ПРУ могут быть носовыми и кормовыми. Основной недостаток винтовых азимутальных ПРУ состоит в том, что в рабочем состоянии они выступают за пределы корпуса судна. Ряд водопроточных азимутальных ПРУ не имеют этого недостатка, но они менее экономичны.

**Состав азимутальных ПРУ** зависит от их типа. Например, гидравлические вытягивающиеся ПРУ (рис. 5.12) включают в себя: гидравлическую систему для подъема/опускания ПРУ, систему поворота по азимуту, гребной винт и соединенный с ним напрямую гидромотор, первичный двигатель и насос, систему трубопроводов, систему управления, вспомогательные устройства.



Рис. 5.12. Вытягивающееся азимутальное ПРУ.

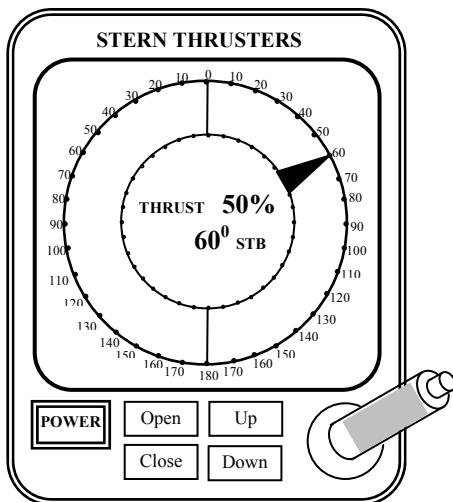


Рис. 5.13. Схема пульта азимутального ПРУ.

**Управление азимутальным ПРУ** (опускание, подъем, поворот по азимуту, пуск, остановка, изменение величины упора) производится дистанционно с панели ПРУ, являющейся на современных судах

секцией пульта управления судном. ПРУ можно оперировать и с выносных постов. Управляется ПРУ обычно джойстиковой системой. Направление наклона джойстика определяет курсовой угол оси гребного винта ПРУ, а угол наклона – задает величину упора. Он часто градуируется в процентах от максимального упора. Схематично панель управления азимутального ПРУ показана на рис. 5.13.

**Сигнализация.** Кроме органов управления на пульте ПРУ расположены средства сигнализации о неполадках в работе ПРУ. Так в гидравлических ПРУ имеется сигнализация о положении ПРУ (поднято, опущено), низком уровне, малом давлении и высокой температуре масла в системе, большой температуре охлаждающей воды.

**Характеристики.** Азимутальные ПРУ изготавливаются разной мощности (от 35 до 5000 лс). Они способны изменять направление вектора упора во всем диапазоне курсовых углов от  $0^0$  до  $360^0$ . Обеспечивается плавная установка величины модуля вектора упора. На упор в швартовном режиме они передают порядка  $25\div 30$  lbf/лс. Время подъема (опускания) ПРУ составляет около двух минут. Полный поворот по азимуту занимает не более 40 с. Скорость поворота по азимуту пропорциональна задаваемому углу поворота. Время реверсирования гидромотора составляет от 3 до 5 с. При увеличении скорости хода эффективность азимутальных ПРУ падает в меньшей степени, чем туннельных подруливающих устройств.

**В формуляре маневренных качеств судна** приводятся следующие характеристики подруливающих устройств:

- тип, количество, расположение, мощность;
- найденные по результатам испытаний или расчетным путем для судна в грузу и в балласте диаграммы поворотливости при отдельной и совместной работе носового и кормового ПРУ (для нулевой скорости хода при неработающих главных двигателях);
- диаграммы, характеризующие зависимость эффективности ПРУ от скорости переднего хода;
- сведения о влиянии ветра на работу ПРУ.

## 6. Математические модели и переходные характеристики судна

### 6.1. Математическая модель движения надводного судна

**О модели системы управления.** Под математической моделью системы управления понимают совокупность формальных выражений, отражающих поведение СУ во времени и позволяющих прогнозировать ее состояние. Как известно, технические системы управления обобщенно представляют двумя комплексами: УУ и ОУ. Обычно СУ включает в свой состав те или иные средства управления. В зависимости от особенностей системы эти средства относят к УУ или к ОУ, либо рассматривают отдельно как третий элемент системы. В задачах судовождения средства управления чаще всего относят к ОУ, которым считается судно. В формальном смысле каждый из элементов СУ, какой бы физической природы он ни был, предназначен для направленного преобразования входных воздействий в выходные. В результате математическое описание всех элементов СУ отражает зависимость между их входом и выходом. Если обозначить вектор состояния системы  $\mathbf{X}$  и считать, что поведение системы во времени отражает скорость его изменения  $\dot{\mathbf{X}}$ , то обобщенно модель СУ можно представить функцией

$$\dot{\mathbf{X}} = \Phi\{\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{Q}\},$$

где  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{Q}$  – соответственно вектора управления и возмущений.

Следует отметить, что вектор состояния системы  $\mathbf{X}$  включает выходные величины ОУ (включая параметры силовых средств) и устройства управления.

Если сигналы управления формируются в УУ в зависимости от результатов наблюдений выходных величин системы, то ее модель дополняется описанием процесса измерений с учетом его погрешностей. Из вышеизложенного можно установить, что модель системы управления движением судна в общем случае должна включать математические выражения:

- процесса и погрешностей измерений выходных параметров СУ;
- алгоритма выработки управляющих сигналов;
- динамики силовых средств;
- возмущающих воздействий;
- реакции судна на входные воздействия (динамики судна).

Эти выражения являются взаимозависимыми, что усложняет их анализ. Математическая модель должна отражать, по возможности, только существенные для рассматриваемой задачи стороны моделируемого процесса и представляться в виде, облегчающем решение этой задачи. Главное при образовании модели – включить в нее основные определяющие процесс управления факторы. Но не менее важно опустить не влияющие на этот процесс детали.

Для того чтобы управлением достигать поставленные цели, необходимо, прежде всего, знать, как судно реагирует на управляющие воздействия. Этому вопросу посвящен материал этой главы. В ней характеризуются модели динамики судна, отражающие его реакцию на управляющие воздействия в виде перекладки руля и частоты вращения ВФШ. Это объясняется тем, что такими органами управления снабжено большинство морских судов. Сведения о динамике судов с другими движительно-рулевыми комплексами можно найти в литературе [15, 26].

**Уравнения движения надводного судна.** Получение моделей динамики судов основывается на трудах К.К.Федяевского, А.М.Басина, Г.В.Соболева, Р.Я.Першица, А.Д.Гофмана, Н. Норрбина, К.Номото и других ученых [2, 3, 7, 9, 15, 19, 21, 29, 33, 35, 42]. Среди формальных описаний движения надводного судна выделяют полные модели. Они служат для представления всех маневров судна на горизонтальной плоскости (в 3-х степенях свободы). Эти модели должны быть применимы к разным судам, обеспечивать учет влияния ветра, течения, волнения, мелководья и отображать процессы движения в реальном и в ускоренном времени. При решении многих задач полные модели не нужны. Достаточным является использование частных моделей динамики судна, которые отражают связи лишь между отдельными выходными и входными величинами этого объекта.

Наличие обладающих широкими возможностями персональных компьютеров, средств отображения и регистрации информации, мощных программных пакетов компьютерной графики обуславливают возможность применения полной модели динамики надводного судна для различных целей. Она может использоваться как основа:

- нахождения наилучшего решения при разработке систем управления движением судна;
- численной оценки и анализа таких систем;
- для ознакомления обучаемых с особенностями динамики судна и систем управления им;

- предсказания поведения судна в различных условиях эксплуатации и т.д.

При составлении уравнений динамики надводного судна обычно используют следующие **допущения**. Перемещение реального судна принимают эквивалентным движению его погруженной части в плоскости ватерлинии без учета волнообразования на свободной поверхности воды. Подводную часть корпуса считают симметричной относительно плоскости мидель-шпангоута и ДП судна, а центр массы и центр бокового сопротивления судна – находящимися в плоскости мидель-шпангоута. Полагают также, что крен у судна отсутствует, что скорость хода не сказывается на дифференте и средней осадке, а ускорения в движении судна не влияют на гидродинамические характеристики средств управления.

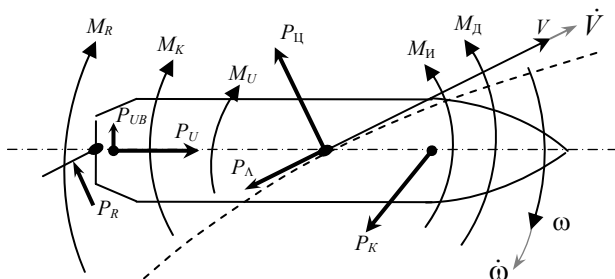


Рис. 6.1. Схема сил и моментов на корпусе судна

Полная модель экономно представляется в *жестко связанной с судном прямоугольной системе координат  $Igb$* , охарактеризованной в главе 3. Выражения для приближенного расчета основных воздействий на судно в этой координатной системе приведены в главах 3, 4, 5. При тихой погоде на судно влияют (рис.6.1) инерционные сила и ее момент ( $P_\Lambda, M_\И$ ), центробежная сила ( $P_\Ц$ ), позиционная гидродинамическая сила и ее момент ( $P_\У, M_\У$ ), упор винта ( $P_\УВ, M_\УВ$ ), боковая сила винта и ее момент ( $P_\УВ, M_\УВ$ ), сила на руле и ее момент ( $P_\Р, M_\Р$ ). В условиях ветроволновых возмущений к этим воздействиям добавляются силы и моменты от ветра и волн ( $P_a, M_a, P_w, M_w$ ).

При образовании модели динамики судна используется принцип Даламбера, согласно которому:



$$\left. \begin{aligned} \sum P_{iL} &= 0 \\ \sum P_{iB} &= 0 \\ \sum M_i &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (6.1)$$

где  $\sum P_{iL}$ ,  $\sum P_{iB}$  – суммы проекций на оси  $Gl$ ,  $Gb$  действующих на судно сил;  $\sum M_i$  – суммарный относительно ЦМ судна момент сил на корпусе.

Суммы проекций воздействий на корпус включают в себя продольные и поперечные составляющие, а также моменты, перечисленных выше сил (инерционных, гидродинамических, управляющих и возмущающих):

$$\left. \begin{aligned} \sum P_{iL} &= P_{\Lambda L} + P_{\Gamma L} + P_{KL} + P_U + P_{RL} + P_{aL} + P_{wL} \\ \sum P_{iB} &= P_{\Lambda B} + P_{\Gamma B} + P_{KB} + P_{UB} + P_{RB} + P_{aB} + P_{wB} \\ \sum M_i &= M_{\text{И}} + M_{\text{К}} + M_{\text{Д}} + M_U + M_R + M_a + M_w \end{aligned} \right\}. \quad (6.2)$$

Оставив в левой части (6.1) выражения инерционных сил, обусловленных изменением линейной и угловой скорости, получим систему уравнений движения надводного судна в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} m_L \frac{dV_L}{dt} &= P_{\Gamma L} + P_{KL} + P_U + P_{RL} + P_{aL} + P_{wL} \\ m_B \frac{dV_B}{dt} &= P_{\Gamma B} + P_{KB} + P_{UB} + P_{RB} + P_{aB} + P_{wB} \\ J_{\omega} \frac{d\omega}{dt} &= M_{\text{К}} + M_{\text{Д}} + M_U + M_R + M_a + M_w \end{aligned} \right\}. \quad (6.3)$$

**Учет динамики силовых средств.** Чтобы учесть характер преобразования сигналов управления силовыми средствами, к системе (6.3) требуется добавить уравнения динамики ГДУ и рулевого устройства. Будем считать, что переходной процесс главной энергетической установки с ВФШ описывается уравнением (4.4):

$$T_{\eta} \dot{\eta} + \eta = k_{\eta} \nabla n, \quad (6.4)$$

где  $\nabla n = n_3 - n$ .

Динамику РУ представим выражением (5.3):

$$T_{\Omega} \dot{\Omega} + \Omega = k_{\Omega} \nabla \hat{\beta}. \quad (6.5)$$

Добавив к системе (6.3) уравнения (6.4), (6.5), получим модель изменения состояния судна, управляемого рулем и винтом, с учетом динамики силовых средств:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_L}{dt} &= \frac{1}{m_L} (P_{\text{UL}} + P_{\text{KL}} + P_U + P_{\text{RL}} + P_{aL} + P_{wL}) \\ \frac{dV_B}{dt} &= \frac{1}{m_B} (P_{\text{UB}} + P_{\text{KB}} + P_{\text{UB}} + P_{\text{RB}} + P_{aB} + P_{wB}) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J_\omega} (M_K + M_{\text{Д}} + M_U + M_R + M_a + M_w) \\ \frac{d\eta}{dt} &= \frac{1}{T_\eta} [k_\eta (n_3 - n) - \eta] \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{T_\Omega} (k_\Omega \nabla \hat{\beta} - \Omega) \end{aligned} \right\}. \quad (6.6)$$

Входными величинами этой модели служат задающие перекладку руля и частоту вращения винта команды, а также значения факторов, возмущающих движение судна. Основными выходными параметрами модели являются:  $V_L, V_B, \omega, \eta, \Omega$ . В совокупности они образуют вектор состояния движения судна. По элементам этого вектора рассчитываются другие кинематические параметры ОУ: частота вращения винта, угол кладки руля, курс, путевой угол и скорость, координаты судна и т.д.

Частота вращения винта и угол перекладки руля находятся так

$$n = n_0 + \int \eta dt, \quad \beta = \beta_0 + \int \Omega dt, \quad (6.7)$$

где  $n_0, \beta_0$  – начальные значения частоты вращения винта и положения руля.

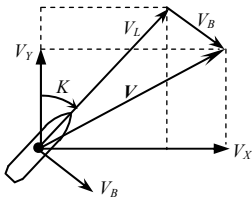


Рис. 6.2. Параметры судна в системе  $хоу$

Текущий курс судна получается добавлением к начальному значению  $K_0$  результата интегрирования угловой скорости судна

$$K = K_0 + \int \omega dt. \quad (6.8)$$

Составляющие скорости судна по меридиану и параллели рассчитываются по формулам, которые поясняются рис. 6.2

$$\left. \begin{aligned} V_Y &= V_L \cos K - V_B \sin K \\ V_X &= V_L \sin K + V_B \cos K \end{aligned} \right\}. \quad (6.9)$$

Путевая скорость и путевой угол судна определяются выражениями

$$V = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2}, \quad \text{ПУ} = \text{arctg} \frac{V_X}{V_Y}. \quad (6.10)$$

Координаты судна в ориентированной по меридиану системе координат  $хоу$  находятся так

$$\left. \begin{aligned} Y &= Y_0 + \int V_Y dt \\ X &= X_0 + \int V_X dt \end{aligned} \right\}, \quad (6.11)$$

где  $X_0, Y_0$  – начальные координаты судна.

В совокупности выражения (6.6)-(6.11) представляют собой одну из полных моделей движения надводного судна, управляемого рулем и винтом.

Удобным аппаратом **моделирования динамических процессов на компьютере** (в том числе и движения судна) являются разностные уравнения. Разностное уравнение описывает элементарный цикл (длительностью  $\Delta t$ ) динамического процесса и позволяет итеративно вычислять координаты последовательных его состояний. Любое дифференциальное уравнение, решение которого пытаются найти с помощью численного метода с одинаковым шагом переменной, приводит к разностному уравнению. Основное различие между дифференциальным и разностным уравнениями состоит в величине независимой переменной. Поэтому разностные уравнения процессов можно получать из дифференциальных заменой бесконечно малого приращения  $dt$  подходящим конечным  $\Delta t$ .

Дифференциальная модель динамики судна (6.6) может быть приведена к разностному виду следующим образом. Обозначим вектор состояния движения судна через  $\mathbf{Y}$ , его производную как  $d\mathbf{Y}/dt$ , вектор управления –  $\mathbf{U}$ , вектор возмущений –  $\mathbf{Q}$ :

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} V_L \\ V_B \\ \omega \\ \eta \\ \Omega \end{pmatrix}; \quad d\mathbf{Y}/dt = \begin{pmatrix} \dot{V}_L \\ \dot{V}_B \\ \dot{\omega} \\ \dot{\eta} \\ \dot{\Omega} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} \beta_3 \\ n_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} K_a \\ v_a \\ K_w \\ B_w \end{pmatrix};$$

где  $B_w$  – балл волнения. Все компоненты этих векторов зависят от времени. Силы и моменты в правой части (6.6) являются функциями

элементов векторов  $Y$ ,  $U$ ,  $Q$ . Поэтому система (6.6) в матричном виде может быть представлена так

$$dY/dt = \Phi \{Y(t), U(t), Q(t)\}. \quad (6.12)$$

Выберем достаточно малый интервал времени  $\Delta t$ , при котором можно считать  $dY/dt \approx \Delta Y/\Delta t$ . Обозначим моменты времени, следующие через интервал времени  $\Delta t$ , как:  $0, 1, 2, \dots, J-1, J, J+1, \dots$ . Представим  $\Delta Y$  в виде:  $\Delta Y = Y_{J+1} - Y_J$ , а значения векторов  $Y(t)$ ,  $U(t)$ ,  $Q(t)$  в момент времени  $J$  – как  $Y_J$ ,  $U_J$ ,  $Q_J$ . Подставив эти значения в дифференциальное уравнение (6.12), получим разностное уравнение:

$$Y_{J+1} = Y_J + \Phi(Y_J, U_J, Q_J) \Delta t. \quad (6.13)$$

Вычисления по этому выражению выполняются *циклически*. Определив по значениям параметров движения судна, управляющих сигналов и возмущающих воздействий в момент времени  $J$  значения сил и моментов, по выражению (6.13) рассчитывают кинематические параметры судна в последующий момент времени  $J+1$ . Затем момент времени  $J+1$  становится текущим  $J$ , и вычисления повторяются. Таким образом, моделирование сводится к последовательным вычислениям по формулам (6.13). Интервал времени  $\Delta t$  при расчете берется порядка 1 с., что обеспечивает достаточную для практических целей точность вычислений.

Используя в полученной модели соответствующие конкретному судну коэффициенты, можно на компьютере проигрывать различные его маневры в ускоренном и в реальном времени, а также находить статические и переходные характеристики судна. При добавлении к модели алгоритмов систем управляющих движением судна (УУ), становится возможным на компьютере исследовать их эффективность.

## 6.2. Частные математические модели судна

При решении ряда задач судовождения применяются частные модели движения надводного судна, как объекта управления курсом, боковым смещением, скоростью хода и другими координатами. Первые модели используются при разработке и анализе авторулевых (управляющих курсом устройств), вторые – систем вождения судна по маршруту, третьи – для описания маневров скоростью. Частные модели позволяют облегчить выбор оптимальных решений при синтезе систем автоматического управления и упростить их анализ.

### 6.2.1. Модели судна как объекта управления курсом

Для упрощенного описания движения судна по курсу рекомендовано использовать предложенное Номото **нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка** [42]:

$$\tau_1 \tau_2 \ddot{\omega} + (\tau_1 + \tau_2) \dot{\omega} + \omega + H(\omega) = k_S \beta + k_S \tau_3 \dot{\beta}, \quad (6.14)$$

где  $H(\omega) = c_2 \omega \cdot |\omega| + c_3 \omega^3$ . Когда судно устойчиво на курсе, то все коэффициенты в этом уравнении положительны. Если оно неустойчиво, то  $\tau_1 < 0$ ,  $k_1 < 0$ ,  $c_2 < 0$ , а  $\tau_2 > 0$ ,  $\tau_3 > 0$ . Знак  $c_3$  зависит не только от устойчивости судна, но и от вида диаграммы поворотливости при больших кладках руля.

Компонентами  $c_3 \omega^3$ ,  $k_S \tau_3 \dot{\beta}$  уравнения (6.14) часто пренебрегают и рассматривают модель судна в виде:

$$\tau_1 \tau_2 \ddot{\omega} + (\tau_1 + \tau_2) \dot{\omega} + \omega + c_2 \omega \cdot |\omega| = k_S \beta. \quad (6.15)$$

Эта модель удовлетворительно отражает движение устойчивых и неустойчивых на курсе судов при «слабых» маневрах курсом. Она используется для приближенного описания и «сильных» такого вида маневров. Численные значения параметров модели (6.15) для конкретного судна рассчитываются аналитически, либо находятся на основе выполнения маневров «циркуляция» и «зигзаг». При условии  $\ddot{\omega} = 0$ ,  $\dot{\omega} = 0$  из (6.15) получается выражение *статической зависимости* угловой скорости судна от кладки руля:

$$|\bar{\omega}| \cdot \bar{\omega} \pm \frac{1}{c_2} \bar{\omega} - \frac{k_S}{c_2} \beta = 0; \quad (6.15,а)$$

где  $\bar{\omega}$  – установившееся значение угловой скорости на циркуляции.

Устойчивым на курсе судам в этом выражении соответствует знак «+» перед  $\bar{\omega}$ , а неустойчивым – знак «-». График  $\bar{\omega} = f(\beta)$  – диаграмма поворотливости. Так как она имеет две симметричные относительно начала координат ветви ( $\omega \geq 0$  и  $\omega \leq 0$ ), то достаточно рассмотреть только одну из них – *верхнюю ветвь*:

$$\bar{\omega}^2 \pm \frac{1}{c_2} \bar{\omega} - \frac{k_S}{c_2} \beta = 0; \quad \text{где } \bar{\omega} \geq 0. \quad (6.16)$$

Для устойчивых на курсе судов отсюда следует

$$\bar{\omega} = -\frac{1}{2c_2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2c_2}\right)^2 + \frac{k_S}{c_2} \beta}, \quad (6.17)$$

а для неустойчивых

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2c_2} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2c_2}\right)^2 + \frac{k_S}{c_2}\beta}; \text{ где } \bar{\omega} \geq 0. \quad (6.18)$$

Зависимости (6.17) и (6.18) представлены на рис. 6.3. Устойчивого на курсе судна при  $\beta = 0$ ,  $\bar{\omega} = 0$ . Для неустойчивого судна значению  $\beta = 0$  соответствуют две точки:  $\bar{\omega}_1 = 0$  и  $\bar{\omega}_2 = \bar{\omega}_0$ , где  $\bar{\omega}_0 = 1/c_2$ ,  $\beta_{\Pi}$  - предельный угол обратной поворотливости

$$\beta_{\Pi} = \frac{c_2}{4k_S} \bar{\omega}_0^2 - \frac{1}{2k_S} \bar{\omega}_0. \quad (6.19)$$

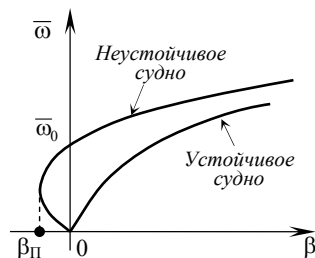


Рис. 6.3. Верхняя часть диаграммы поворотливости

Нелинейная модель создает определенные трудности при анализе и синтезе систем автоматического управления. Поэтому ее применяют только в случаях, когда это действительно необходимо. Для задачи стабилизации курса используют обычно **линейное уравнение движения судна по курсу**. Это считают допустимым, учитывая малость отклонений от заданного курса и значений управляющих воздействий, а также постоянство скорости хода. Линейное уравнение получается из нелинейного (6.15) при условии, что  $c_2 \omega \cdot |\omega| = 0$ :

$$\tau_1 \tau_2 \ddot{\omega} + (\tau_1 + \tau_2) \dot{\omega} + \omega = k_S \beta. \quad (6.20)$$

Это уравнение является основным при анализе систем стабилизации курса судна [4]. Для практических инженерных расчетов порядок (6.20) понижают, учитывая, что корни его характеристического уравнения действительные числа:

$$\tau_1 \dot{\omega} \pm \omega = k_S \beta, \quad (6.21)$$

где  $\tau_1$  - постоянная времени судна, с;  $k_S$  - коэффициент передачи по управляющему воздействию,  $c^{-1}$ .

Устойчивым на курсе судам в этом уравнении соответствует знак «+» перед  $\bar{\omega}$ , а неустойчивым - «-».

Оба параметра линейной модели судна зависят от скорости хода. Для современных судов при скоростях 10÷17 узлов они лежат в пределах:  $k_S = 0,03 \div 0,15 \text{ с}^{-1}$ ;  $\tau_1 = 10 \div 70 \text{ с}$ . [4].

Если устойчивое на курсе судно, описываемое моделью (6.21), удерживалось на одном курсе, а затем руль был переложено на величину  $\beta_0$ , то реакция судна будет следующей:

$$\left. \begin{aligned} \omega(t) &= k_S \beta_0 [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_1})] \\ K(t) &= K_0 + k_S \beta_0 t - \tau_1 \omega(t) \end{aligned} \right\}. \quad (6.22)$$

Графики зависимостей (6.22) представлены на рис. 6.4.

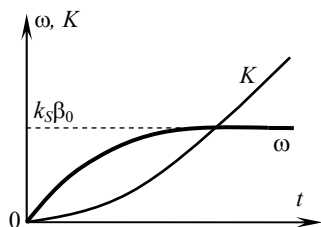


Рис.6.4. Изменение  $\omega$  и  $K$  при ступенчатом воздействии

### 6.2.2. Модель системы «АР-судно» как ОУ боковым смещением

При проводке судна по линии пути обычно управляют боковым смещением стабилизированного на курсе судна (системой «АР-судно»). Модель этого ОУ считается линейной:

$$T_r \dot{r} + r = V \cdot U + v_{C\perp}, \quad (6.23)$$

где  $T_r$  – постоянная времени системы «АР-судно»;  $V$  – скорость хода;  $U$  – поправка к удерживаемому АР курсу;  $r$  – боковое отклонение от линии пути;  $v_{C\perp}$  – скорость бокового сноса.

При коррекциях курса, проводимых через больший 1,5 мин. интервал времени, инерционностью ОУ обычно пренебрегают, и скорость управляемого бокового смещения системы «АР-судно» считают пропорциональной  $U$ . Отсюда следует

$$\dot{r} = V \cdot U + v_{C\perp}. \quad (6.24)$$

В процессе движения возникает отклонение судна от намеченного пути из-за действия течения, ветра, волнения и погрешностей средств счисления. Вызываемое этими факторами смещение судна (снос) разделяется на детерминированное и случайное. Детерминированная составляющая находится при счислении, методика ее учета освещается в курсах навигации. Для определения случайной компоненты сноса используют обсервации. Чтобы выполнить эту задачу наилучшим образом, учитывается автокорреляционная функция, описывающая характер этой компоненты сноса [6]:

$$K_V(\tau) = \sigma_V^2 \exp(-c_V \tau). \quad (6.25)$$

При использовании традиционных методов учета ветра, течения и погрешностей курсоуказания, параметры этой функции находятся в пределах:  $\sigma_V = 0,2 \div 0,5$  узла;  $c_V = 0,1 \div 0,3$  ч<sup>-1</sup>.

### 6.2.3. Модель судна как объекта управления скоростью хода

Для описания маневров скоростью в судовождении обычно используется уравнение продольного движения судна, не учитывающее возможные отклонения судна от удерживаемого курса:

$$m_L \frac{dV}{dt} + R = P_U, \quad (6.26)$$

где  $m_L$  – масса судна с учетом присоединенной массы;  $R$  – сила сопротивления воды движению судна;  $P_U$  – упор винта.

Обычно с помощью этой модели находят инерционные характеристики судна. Получаемые результаты зависят от принимаемых предположений относительно компонентов модели. Обычно удовлетворительная точность расчета инерционных характеристик судна достигается при следующих допущениях:

- присоединенная масса в ходе маневра остается неизменной;
- в процессе разгона и торможения траектория судна прямолинейна;
- сопротивление  $R$  воды пропорционально квадрату скорости;
- частота вращения гребного винта не зависит от скорости судна;
- упор винта является функцией мгновенного значения скорости и установившейся скорости в режиме прямолинейного движения, соответствующей положению задающего органа.

Следует отметить, что в действительности траектория одновинтовых судов при реверсе отклоняется от прямой линии. Это отклонение у среднетоннажных судов достигает (по данным Г.И.Зильмана и А.А.Тер-Захарьянца) 10÷15%, а у крупнотоннажных судов – до 40% тормозного пути. Для ГДУ с предельным регулятором частота вращения винта в швартовном режиме обычно меньше чем при установившемся прямолинейном движении порядка на 10÷15%.

При моделировании на компьютере маневров скоростью в динамике модель (6.26) используют в разностном виде. Для перехода к этому виду выбирается малый интервал времени  $\Delta t = 1, 2$  с. Текущее значение скорости обозначается  $V_J$ . Бесконечно малые приращения в уравнении (6.26) заменяются конечными

$$dt = \Delta t; \quad dV = V_{J+1} - V_J. \quad (6.27)$$



В результате из (6.26), получается описание процесса изменения скорости в разностном виде

$$V_{J+1} = V_J + \frac{1}{m_L}(P_{U,J} - K_{K0}V_J^2)\Delta t. \quad (6.28)$$

По этому выражению на компьютере последовательно можно рассчитывать значения скорости судна в процессе маневра.

### 6.3. Статические и переходные характеристики судна

Маневренные характеристики имеют первостепенное значение при анализе и синтезе систем управления движением судна. Важен учет этих показателей и в практике судовождения. Распространенные из этих показателей, статические и переходные характеристики, дают наглядное представление об управляемости судна. Они позволяют сравнивать маневренные качества различных судов и прогнозировать реакцию конкретного судна на основные управляющие воздействия. Эти характеристики разделяют на *стандартные (основные)* и *эксплуатационные*.

**Стандартные характеристики управляемости** соответствуют:

- глубокой, неограниченной акватории;
- невозмущенной среде (отсутствию ветра, течения, волнения);
- полной загрузке на ровный киль;
- устойчивому движению перед маневром ППХ, если не оговорено иное.

**Эксплуатационные характеристики** отражают свойства судна как объекта управления в определенных условиях эксплуатации: при конкретной загрузке, на мелководье с той или иной глубиной акватории, при определенной силе ветра и т.д. Ввиду многообразия условий эксплуатации управляемость судов обычно представляется стандартными статическими и переходными характеристиками.

### 6.4. Статические характеристики управляемого рулем судна

Статические показатели управляемого рулем судна представляют собой зависимости установившихся значений элементов движения судна на циркуляциях от углов руля, с которыми эти циркуляции совершаются.

**Диаграмма поворотливости судна.** Основная статическая характеристика управляемого рулем судна связывает значения

параметра, отражающего скорость поворота на установившейся циркуляции, со значением угла руля при стандартных условиях. Графическое представление этой зависимости называется *диаграммой поворотливости судна*. Она может отображаться в одной из следующих форм [26]:

$$L/\bar{R}_{Ц} = f(\beta), \quad \bar{\omega} = f_1(\beta), \quad \bar{\omega}/\bar{\omega}_{\max} = f_2(\beta),$$

где  $\bar{R}_{Ц}$  - радиус установившейся циркуляции;  $\bar{\omega}_{\max}$  - установившаяся угловая скорость на циркуляции с максимальной кладкой руля. Диаграмма поворотливости в виде зависимости относительной кривизны траектории судна от перекладки руля  $L/\bar{R}_{Ц} = f(\beta)$  для устойчивого и неустойчивого на курсе судна представлена на рис. 6.5 и 6.6.

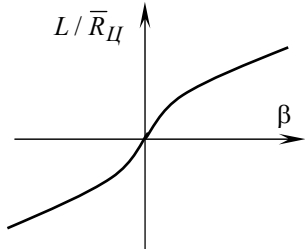


Рис. 6.5. Диаграмма поворотливости устойчивого на курсе судна

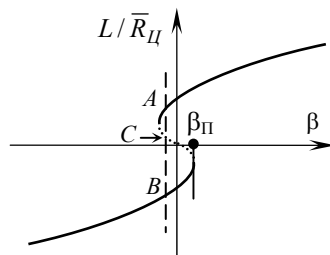


Рис. 6.6. Диаграмма поворотливости неустойчивого на курсе судна

**У устойчивого на курсе судна** каждой кладке руля соответствует единственное значение относительной кривизны траектории. Когда у судна поворотливость вправо и влево одинакова, то диаграмма симметрична относительно начала координат. Если при движении одним курсом развивается боковая сила от работы винта и/или от несимметричности обводов корпуса, то диаграмма смещается вправо либо влево. Точка пересечения линии диаграммы с горизонтальной осью в этом случае указывает на среднее положение руля, при котором обеспечивается прямолинейное движение судна.

**У неустойчивого на курсе судна** существует зона нестабильного движения (на рис. 6.6: от  $-\beta_{П}$  до  $+\beta_{П}$ , где  $\beta_{П}$  - *предельный угол обратной поворотливости*). Внутри зоны неустойчивости каждому положению руля соответствуют три установившиеся циркуляции, т.е. три состояния равновесия. Два из них, которые обозначены на рисунке точками *A* и *B*, являются устойчивыми, а третье состояние (точка

С) – неустойчивым. По отвечающим точкам  $A$ ,  $B$ ,  $C$  циркуляционным траекториям судно способно совершать движение, однако на первых двух траекториях перемещение судна будет устойчивым, а на третьей – нестабильным. На третьей траектории без специальных воздействий судно не удержится, а перейдет от нее к движению на какой-то одной из двух первых траекторий. Циркуляция с устойчивыми параметрами движения, при которой знак угловой скорости судна совпадает со знаком переключки руля, называется *прямой*, а когда знаки этих параметров противоположны – *обратной*.

При положении руля в ДП неустойчивое судно будет совершать вправо либо влево самопроизвольное циркуляционное движение с относительной кривизной, соответствующей точкам пересечения сплошной линией диаграммы поворотливости вертикальной координатной оси. Чем ниже собственная устойчивость на курсе, тем более крутую циркуляцию будет совершать судно с непереложенным рулем. Для вывода судна из самопроизвольной циркуляции, совершающейся в сторону одного из бортов, необходимо переложить руль в сторону противоположного борта на угол, больший  $\beta_{\Pi}$ .

**Статическая характеристика**  $\bar{\alpha} = f_{\alpha}(\beta)$ . Между углом дрейфа  $\bar{\alpha}$  в ЦМ судна и относительным радиусом кривизны  $L/\bar{R}_{Ц}$  на установившейся циркуляции в стандартных условиях существует приближенное соотношение, устанавливаемое формулой Мунка [9]:

$$\bar{\alpha} \approx k_A \frac{L}{\bar{R}_{Ц}};$$

где  $k_A = 0,4 \div 0,45$ . Поэтому статическая характеристика  $\bar{\alpha} = f_{\alpha}(\beta)$  имеет точно такой же вид, как и диаграмма поворотливости

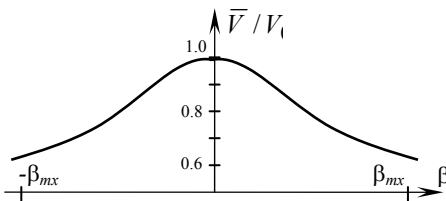


Рис. 6.7. Статическая характеристика

$$\bar{V}/V_0 = f_V(\beta)$$

$$L/\bar{R}_{Ц} = f(\beta).$$

**Статическая зависимость**  $\bar{V}/V_0 = f_V(\beta)$ .

Причинами падения скорости на циркуляции являются увеличение сопротивления воды движению судна из-за угла дрейфа и нахождения руля в

отклоненном положении, снижение упора винта от уменьшения частоты его вращения. Зависимость падения скорости судна на

установившейся циркуляции от перекладки руля, с которой она выполняется, имеет вид, изображенный на рис. 6.7. У среднетоннажных судов на установившейся циркуляции с максимальной перекладкой руля падение скорости в среднем составляет  $0,4 \cdot V_0$ .

Отношение скорости  $\bar{V}$  на установившейся циркуляции к скорости  $V_0$  судна перед циркуляцией может быть оценено по формуле Г.В.Соболева [24]:

$$\bar{V} / V_0 \approx \frac{1}{\sqrt[3]{1 + 10(L/\bar{R}_{Ц})^2}}. \quad (6.29)$$

Грубо можно считать:

$$(V_0 - \bar{V}) / V_0 \approx 0,6 \cdot L / \bar{R}_{Ц}. \quad (6.30)$$

**Построение диаграммы поворотливости** судна по результатам маневра «прямая спираль». Маневр «прямая спираль» называется также «спиралью Дидонне» по имени первого председателя Международного комитета по маневрированию, рекомендовавшего этот маневр в качестве стандартной программы испытаний.

**Маневр выполняют в следующем порядке.** При движении судна постоянной скоростью на прямом курсе руль переключают на  $30^0$  правого борта и удерживают его в таком положении до момента установления на одном значении угловой скорости. Примерно через минуту после этого угол перекладки руля уменьшают на  $5^0$ , и оставляют его неизменным пока угловая скорость вновь не станет постоянной. В указанной последовательности продолжают испытания до тех пор, пока руль не будет переложено с  $30^0$  правого борта на  $30^0$  левого борта. В диапазоне углов руля  $\pm 5^0$  шаг его перекладки уменьшают до  $1^0$ . Затем маневр повторяют, начиная с перекладки руля на левый борт. Траектория судна при маневре «прямая спираль» имеет вид, показанный на рис. 6.8.

В процессе маневра *регистрируют* углы перекладки руля  $\beta_j$ , а также соответствующие им установившиеся значения угловой  $\bar{\omega}_j$  и линейной  $\bar{V}_j$  скорости судна. Эти параметры измеряются гиротаксометром и приемоиндикатором DGPS. В табл. 6.1 для примера приведены результаты наблюдения маневра «прямая спираль» на одном из судов типа «Река-море», выполненным с начальной перекладкой руля вправо.

Рис. 6.8. Траектория судна при маневре «прямая спираль».

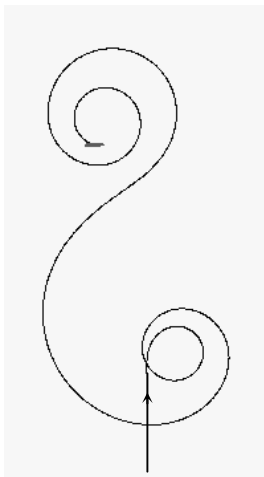


Таблица 6.1 – Результаты испытаний

$\beta^0$	$\bar{\omega} \text{ } ^\circ/\text{с}$	$\bar{V} \text{ уз}$	$\beta^0$	$\bar{\omega} \text{ } ^\circ/\text{с}$	$\bar{V} \text{ уз}$
30	1,08	6,1	0	0,44	10,8
25	1,02	6,5	-1	0,35	10,9
20	0,96	7,2	-2	0,15	11,1
15	0,90	7,9	-3	-0,49	11,1
10	0,82	8,8	-4	-0,69	10,5
5	0,67	9,1	-5	-0,70	9,9
4	0,63	9,4	-10	-0,84	9,1
3	0,60	9,7	-15	-0,93	8,2
2	0,56	10,0	-20	-0,99	7,5
1	0,51	10,3	-25	-1,04	6,8
0	0,44	10,8	-30	-1,08	6,2

**Обработка результатов маневра.** Обычно у одновинтовых судов с винтом правого вращения при нулевом положении руля нос стремится уклониться вправо. Поэтому у таких судов диаграмма поворотливости немного смещена влево по оси  $o\beta$ . Для определения этого смещения маневр «прямая спираль» выполняется дважды: первый раз, начиная с перекладки руля вправо, второй раз – влево.

Для упрощения допустим, что поворотливость судна вправо и влево одинакова. Тогда диаграмму поворотливости можно построить по наблюдениям одного маневра «прямая спираль». Обработка измерений в таком упрощенном варианте производится следующим образом. По данным  $\bar{\omega}_j, \bar{V}_j$  находят значения  $L/\bar{R}_Ц$  для разных углов руля  $\beta_j$ :  $(L/\bar{R}_Ц)_j = \bar{\omega}_j L / \bar{V}_j$ . Затем строится диаграмма поворотливости в виде зависимости  $L/\bar{R}_Ц = f(\beta)$ .

Судно обладает собственной устойчивостью на курсе, если при маневре, начатом перекладкой руля в сторону правого борта, при  $\beta = 0$  угловая скорость судна практически стала равной нулю, а при  $\beta = -1^0$  – поменяла свой знак на обратный. Диаграмма поворотливости такого судна будет иметь вид, показанный на рис. 6.5.

Судно неустойчивое на курсе при  $\beta = 0$  продолжает поворачивать в первоначальном направлении (вправо) с так называемой *угловой скоростью самопроизвольной циркуляции*  $\overline{\omega}_{Ц0}$  и относительной кривизной траектории  $(L/\overline{R}_{Ц0}) = \overline{\omega}_{Ц0}L/\overline{V}_{\beta=0}$ . И только когда кладка руля превысит предельный угол обратной поворотливости  $\beta_{П}$  левого борта, судно скачком изменит знак и величину  $\overline{\omega}$ . В приведенной таблице 6.1 такое явление наблюдается при смене угла руля с  $2^0$  на  $3^0$  левого борта. За  $\beta_{П}$  принимается угол  $2^0$ , после которого угловая скорость меняется по знаку. Для определения участка диаграммы поворотливости в зоне неустойчивости используют маневр «обратная спираль».

## 6.5. Показатели поворотливости судна при ветре

**Критерий управляемости при ветре.** Р.Я.Першицом было доказано, что судно управляемо в условиях ветра, если оно может двигаться прямолинейно при всех его направлениях. Так как вызывающий поворот судна аэродинамический момент компенсируется смещением среднего положения руля на определенный угол ( $\beta_{СР}$ ), то судно *считается управляемым*, если при  $\beta_{СР} < \beta_{ДОП}$  оно способно идти постоянным курсом при самом неблагоприятном направлении ветра (когда  $\beta_{СР}$  максимально). Значение  $\beta_{ДОП}$  выбирается с учетом запаса  $\varepsilon$  для перекладок руля, необходимых для удержания судна на одном курсе ( $\beta_{ДОП} = \beta_{mx} - \varepsilon$ ). Наиболее снижает управляемость судна кажущийся ветер с курсовых углов  $q_k = 120 \div 140^0$ . В этом диапазоне функция  $\beta_{СР} = f(q_k)$  имеет пологий максимум, поэтому самым неблагоприятным курсовым углом кажущегося ветра считают  $130^0$ . Величина запаса  $\varepsilon$  перекладок руля зависит от собственной устойчивости судна на курсе, используемого закона стабилизации курса, волнения моря. По рекомендации Р.Я.Першица этот запас для морских транспортных судов принимается равным  $10 \div 15^0$  на волнении, а без него –  $5^0$  [21]. Для промысловых судов по исследованиям Ю.М.Мастушкина при отсутствии волнения  $\varepsilon \approx 3^0$ , а при наличии –  $\varepsilon \approx 10^0$  [19].

**Поведение судна при ветре.** Как следует из модели (6.3), установившееся движение судна одним курсом в условиях ветра без волнения характеризуется системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} P_{KB} + P_{RB} + P_{aB} &= 0 \\ M_K + M_R + M_a &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (6.31)$$

Здесь не учитывается боковая сила от винта и ее момент, так как они малы по сравнению с приведенными силами и моментами.

При установившемся прямолинейном движении судна угол ветрового дрейфа берется со знаком «+», когда ветер в левый борт, и со знаком «минус», когда ветер в правый борт. Момент позиционной гидродинамической силы на корпусе, возникающий при плавании с углом дрейфа, стремится привести судно носом к ветру. По знаку этот момент противоположен углу ветрового дрейфа (рис. 6.9).

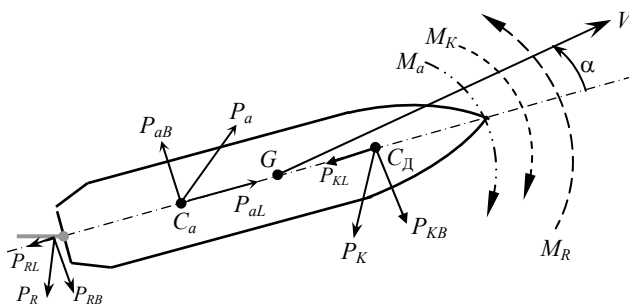


Рис. 6.9. Схема сил на корпусе при ветре

Из системы (6.31) следует, что при движении одним курсом момент от руля должен быть равен сумме моментов  $M_K$ ,  $M_a$ . Рассматривая прямолинейное перемещение различных судов при неблагоприятном направлении кажущегося ветра, можно выделить три ситуации:

1. Моменты  $M_K$  и  $M_a$  имеют один знак ( $M_K M_a \geq 0$ ).
2. Моменты  $M_K$  и  $M_a$  имеют разные знаки, но величина гидродинамического момента больше ( $M_K M_a < 0$ ,  $|M_K| > |M_a|$ ).
3. Моменты  $M_K$  и  $M_a$  имеют разные знаки, но величина  $M_a$  больше ( $M_K M_a < 0$ ,  $|M_K| < |M_a|$ ).

В двух первых ситуациях судно с рулем в ДП будет *приводиться носом к ветру*. Удержание на курсе в этом случае выполняется

определенной перекадкой руля в сторону подветренного борта. Боковая сила руля при этом направлена противоположно  $P_{aB}$ , что приводит к уменьшению дрейфа и позиционной силы на корпусе.

В третьей ситуации при  $\beta = 0$  судно будет *уваливаться под ветер*. Это наблюдается только у судов с сильно развитыми носовыми надстройками. Для обеспечения прямолинейного перемещения такого судна требуется переложить руль на определенный угол наветренного борта. При смещении среднего положения руля в эту сторону боковая сила руля  $P_{RB}$  складывается с силой  $P_{aB}$ . Вследствие этого возрастают дрейф и позиционная сила на корпусе. Система неравенств, определяющая третью ситуацию, представляет собой **показатель увальчивости судна под ветер**

$$M_K M_a < 0, \quad |M_K| < |M_a|.$$

У судов с надстройкой посередине корпуса либо на корме при неблагоприятном направлении кажущегося ветра  $M_K M_a \geq 0$ . В такой ситуации разворачивающий судно носом к ветру момент максимален. В условиях волнения этот момент увеличивается ударами волн в кормовую раковину со стороны наветренного борта. Для удержания судна на курсе в этом случае требуются большие перекадки руля под ветер. Если скорость судна невелика и ветер достаточно силен, то момент от перекадки руля  $\beta_{CP} = \beta_{доп}$

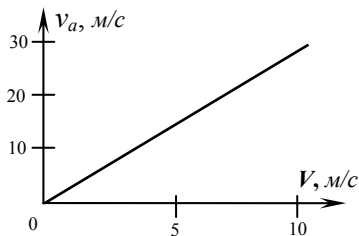


Рис. 6.10. Статическая характеристика  $v_a = f_a(V)$

может оказаться недостаточным для удержания судна на курсе, и оно становится неуправляемым.

Таким образом, определение условия потери судном управляемости при ветре сводится к нахождению скорости неблагоприятного по направлению ветра, при которой для удержания судна на курсе требуется сместить среднее положение руля на угол  $\beta_{CP} = \beta_{доп}$ .

**Пределы управляемости судна при ветре.** Из уравнений (6.31) находится статическая зависимость  $v_a = f_a(V)$  (рис. 6.10), характеризующая скорость  $v_a$  неблагоприятного по направлению



ветра, при которой стабилизация на курсе судна, идущего со скоростью  $V$ , обеспечивается при  $\beta_{CP} = \beta_{доп}$ .

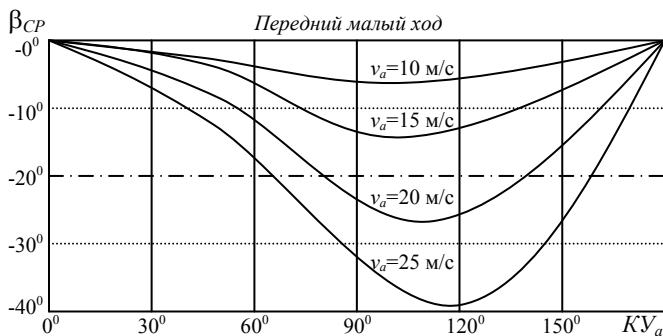


Рис. 6.11. Статические характеристики управляемости при ветре

Более подробно управляемость судна при ветре отражается семейством статических характеристик, представляющих для дискретных режимов ПХ судна зависимость  $\beta_{CP}$  от курсового угла ветра при разных его скоростях, например, 10, 15, 20, 25 м/с. Семейство статических характеристик  $\beta_{CP} = F_{\alpha}(КУ_{\alpha})$  для режима ПМХ одного из судов в полном грузу представлено на рис. 6.11.

## 6.6. Переходные функции судна, управляемого рулем

**Циркуляция и ее периоды.** *Циркуляцией* называется процесс изменения кинематических параметров двигавшегося прямолинейно равномерно судна в ответ на ступенчатую переключку руля, начиная с момента ее задания для отработки. *Траектория*, которую описывает ЦМ судна в этом процессе, также носит название *циркуляции*. Циркуляционное движение по времени принято разделять на три периода: *маневренный*, *эволюционный (переходной)*, *установившийся*. Прежде чем давать определения этих периодов, уточним, что понимается под установившимся криволинейным движением судна.

Как упоминалось, установившийся режим движения судна характеризуется постоянством и балансом сил и моментов на корпусе. При прямолинейном перемещении в таком режиме линейная скорость постоянна. Установившееся вращение относительно ЦМ происходит с неизменной угловой скоростью. При *установившемся криволинейном*

*перемещении* угловая и линейная скорость судна постоянны по величине и направлению относительно осей, жестко связанных с судном, т.е. при таком движении  $\omega$ ,  $\alpha$  и  $V$  постоянны. Подводя итог, можно заключить, что прямолинейное и криволинейное движение судна является **установившимся**, когда скорость хода и направление связанных с судном осей координат по отношению к скоростным осям остается неизменным в пределах обусловленного времени, при этом действующие на судно силы и моменты находятся в равновесии. Движение судна с линейными и/или угловыми ускорениями (замедлениями), когда действующая на судно результирующая всех внешних сил не равна нулю, называется **неустановившимся** или **эволюционным**.

В процессе циркуляции с течением времени  $\omega$ ,  $\alpha$  и  $V$  приходят к установившимся значениям. У крупнотоннажных судов на циркуляции эти параметры могут достигать постоянных значений после поворота на угол, больший  $180^0$ . Кроме того, на установившейся циркуляции у судна могут наблюдаться малые колебания в угле дрейфа и в угловой скорости. Поэтому возникает вопрос, с какого момента времени движение судна на циркуляции считать установившимся. Ориентируясь на принятую в теории управления границу между эволюционным и установившимся перемещением, можно считать, что *циркуляционное движение судна устанавливается*, когда текущие значения  $\omega$ ,  $\alpha$ ,  $V$  начинают отличаться от своих установившихся значений  $\bar{\omega}$ ,  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{V}$  меньше, чем на  $3\div 5\%$ . Обычно за начало установившегося периода циркуляции принимается момент, после которого  $|(\omega - \bar{\omega}) / \bar{\omega}| < 0,05$ . Для среднетоннажных судов при циркуляции с  $\beta = \beta_{mx}$  он наступает после поворота примерно на  $130^0$ .

**Маневренный период** ( $t_{MЦ}$ ) занимает время от момента команды на переключку руля до момента установки его в заданное положение. **Эволюционный период** ( $t_{ЭЦ}$ ) – это интервал времени от момента окончания переключки руля до момента, когда криволинейное движение судна становится установившимся. **Установившийся период** начинается с момента окончания второго периода и продолжается до тех пор, пока руль остается в заданном положении.

Для оценки и сравнения управляемости судов используются *циркуляции* при стандартных условиях. Начало циркуляций соответствует моменту команды на переключку руля, а конец –

моменту поворота ДП судна на угол  $360^{\circ}$ . Схематически траектория такой циркуляции показана на рис 6.12.

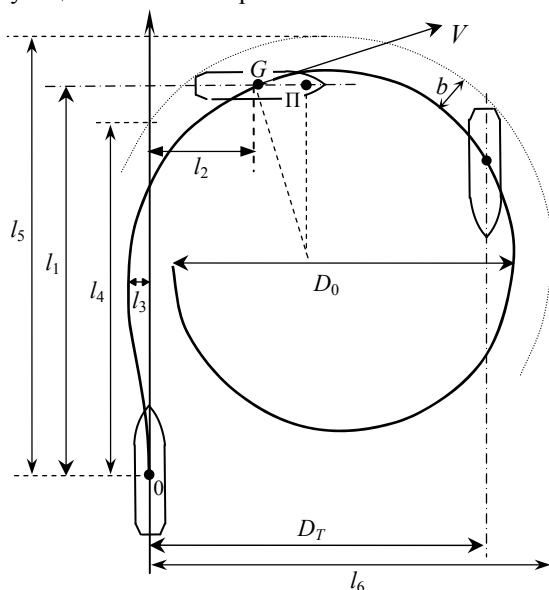


Рис. 6.12. Схема циркуляции судна

**Параметры циркуляции.** При рассмотрении циркуляции выделяют основные и дополнительные ее элементы. **Основными** считаются такие параметры циркуляции.

*Диаметр установившейся циркуляции  $D_0$*  – расстояние между положениями ДП судна на противоположных курсах при установившемся движении на циркуляции, обычно между ДП в момент поворота на  $180^{\circ}$  и ДП в момент поворота на  $360^{\circ}$ .

*Тактический диаметр циркуляции  $D_T$*  – расстояние между линией первоначального курса и ДП судна после поворота его на  $180^{\circ}$ . Тактический диаметр может составлять  $(0,9 \div 1,2) \cdot D_0$ .

*Выдвиг  $l_1$*  – расстояние между положениями ЦМ судна в момент команды на переключку руля и в момент после поворота ДП на  $90^{\circ}$ , измеренное в направлении первоначального курса. Приблизительно  $l_1 \approx (0,6 \div 1,5) \cdot D_0$ .

*Прямое смещение*  $l_2$  – расстояние от линии первоначального курса до ЦМ судна, развернувшегося на  $90^0$ . Оно составляет порядка  $(0,3 \div 0,6) \cdot D_0$ .

*Обратное смещение*  $l_3$  – наибольшее отклонение ЦМ судна от линии первоначального курса в сторону, противоположную перекладке руля. Это смещение мало и составляет  $(0,0 \div 0,1) \cdot D_0$ .

*Угол дрейфа*  $\alpha$  – угол между ДП и вектором скорости судна.

*Период циркуляции*  $T_{Ц}$  – интервал времени от начального момента циркуляции до момента поворота судна на  $360^0$ .

**Из дополнительных параметров циркуляции** наиболее важными являются следующие.

*Полуширина выметаемой полосы*  $b$  – расстояние, на котором находятся наиболее удаленные от траектории ЦМ точки корпуса при совершении циркуляции.

*Дистанция*  $l_4$  – расстояние от положения ЦМ судна в начальный момент циркуляции до точки, в которой корпус судна уходит с линии первоначального курса.

*Максимальный выдвиг оконечности судна*  $l_5$  – наибольшее расстояние вдоль начального курса от положения ЦМ судна в начальный момент циркуляции до крайней точки судна в процессе маневра (аналогично может быть определен *максимальный выдвиг центра массы* судна, называемый просто *максимальным выдвигом*);

*Максимальное прямое смещение оконечности судна*  $l_6$  – наибольшее боковое отклонение от линии начального курса точки судна в процессе циркуляции (аналогично может быть определено *максимальное прямое смещение центра массы* судна, называемое просто *максимальным прямым смещением*).

На ДП судна или ее продолжением находится полюс поворота судна П (рис. 6.12), угол дрейфа в котором равен нулю. Положение П определяется перпендикуляром, опущенным из центра радиуса кривизны циркуляционной траектории на линию ДП судна. Относительно полюса поворота в данный момент происходит вращение корпуса судна. Полюс поворота на установившейся циркуляции располагается вблизи носовой оконечности судна на расстоянии приблизительно 0,4 длины судна от ЦМ.

Диаметр  $D_0$  установившейся циркуляции судна мало зависит от скорости хода перед началом маневра. Это подтверждено

многочисленными натурными испытаниями. Однако выдвиг не обладает этим свойством и зависит от начальной скорости судна. При циркуляции с ПМХ выдвиг порядка на 10÷20% меньше выдвигу с ППХ. Поэтому на ограниченной акватории при отсутствии ветра перед поворотом на большой угол целесообразно сбавить ход.

**Переходные функции управляемого рулем судна** представляют собой математические описания изменений параметров движавшегося прямолинейно равномерно судна в ответ на ступенчатую переключку руля. К этим функциям относятся  $\omega_{\Pi}(t) = f_{\omega}[1(t)\beta]$ ,  $V_{\Pi}(t) = f_V[1(t)\beta]$ ,  $\alpha_{\Pi}(t) = f_{\alpha}[1(t)\beta]$ ,  $K_{\Pi}(t) = f_K[1(t)\beta]$  (рис. 6.13).

Характер изменения угловой скорости, дрейфа, линейной скорости, курса после ступенчатой переключки руля различен. *Дрейф судна* монотонно изменяется с момента начала циркуляции и плавно переходит к установившемуся значению. *Скорость хода* также монотонно приближается к своему установившемуся значению. В отличие от них, в изменении *угловой скорости* монотонность теряется

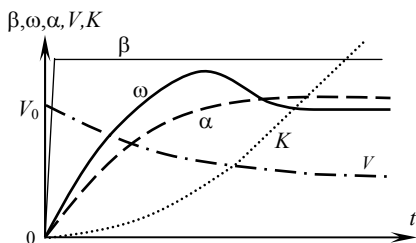


Рис. 6.13. Переходные характеристики судна

в конце переходного процесса. Кривая этой характеристики имеет четко выраженный максимум, и координата  $\omega$  подходит к установившемуся значению не снизу, а сверху. *Переходная функция курса* — монотонно возрастающая кривая, переходящая в конце эволюционного периода в наклонную прямую.

На основе анализа многочисленных испытаний среднетоннажных морских судов Г.И.Зильманом получены средние значения элементов их установившихся циркуляций (табл. 6.2).

Таблица 6.2 – Средние значения параметров установившихся циркуляций

Переключка руля	$L / \bar{R}_{Ц}$	Угол дрейфа в ЦМ	$\bar{V} / V_0$
$\beta = \beta_{\max}$	0,55	$12^{\circ}$	0,60
$\beta = 15^{\circ}$	0,30	$8^{\circ}$	0,80

Следует отметить, что в режиме установившейся циркуляции угол дрейфа и падение скорости хода приблизительно пропорциональны

отношению длины судна к радиусу установившейся циркуляции. У крупнотоннажных судов элементы установившихся циркуляций отличаются от приведенных в табл. 6.2. У этих судов из-за большого коэффициента полноты корпуса и/или конструктивных мер, принятых к улучшению поворотливости, отношение  $L/\bar{R}_{Ц}$ , угол дрейфа и величина падения линейной скорости на циркуляции больше, чем у среднетоннажных судов. Так у танкеров, водоизмещением свыше 100 тыс.т, угол дрейфа на установившейся циркуляции с  $\beta_{mx}$  лежит в интервале  $20 \div 30^\circ$ , а падение скорости хода достигает 60%. Кроме того, увеличение массы судна приводит к росту эволюционного периода циркуляции.

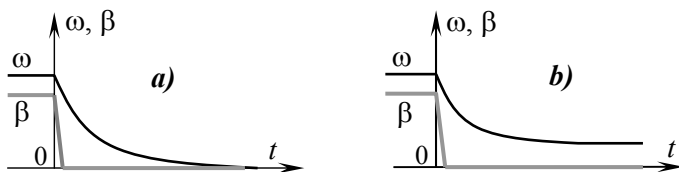


Рис. 6.14. Изменение  $\omega$  при выходе из циркуляции

**Выход из циркуляции** является простым маневром, позволяющим судить о наличии или об отсутствии у судна собственной устойчивости на курсе. Обычно для этой цели используется циркуляция, совершаемая с углом перекладки руля  $\beta_A \approx 20^\circ$ . Выход из нее проводится путем ступенчатого изменения положения руля с  $\beta_A$  на нулевое значение. Переходная функция  $\omega_{П}(t)$  процесса выхода из циркуляции представлена на рис. 6.14 (*a* – для устойчивого на курсе судна, *b* – для неустойчивого).

При проведении натурных испытаний судов этот маневр выполняют для правой и левой циркуляций. Если угловая скорость в конце маневров получается отличной от нуля и разной по знаку при выходе из правой и левой циркуляции, то судно не обладает собственной устойчивостью на курсе. Для определения величины зоны неустойчивости и детального изучения поведения судна в этой зоне применяются маневры “прямая спираль” (спираль Дидонне) и “обратная спираль” (маневр Беха).

## 6.7. Частотная характеристика поворотливости судна

Кроме циркуляций, для оценки поворотливости судов применяются Z-образные маневры, называемые «зигзагами». Они представляют собой попеременные отклонения судна от заданного курса в сторону правого и левого бортов. При выполнении таких маневров кривая изменения курса судна близка к синусоиде.

**Процедура выполнения Z-образных маневров** состоит в следующем. На идущем постоянным (начальным) курсом судне в определенный момент времени руль переключается на угол  $\beta_Z$  определенного борта, допустим левого. Судно начинает поворот влево. Когда его величина достигает определенного значения  $\nabla K_Z$ , руль переключается на угол  $\beta_Z$  правого борта. Судно выводится из уклонения влево и начинается поворот вправо.

Когда отклонение от начального курса вправо становится равным  $\nabla K_Z$ , руль снова переключается на угол  $\beta_Z$  левого борта. Судно выходит из поворота вправо и начинает уклоняться влево. Когда отворот влево от начального курса достигает  $\nabla K_Z$ , руль переключается на угол  $\beta_Z$  правого борта. И так далее.

Уже после второй-третьей переключки руля колебания судна относительно начального курса становятся установившимися. В результате наблюдений параметров зигзага получается характеристика реакции судна на периодически изменяемое входное воздействие в виде переключки руля, т.е. частотная характеристика судна.

Как видно из изложенного, Z-образные маневры определяются углом руля  $\beta_Z$  для отворотов судна и отклонением  $\nabla K_Z$  курса от начального, при достижении которого руль переключается на угол  $\beta_Z$  противоположного борта. Значения этих параметров могут быть различными. Поэтому для конкретизации к названию маневра «зигзаг» добавляются в виде дроби его параметры. Числителем этой дроби служит угол переключки руля  $\beta_Z$ , а знаменателем – угол  $\nabla K_Z$ , например, «зигзаг  $15^\circ/30^\circ$ ».

**Зигзаг Кемпфа.** Среди Z-образных маневров выделяют «зигзаг Кемпфа» (рис. 6.15), у которого  $\beta_Z = \nabla K_Z$ . Этот зигзаг с параметрами « $20^\circ/20^\circ$ » или « $10^\circ/10^\circ$ » обычно применяют для оценки управляемости судна по курсу. На практике наблюдения Z-образных маневров служат

основой для определения быстроты реакции судна на перекладки руля, для оценки способности судна к одерживанию, для получения ГДХ корпуса, для оценки эффективности руля. Применение Z-образных маневров позволяет получить упрощенную амплитудную и фазовую характеристики судна. Значения  $\beta_Z$  и максимального отклонения от начального курса могут рассматриваться как амплитуды входного  $A_\beta$  и выходного  $A_K$  сигналов. В этом случае отношение  $a_z = A_K / A_\beta$  представляет зависимость амплитуд сигналов на входе и выходе ОУ, а интервал времени  $\Delta t_3$  между точками  $t_\beta$  и  $t_K$  характеризует запаздывание выходного сигнала по отношению к входному.

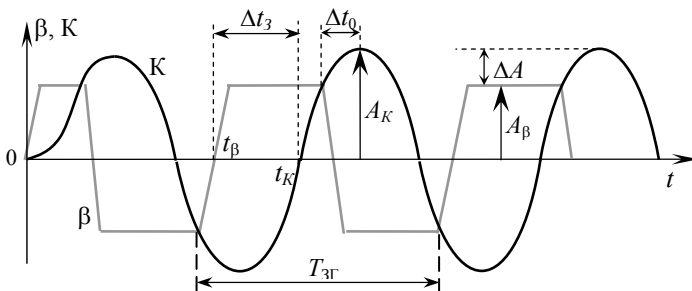


Рис. 6.15. Схема маневра «зигзаг Кемпфа»

Поворотливость судна отражают и другие параметры «зигзага»: период ( $T_{3Г}$ ), угол зарыскивания ( $\Delta A = A_K - A_\beta$ ), время одерживания ( $\Delta t_0$ ), скорость одерживания ( $\omega_{ОД} = \Delta A / \Delta t_0$ ), средняя скорость изменения курса ( $\omega_{ср} = 4A_K / T_{3Г}$ ).

Наиболее часто «зигзаг Кемпфа» используется для оценки способности судна к одерживанию. Она характеризуется параметрами  $a_z$ ,  $\Delta A$ ,  $\Delta t_0$ . Чем лучше судно одерживается, тем легче оно управляется по курсу. Поэтому с элементами маневра зигзаг связаны Стандарты маневренных качеств судов.

Способность судна к аварийному одерживанию определяют по наблюдениям «зигзага  $\beta_{\max} / \beta_{\max}$ ». Сравнение его и «зигзагов  $10^0/10^0$ ,  $20^0/20^0$ » значений  $a_z$  позволяет судить о наличии явления срыва потока на руле при выполнении аварийного одерживания.



Очень малый «зигзаг  $0^0/5^0$ » применяется для оценки степени эксплуатационной устойчивости нестабильного на курсе судна. Используются при исследованиях маневренных качеств судов Z-образные маневры и с другими параметрами.

## 6.8. Статические характеристики судна, управляемого гребным винтом

Скорость судна при установившемся движении одним курсом определяется заданным режимом хода. Если гребной винт фиксированного шага, то задающим скоростью параметром может быть частота  $n$  вращения винта или эффективная мощность  $N_e$  главного двигателя. В ГДУ с ВРШ задающий скорость параметр может быть один (шаговый угол лопастей  $\theta$ ) либо два параметра –  $\theta$  и  $n$ . Поэтому статическая характеристика управляемого винтом судна может быть разных видов.

**Стандартная статическая характеристика** представляет собой зависимость между задающим режимом хода параметром и установившейся скоростью судна на одном курсе в стандартных условиях (на глубокой спокойной воде, при отсутствии ветра, течения, при полной загрузке на ровный киль и свежеокрашенном корпусе). Для судов с ВФШ характеристика  $\bar{V}/V_{mx} = f(n/n_{mx})$  имеет вид, представленный на рис. 6.16. Здесь  $V_{mx}$ ,  $n_{mx}$  – скорость хода и частота вращения гребного винта в режиме максимальной длительной мощности (МДМ) главного двигателя при стандартных условиях движения.

В формуляре маневренных качеств приводятся полученные на испытаниях либо расчетным путем статические зависимости скорости судна в грузу и в балласте от частоты вращения винта и/или используемой мощности ГД. Могут представляться эти зависимости и для стандартных вариантов загрузки. В качестве примера на рис. 6.17, 6.18 приведены для балкера зависимости скорости хода от частоты вращения винта и мощности главного двигателя для двух стандартных

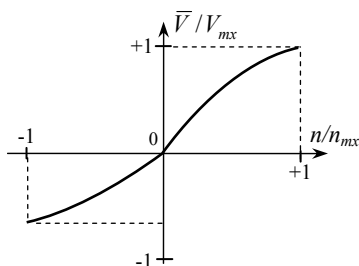


Рис. 6.16. Характеристика  $\bar{V}/V_{mx} = f(n/n_{mx})$

загрузок (Стд.Г-1 и Стд.Г-2) и двух балластных состояний: нормального (Балласт Н) и полного (Балласт П). Эти зависимости рассчитаны на основе проведенных в балластном состоянии прогрессивных скоростных испытаний судна. Полученная при этих испытаниях зависимость (Испытания V) также показана на рисунках. На рис. 6.18 сокращение ЭДМ означает эксплуатационная длительная мощность.

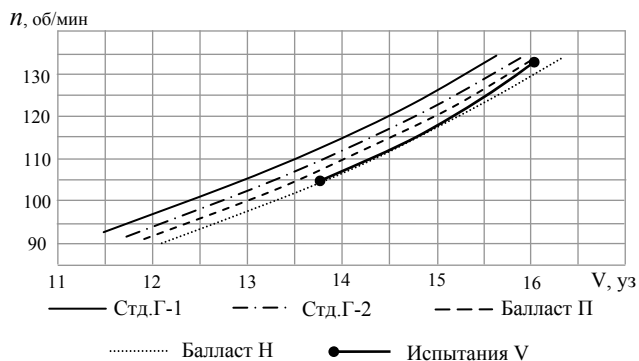


Рис. 6.17. Зависимость между частотой вращения винта и скоростью хода балкера

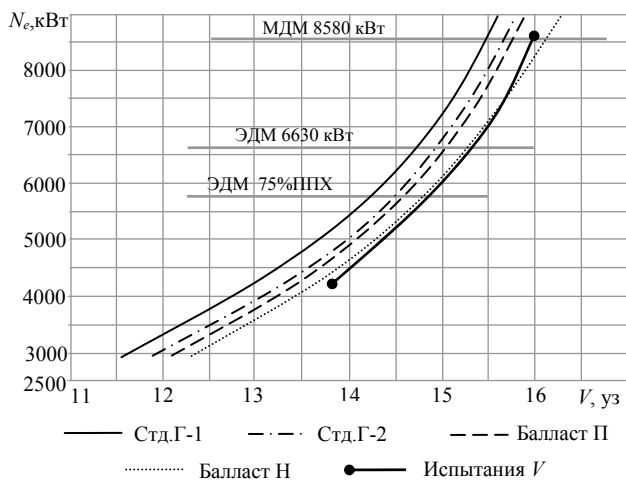


Рис. 6.18. Зависимость между мощностью ГД и скоростью хода балкера

Большое значение в настоящее время уделяется экономии топлива – главной составляющей эксплуатационных расходов судна. Судоводителям все больше приходится вникать в этот вопрос и

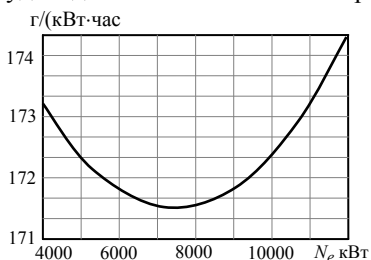


Рис. 6.19. Топливная характеристика ГД

оценивать ожидаемое в тех или иных условиях потребление топлива. Для этой цели обычно используется *статическая топливная характеристика*, приводимая в паспорте главного двигателя. Она представляет собой зависимость удельного расхода топлива от эффективной мощности двигателя  $N_e$  (рис. 6.19). Прогноз по топливной характеристике точен, когда двигатель работает в

установившемся режиме заданной постоянной мощности и не происходит значительных колебаний частоты вращения гребного винта от изменения его погружения на качке. Если же ГДУ управляется по закону поддержания постоянства частоты вращения ВФШ, то двигатель при ходе судна на волнении работает в условиях резко переменной нагрузки. В этом случае из-за высокой инерции системы воздухообеспечения давление наддува не успевает подстраиваться к изменению цикловой подачи топлива, что ведет к некоторому увеличению удельного расхода топлива по сравнению с паспортными данными двигателя.

## 6.9. Переходные характеристики управляемого гребным винтом судна

**Виды переходных характеристик.** Различают несколько видов маневров скоростью судна, которые задаются командой о ступенчатом изменении режима хода: *разгон, увеличение скорости, свободное и активное торможение, снижение скорости*. Процессы изменения элементов поступательного движения судна в ответ на команды о ступенчатом изменении режима хода являются **переходными функциями судна, управляемого с помощью ГДУ**.

Ускорение и замедление движения судна может рассматриваться как преодоление его инерции. Поэтому переходные функции, отражающие реакцию судна на сигнал изменения скорости, получили название **инерционных характеристик судна**. Инерционные характеристики, описывающие процессы торможения судна,

называются *инерционно-тормозными*, а переходные функции, отражающие процессы увеличения скорости хода, получили название *характеристик разгона*.

**Разгон судна** – это процесс изменения элементов поступательного перемещения судна от его неподвижного состояния до начала движения установившейся скоростью, начиная с момента подачи команды с пульта управления судном в ГДУ об установке одного из режимов хода. В исключительных случаях при разгоне положение задающего скорость органа меняется с нулевого на ППХ. Такой разгон называется *экстренным*. Он связан с большими нагрузками на двигатель, его упорный подшипник. На практике обычно разгон до ППХ осуществляется поэтапно.

Условно процесс разгона судна с ВФШ делят на три *периода*:

I – от подачи команды с пульта управления судном в ГДУ до развития двигателем устойчивого момента на валу;

II – от конца первого периода до развития гребным винтом частоты швартовного режима;

III – от конца второго периода до момента установления скорости хода.

**Первый период** является интервалом запуска двигателя пусковым воздухом. Он исчисляется секундами, так что судно остается неподвижным. Обороты винта к концу этого периода достигают значения, после которого начинается разгон двигателя на топливе.

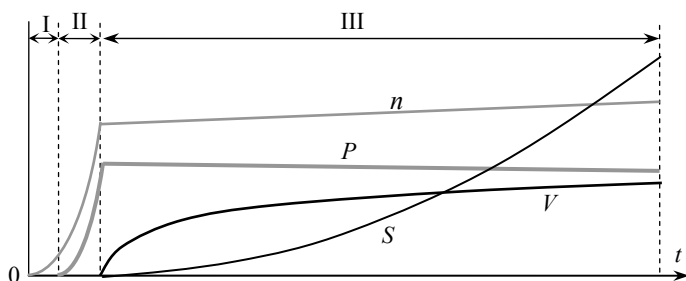


Рис.6.20. Переходные процессы при разгоне

**Второй период** также длится секунды и судно в нем тоже практически неподвижно. За этот период частота вращения гребного вала достигает установившегося значения швартовного режима.

**Третий период** самый продолжительный. Судно постепенно набирает ход. С увеличением скорости постепенно возрастает и

частота вращения гребного винта. К концу периода скорость хода и частота вращения гребного винта достигают номинальных значений. Упор винта в течение этого периода изменяется от швартовного значения до значения сопротивления воды движению корпуса при установившейся в конце периода скорости хода.

Переходные функции  $V_{\Pi}(t)$ ,  $n_{\Pi}(t)$ ,  $P_{\Pi}(t)$ ,  $S_{\Pi}(t)$ , характеризующие изменение скорости судна, частоты вращения и упора винта, проходимого судном расстояния при разгоне, изображены на рис. 6.20.

**Свободное торможение судна** представляет собой процесс изменения кинематических параметров судна от его движения установившимся передним ходом до остановки, начиная с момента подачи команды «стоп двигатель». ГД останавливается путем прекращения подачи топлива (пара) без применения тормозного устройства и без подачи контрвоздуха в цилиндры. Обычно, окончанием процесса свободного торможения считается момент, когда скорость судна становится недостаточной для управления рулем.

В процессе свободного торможения судна с ВФШ выделяют четыре *периода*:

I – от подачи команды «Стоп» до отсечения подачи топлива;

II – от конца первого периода до момента начала работы гребного винта в турбинном режиме;

III – от начала турбинного режима винта до его остановки;

IV – от конца третьего периода до остановки судна.

**Первый период** мал и занимает время от момента подачи команды «Стоп» до прекращения подачи топлива (пара) на двигатель. Скорость судна в течение этого периода равна исходной.

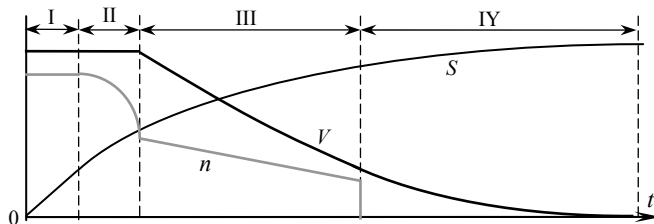


Рис.6.21. Переходные процессы при свободном торможении

**Во втором периоде** обороты гребного винта резко снижаются до частоты вращения в турбинном режиме. Скорость судна остается практически неизменной.

**Третий период** – период вращения гребного винта в турбинном режиме. Скорость судна и частота вращения винта в нем постепенно снижаются. В конце периода винт останавливается.

В течение **четвертого периода**, самого продолжительного, судно движется с застопоренным винтом до момента остановки.

Переходные функции  $V_{\Pi}(t)$ ,  $n_{\Pi}(t)$ ,  $S_{\Pi}(t)$  параметров движения судна при свободном торможении показаны на рис. 6.21.

**Активное торможение** (торможение винтом) представляет собой процесс изменения кинематических параметров судна от его движения установившимся передним ходом до остановки, начиная с момента подачи команды с пульта управления судном в ГДУ об изменении режима работы движителя с переднего на задний ход.

Для дизельных ГДУ различают *обычное* и *ускоренное* активное торможение. При первом ГД останавливается путем прекращения подачи топлива без применения тормозного устройства вала и без подачи контрвоздуха на двигатель. При ускоренном торможении используют тот или иной метод ускорения реверса дизеля.

Среди маневров активного торможения выделяют торможение с ППХ на ЗПХ, который называется маневром «**Crash stop**». При таком маневре после реверса винта руль полностью теряет эффективность, и судно превращается в систему, управляемую только гребным винтом. Маневр «Crash stop» связан с нежелательными большими нагрузками на двигатель, поэтому выполняется в исключительных ситуациях.

Процесс активного торможения судна с ВФШ может быть разделен на следующие *периоды*:

I – от подачи команды до отсечения подачи топлива;

II – от конца первого периода до момента начала работы винта в турбинном режиме;

III – от начала вращения гребного винта в турбинном режиме до момента пуска двигателя на задний ход;

IV – от конца третьего периода до момента развития наибольшей возможной частоты вращения гребного винта;

V – от конца четвертого периода до остановки судна и прекращения в этот момент работы двигателя.

VI период (разгона на ЗХ) появляется, если после остановки судна ГД продолжает работать на ЗХ.

**Первый и второй периоды** активного торможения малы и составляют 5÷8 с. В них прекращается подача топлива (пара) на ГД,

гребной винт снижает обороты и начинает вращаться в турбинном режиме. Скорость судна остается равной исходной.

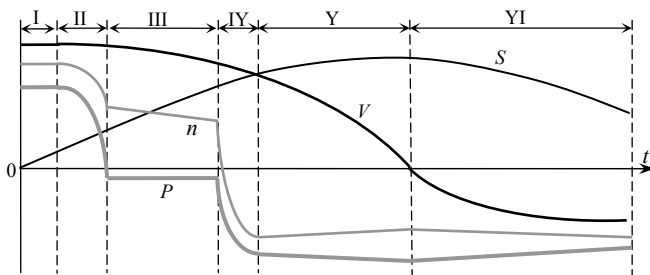


Рис. 6.22. Переходные процессы при активном торможении

В **третьем периоде** гребной винт вращается в турбинном режиме. Скорость судна и частота вращения винта постепенно падают. Этот период заканчивается при снижении частоты вращения гребного винта до пускового значения. У теплоходов с ВФШ при торможении с ППХ третий период отнимает половину всего времени активного торможения. У судов с ВРШ двигатель реверсируется быстрее. Третий период здесь занимает время, необходимое для поворота лопастей с переднего на задний ход. У турбоходов, у которых пуск турбины ЗХ производится сразу после прекращения подачи пара в турбину ПХ, продолжительность третьего периода невелика.

**Четвертый период** охватывает запуск двигателя на ЗХ и развитие им заданной частоты вращения. Этот период занимает порядка 5÷10 с, так что скорость судна на нем может считаться постоянной.

**Пятый период** характеризуется работой двигателя в режиме, близком к швартовному. Частота вращения и упор гребного винта во второй половине этого периода близки к постоянным значениям. Этот период заканчивается, когда скорость судна становится равной нулю. Обычно в этот момент главный двигатель останавливают.

**Шестой период** появляется, если после остановки судна ГД продолжает работать на ЗХ и судно начинает двигаться назад. Этот период начинается с конца пятого периода и заканчивается, когда скорость на заднем ходу устанавливается.

Переходные функции  $V_{\Pi}(t)$ ,  $n_{\Pi}(t)$ ,  $S_{\Pi}(t)$ ,  $P_{\Pi}(t)$  параметров движения судна при активном торможении показаны на рис. 6.22.

## 7. Управляющая курсом судна система

### 7.1. Общие сведения

Благодаря развитию спутниковых навигационных систем, новым и усовершенствованным измерителям параметров движения судна, коммуникационным и компьютерным технологиям, электронным картам (ЭК) и передаваемым в цифровом виде прогнозам погоды стало возможным создать и применить на судах многоцелевые *системы для путепрокладки, оценки ситуаций и вождения* судна. В них ряд задач управления судном решает навигационно-информационная система с ЭК. Она позволяет:

- выбирать оптимальный маршрут перехода и скорость движения на его участках с учетом имеемых рекомендаций, наставлений, прогнозов погоды и другой необходимой информации;
- обеспечивать движение судна по маршруту с учетом налагаемых ограничений по времени;
- оперативно прогнозировать и выбирать маневры для расхождения с судами и препятствиями, оценивать их эффективность, изменять план движения, включая в него выбранные маневры;
- контролировать соответствие действительного движения намеченному плану;
- с модуля ЭК инициировать операции управления судном.

На современном этапе с помощью электронных средств обычно решается задача проводки судна из исходного пункта в конечный в соответствии с намеченным планом [44]. Он определяет маршрут движения и время прихода в его промежуточные и конечную точки. Выполнение плана заключается в поддержании соответствия между кинематическими параметрами судна и функциями времени, задаваемыми планом. В этом процессе управления выделяют *вождение по маршруту и регулирование скорости*.

Первая задача автоматически решается бортовыми **системами вождения по маршруту (СВМ)**, получившими официальное название *Track Control Systems (TCS)*. СВМ управляют *курсом* и *боковым отклонением* от заданной линии пути, сводя последнее к нулевому значению. Для целесообразного изменения или поддержания постоянной только первой координаты используется *управляющая курсом система – Heading Control System (HCS)*. Традиционно она называется *авторулевым (АР)*.

СВМ может иметь два или один контур управления. *Первому варианту* соответствует разделение задачи вождения на управление



курсом, которое выполняет АР с помощью переключков руля, и *коррекцию* задаваемого АР курса в зависимости от положения судна для того, чтобы ЦМ судна не отклонился от линии маршрута. Контур управления с АР является внутренним, а контур коррекции АР по информации о положении судна – внешним. Наличие двух контуров управления придает СВМ определенную гибкость, позволяет ее использовать как в режиме СВМ, так и АР. При выходе из строя внешнего контура или отключении его внутренний контур функционирует самостоятельно. В *одноконтурной СВМ* движение по маршруту обеспечивается с помощью переключков руля, которые вырабатываются в зависимости от отклонения текущего курса от заданного и бокового смещения текущего положения ЦМ судна от намеченной линии пути.

**Регулирование скорости хода** актуально для судов, которые строго должны соблюдать расписание движения. Выполняющие эту задачу автоматические судовые **управляющие скоростью системы** обеспечивают движение судна относительно грунта с намеченной скоростью и минимальным расходом топлива.

**Авторулевые** служат для ручного и автоматического управления

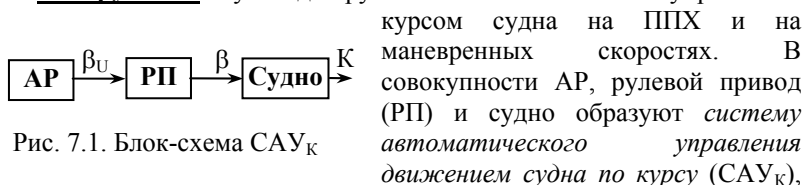


Рис. 7.1. Блок-схема САУ<sub>к</sub>

которая называется также системой «АР-судно». Ее обобщенная схема показана на рис. 7.1. В этой системе АР вырабатывает сигнал  $\beta_U$  для переключков руля, необходимых при решении поставленной задачи. РП усиливает этот сигнал и переключивает руль на величину  $\beta = \beta_U$ . Под действием боковой силы руля судно требуемым образом изменяет курс. Основные задачи АР – стабилизация курса и выполнение поворотов. Для качественного их решения значения  $\beta_U$  часто должны вырабатываться АР практически непрерывно.

Обычно АР формируют сигналы управления по информации о текущем значении курса, скорости его изменения и положении руля. Эти данные АР получает от компаса, указателя скорости поворота, рулевого датчика. Для улучшения качества своей работы и адаптации к изменяющимся условиям современные АР дополнительно используют информацию относительного и/или абсолютного лага,

эхолота, датчиков параметров качки, указателя скорости и направления ветра, приемоиндикатора DGPS и других приборов.

На судах мирового флота эксплуатируются очень много видов АР [4, 20, 36, 38]. В зависимости от элементной базы они подразделяются на *электромеханические, электронные аналоговые, электронные цифровые*. Недостатками традиционных электромеханических АР являются: устаревшая элементная база, низкий уровень защиты от влияния на качество регулирования волнового рыскания, недостаточная чувствительность по угловой скорости в тихую погоду для неустойчивых на курсе крупнотоннажных судов, невысокое качество стабилизации курса из-за низкой эффективности ручной настройки, отсутствие способов автоматического выполнения поворотов на любой угол требуемым образом, трудность включения в контур системы вождения судна по маршруту. Наибольшие возможности для оптимизации управления судном предоставляют электронные цифровые АР. Они обычно включают пульт управления, вмонтированный в этот пульт процессор и дисплей для рулевого. Переход к компьютерной технике в АР расширяет возможности применения для управления курсом эффективных алгоритмов. Из реализованных в цифровых АР алгоритмов регулирования курса можно назвать: традиционный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД), стохастические с низкочастотными и полосовыми фильтрами, различные адаптивные, в том числе базирующиеся на применении генетического алгоритма, нечеткой логики и других средств [44]. В большинстве находящихся в эксплуатации АР пока используется ПИД или ПД закон управления.

## 7.2. Требования к управляющей курсом системе

Стандарты АР определены ИМО и национальными классификационными обществами. Общие требования к АР и другим бортовым электронным навигационным средствам содержатся в Резолюции ИМО А.694(17) «Рекомендации по общим требованиям к судовому радиоборудованию, являющемуся частью GMDSS, и электронным навигационным средствам», 1991. Они касаются оформления пультов этих средств, размеров и количества органов управления, требований к настройке, к освещению, к работоспособности при различных погодных условиях и при изменении параметров электропитания, к шумности, к излучению и т.д. В полной мере эти требования относятся и к авторулевым.

Специальные требования к управляющим курсом системам обычных и скоростных судов установлены соответственно Резолюциями ИМО:

- А.342(IX) «Рекомендации по эксплуатационным стандартам для авторулевых», 1975;
- А.822(19) «Эксплуатационные стандарты для авторулевых скоростных судов», 1995;
- MSC 64(67), Приложение 3 «Поправки к требованиям резолюции А.342(IX)», 1996.

Эксплуатационные требования к АР освещены ниже.

**Функциональность.** Управляющая курсом система совместно с источником информации о курсе, с учетом ограничений, определяемых маневренными возможностями судна, должна обеспечивать удержание судна на установленном курсе при минимальной нагрузке на рулевой привод. Она может работать в составе системы вождения по маршруту, используя задаваемый ей курс или поправку к курсу по отрезку маршрута.

В АР должны быть два вида управления курсом: *автоматическое* и *ручное*.

Главный пост управления АР следует устанавливать в ДП судна. Если предусмотрено нескольких постов управления, то главный должен снабжаться органом для передачи функций на другие посты и возвращения этих функций себе.

Авторулевые должны нормально работать *в диапазоне широт* от  $70^{\circ}\text{N}$  до  $70^{\circ}\text{S}$ , *при скоростях поворота* до  $20^{\circ}/\text{с}$ , *при скоростях хода* от минимальной маневренной до максимальной (для обычных судов максимальная скорость равна 30 узлов, для скоростных – 70). Требуется, чтобы в соединении с необходимыми датчиками информации в диапазоне перечисленных выше условий АР обеспечивал стабилизацию курса с точностью  $\pm 2^{\circ}$ .

АР должен быть способным выполнять изменения курса судна в пределах его поворотливости путем установки *радиуса* либо *угловой скорости* поворота. Требуется, чтобы выход судна на намеченный курс выполнялся без существенного зарыскивания.

В режиме «Автомат» следует иметь возможность выполнения *экстренного поворота* судна на любой угол, вплоть до полной циркуляции. После отмены команды экстренного поворота АР должен обеспечивать возвращение на прежний курс и дальнейшее управление в режиме «Автомат».

АР должен быть способным вручную или автоматически адаптироваться к различным характеристикам управляемости судна на разных скоростях, а также к изменению состояния погоды и загрузки,

и обеспечивать надежную работу в часто встречающихся и нормальных условиях эксплуатации.

В АР необходимо иметь средства, предупреждающие излишние включения рулевого привода при нормальном рыскании на волнении.

В режиме «Автомат» должна быть возможность *ограничения угла перекладки руля*. При этом следует иметь средства, указывающие на установку и достижение заданных ограничений. При управлении курсом в других режимах данное требование также должно выполняться.

Требуется, чтобы адаптивный авторулевой оставался работоспособным при выходе из строя блока адаптации.

АР должен сопрягаться с подходящим курсоуказателем, а также с датчиком скорости судна, когда поворот задается радиусом, или когда параметры управления автоматически адаптируются со скоростью.

**Переключение режимов.** Требуется, чтобы переход с ручного на автоматическое управление и наоборот осуществлялся при любом положении руля посредством одной ручной операции в течение 3 с. Для переключения режимов следует иметь один орган управления, который должен располагаться так, чтобы быть легко доступным для вахтенного помощника. Органы управления АР необходимо располагать близко друг к другу и к устройству отображения параметров управления.

С автоматического режима на ручной АР должен переключаться в любых условиях, включая выход из строя схемы автоматического управления.

При установке режима «Автомат» АР должен выводить судно на заданный курс. Не следует иметь возможности иного изменения заданного курса, чем судовым персоналом. За исключением задатчика курса никакие другие органы управления не должны влиять на курс судна. Требуется обеспечивать индикацию задействованного в данный момент режима управления.

Если АР работает как часть системы вождения по маршруту, то при переключении в режим управления курсом он должен обеспечивать вывод судна на заданный курс. Не следует иметь возможности обратного переключения на режим СВМ без намеренного действия персонала.

**Сигнализация.** Следует иметь аварийную звуковую с регулированием и визуальную сигнализацию, которая должна включаться при выходе системы из строя, или снижения напряжения бортовой сети до уровня, который может сказаться на безопасной

работе АР. Такая же сигнализация должна срабатывать, когда действительное отклонение от курса превысит допустимое.

Требуется обеспечивать индикацию, если входной сигнал от внешних используемых при управлении датчиков информации отсутствует. АР должен рететовать сигнализацию о состоянии качества входных данных от внешних датчиков, если эти данные используются для управления. Предписано иметь индикацию задействованного для управления датчика курса.

Если судно обязано иметь два независимых компаса, то должно быть устройство для контроля поступающей от них информации. Не требуется, чтобы названное контрольное устройство было составной частью АР. Необходимо иметь звуковую и визуальную сигнализацию о расхождении данных этих курсоуказателей на величину, большую установленной.

Средства сигнализации АР следует располагать близко от его органов управления либо устройства отображения.

**Органы управления.** На пульте АР необходимо иметь простой и надежно действующий орган для ручного управления рулем. Им может быть штурвал, ручка или кнопки.

Необходимы органы для ручной настройки АР к изменению условий эксплуатации.

Задание курса следования для режима «Автомат» может быть аналоговым или цифровым. Орган аналоговой установки должен поворачиваться вправо/влево при назначении изменения курса вправо/влево. Для обычных поворотов судна в АР необходимо иметь только один орган задания нового курса. На установленный курс следования активация любых других органов АР не должна влиять.

**Интерфейс.** Цифровое сопряжение АР с датчиками информации должно удовлетворять протоколу ИЕС 61162, 1994 г., установленному Международной электротехнической комиссией.

**Инструкция.** Управляющую курсом систему следует снабжать квалифицированным описанием ее погрешностей, являющихся следствием высокой скорости, ускорений, изменений курса, состояния моря и ошибок подключенных к АР датчиков информации.

### 7.3. Режимы управления курсом

Авторулевые позволяют управлять курсом в ручном и в автоматическом режимах. **Ручных режимов** чаще всего два: «*простой*» и «*следящий*». Может быть и только один «*следящий*» режим. В режиме «***Простой***» для переключки руля обычно

используются находящиеся на пульте АР две клавиши «Право» и «Лево», непосредственно управляющие сервоприводом рулевой машины. При нажатии клавиши руль начинает поворачиваться в сторону, соответствующую названию клавиши. При отпускании клавиши кладка руля прекращается. В *следающем* режиме с помощью штурвала и специального индикатора на пульте АР задается значение угла руля. АР при этом вырабатывает соответствующий сигнал. Он подается на рулевой привод, который отработывает заданное значение. Штурвал при отпускании возвращается в нулевое положение, и руль приходит в ДП судна.

**Автоматический режим у обычных АР** один. Он называется «Автомат» (по-английски «Auto» либо «Auto-fixed»). В нем, если не производится ручная настройка, коэффициенты закона регулирования остаются постоянными.

У *адаптивных АР* может быть несколько автоматических режимов управления курсом: один без адаптации «Auto-fixed» и два или три адаптивных, отличающихся критерием оптимальности. Это может быть критерий безопасности, направленный на обеспечение максимальной точности регулирования, и экономический – предусматривающий минимальный расход ресурсов. Первый из этих режимов часто называют «Стесненные воды» (Confined waters), второй – «Открытое море» (Open sea). У некоторых АР имеется третий режим для подстройки управления к условиям шторма – «Штормовые условия» (Rough sea). В режиме «Auto-fixed» АР регулирует курс, используя алгоритм с неизменной структурой и коэффициентами, некоторые из которых можно подстроить вручную. В режимах адаптации при изменении внешних и внутренних условий работы АР самостоятельно изменяет характер управления для обеспечения наилучшего качества работы по выбранному критерию.

У *самообучающихся АР* дополнительно имеется адаптивный режим управления с обучением.

Современные АР имеют **режим тренажа**, в котором демонстрируется работа органов управления АР, режимы и правила эксплуатации, а также предоставляется возможность тренировки управления судном в имитируемых условиях плавания.

## 7.4. Функции авторулевых

Современные авторулевые выполняют как операции управления курсом, так и функции вождения по маршруту. Материал этого

параграфа касается только регулирования курса. Управление траекторией судна рассматриваются в главе 8.

**Состав функций.** Основными задачами АР являются **стабилизация курса** и его **изменение** требуемым образом. В АР могут быть функции выполнения поворотов: *с заданной угловой скоростью, с заданным радиусом, с заданным углом руля, комбинированными способами.* Установка параметра функций поворотов может быть плавной либо дискретной. В зависимости от времени начала выполнения могут быть **два режима изменения курса**: «Принять  $K_3$ » (Accept HTS) – с началом в момент установки нового курса и «Предварительно установить  $K_3$ » (Preset HTS) – с началом по дополнительной команде после установки нового курса.

Для экстренного уклонения курсом от препятствия применяется функция *срочный отворот (Dodge)* с клавишами «Лево» и «Право». В некоторых АР в режиме «Автомат» предусмотрена возможность отворота с выходом на новый курс и с возвращением к прежнему курсу (рис. 7.2).

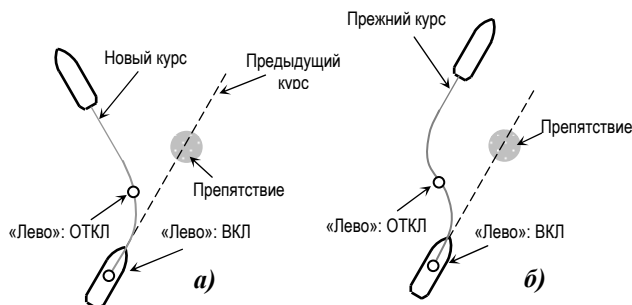


Рис. 7.2. Два вида срочного уклонения: а) с выходом на новый курс; б) с возвращением на прежний курс

Реализуются в АР и функции других маневров, например, «человек за бортом» (Over board). Современные АР для рыболовных судов выполняют маневры, используемые при ловле рыбы: *орбитальное движение, «клеверный лист»* и другие [20].

В АР частично или в полном объеме реализуются **функции обеспечения целостности**: самотестирование, обнаружение неисправностей, сигнализация, диагностика работы и неполадок, восстановления целостности.

АР предупреждают **о превышении заданного предела отклонения от курса**. В ряде случаев такая сигнализация

активируется только тогда, когда отклонение остается недопустимым в течение заданного промежутка времени (обычно можно установить от 0 до 300 с).

Авторулевые сигнализируют о *случаях прекращения электропитания* схемы АР и рулевого привода. При использовании информации двух компасов предупреждают, *когда разность показаний курса превышает допустимую*. Если от внешних датчиков перестает поступать информация, то АР выдает соответствующие сообщения, например, «*Gyrocompass failure*», «*Log failure*» и другие. Некоторые АР при выходе из строя гирокомпаса *автоматически обеспечивают подключение резервного курсоуказателя*. Отдельные управляющие курсом системы контролируют рулевую машину и сигнализируют о неполадках в ее работе. Ряд АР предупреждают судоводителя, *когда скорость хода оказывается ниже заданного предела* (недостаточно для уверенного управления судном рулем) и *когда судно выходит на мелководье* (измеряемая эхолотом глубина становится меньше заданной). Некоторые АР имеют так называемый «*watch alarm*» для периодических предупреждений вахтенного помощника о необходимости проконтролировать курс, когда АР работает в режиме «Автомат».

Адаптивные АР выполняют **функции настройки** на оптимальный по выбранному критерию режим работы. Авторулевые могут иметь и **дополнительные функции**, такие, как *коррекция погрешностей флюксгейт компаса*, когда он используется как датчик курса, *регистрации маневров курсом* и другие.

**Пульт управления.** На судах используются АР с разным оформлением пультов управления. Для примера рассмотрим пульт современного адаптивного АР (рис. 7.3) с панелью управления, дисплеем для рулевого и многофункциональным штурвалом (на рисунке не показан).

На панели управления расположены три секции: *режимов управления, элементов поворота, ручных установок*. Переключатели режимов и функций управления состоят из зависимых кнопок с подсветкой, подтверждающих их активацию.

**На секции режимов управления** можно задать режим управления курсом и режим вождения по маршруту. Режимов управления курсом четыре:

- Ручной (Stand by);
- Автоматический без адаптации (Auto fixed);
- Адаптивный для открытого моря (Open sea);
- Адаптивный для стесненных вод (Confined waters).



Вождение по маршруту может выполняться в *ручном* (MAN) и *автоматическом* (NAV) режимах. При установке ручного режима управления курсом «Stand by» и автоматического режима вождения по маршруту «NAV» на экране дисплея отображаются боковое отклонение (XTE) от линии маршрута и дистанция до точки поворота (Dist. to WP) при управлении судном рулевым.

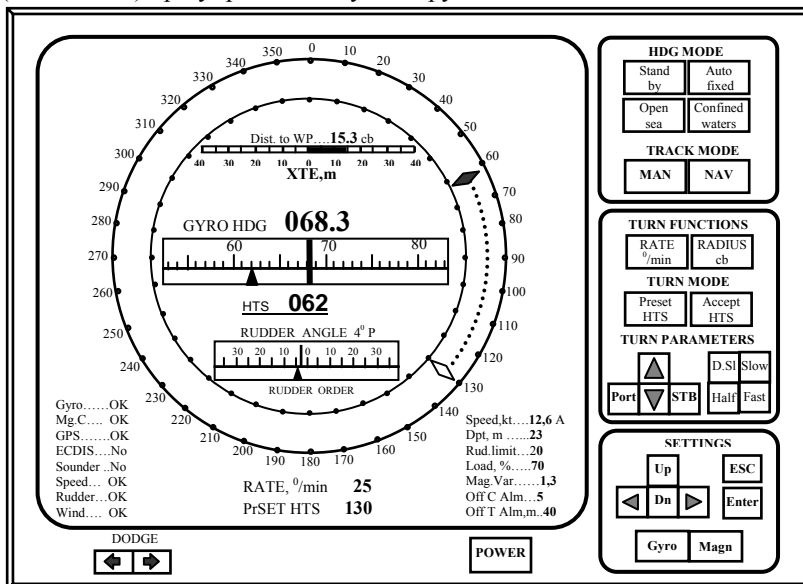


Рис. 7.3. Схема пульта адаптивного AP

На секции элементов поворота расположены органы для задания функции, режима и параметров поворотов. В авторулевом реализованы две функции выполнения поворотов: с заданной угловой скоростью ( $RATE, ^\circ/min$ ) и с заданным радиусом ( $RADIUS, cb$ ). Режимов выполнения поворотов тоже два:

- С предварительной установкой нового курса (Preset HTS) и началом поворота в момент нажатия клавиши второго режима;
- С началом в момент установки задаваемого курса (Accept HTS).

Для изменения курса задается параметр функции поворота (угловая скорость или радиус), новый курс следования. Параметр функции поворота может устанавливаться с малым шагом путем нажатия кнопок с вертикальными стрелками. Основные значения этого параметра быстро назначаются кнопками «Dead slow», «Slow», «Half»,

«Fast». В цифровом виде задаваемое значение параметра функции поворота отображается внизу экрана.

**Новый курс следования** в автоматических режимах АР задается штурвалом либо кнопками «Port», «STB». Этот курс отображается в цифровом виде и графически на азимутальной шкале.

В режиме начала поворота «Асцепт HTS» цифровое значение нового курса отображается внутри азимутальной шкалы (HTS). Для графического указания этого курса на шкале используется сплошной по цвету «индекс HTS». В режиме поворота «Preset HTS» предварительно назначаемое значение нового курса следования отображается в цифровом виде под азимутальной шкалой. Графически этот курс отмечается на шкале «индексом PrHTS», представляемым контуром. Курс, которым должно еще идти судно, в этом случае указывается графически на шкале сплошным индексом и отображается в цифровом виде внутри шкалы (HTS). Угол намечаемого поворота графически показывается дугой между индексами HTS и PrHTS.

При нажатии в момент начала поворота клавиши «Асцепт HTS» на экране рулевого цифровое значение HTS становится равным значению Preset HTS, «индекс HTS» перемещается на место «индекса PrHTS». Запись цифрового значения предварительно заданного курса и показывающий его на шкале индекс исчезают.

**Примечание:** в ручном режиме АР («Stand by») кнопками «Port», «STB» устанавливается значение курса (HTS), который должен удерживать рулевой.

**На секции ручных установок** располагаются органы для задания величин, используемых при работе АР. Вручную вводятся: *скорость* (Speed, kt), *глубина* (Dpt, m), *ограничение максимальной перекладки руля* (Rud.limit), *степень загрузки* (Load, %), *магнитное склонение* (Mag.Var), *допустимое отклонение от курса* (Off Course Alarm – Off C Alm) и *от траектории* (Off Track Alarm – Off T Alm). Перечень этих величин отображается справа внизу дисплея рулевого. Выбор вводимого значения параметра производится кнопками «Up», «Dn». Значение устанавливается с помощью кнопок с горизонтальными стрелками. Если значение параметра поступает от датчика автоматически, то на экране оно отмечается буквой А.

На этой же секции расположен переключатель датчиков курса, по информации которых может производиться управление. Название подключенного курсоуказателя отображается около действительного курса HDG на экране дисплея.

**Экстренное изменение курса** в автоматических режимах выполняется с помощью кнопок «лево» и «право» функции «Dodge».

**На дисплее рулевого** отображаются:

- Действительный курс (HDG),
- Заданный курс (HTS),
- Действительная перекладка руля (Rudder angle),
- Задаваемая перекладка руля (Rudder order),
- Значение параметра функции поворота (Rate или Radius),
- Предварительно заданный курс следования (Preset HTS),
- Расстояние до точки поворота (Dist.to WP) и боковое отклонение от линии маршрута (XTE) в режиме «NAV»,
- Значения параметров, используемых при работе AP (список внизу справа),
- Состояние подключенных к AP датчиков информации (список внизу слева).

К авторулевому могут подключаться: *гирокомпас (Gyro), флюксгейт компас (Mg.C), приемник GPS/DGPS (GPS), навигационно-информационная система (ECDIS), эхолот (Sounder), лаг (Speed), датчик руля (Rudder), датчик направления и скорости ветра (Wind).*

## 7.5. Формальная постановка задачи управления курсом и схемы ее решения

**Постановка задачи.** При рассмотрении задачи управления курсом скорость  $V$  судна считается неизменной ( $V = V_C$ ). Согласно требованиям к планированию переходов маршрут судна должен содержать прямолинейные отрезки пути и участки поворотов с одного отрезка на другой, представленные дугами окружности определенного радиуса  $R_3$ , который необходимо выбирать с учетом возможностей судна изменять курс.

Задача управления курсом относится к регулированию, состоящему в изменении управляемой величины в соответствии с задающей функцией. Касаясь определения этой функции для рассматриваемой задачи, отметим следующее. Прямолинейные отрезки маршрута характеризуются постоянством курса. Т.е. в этом случае задающая курс судна функция имеет вид  $K_3(t) = K_C$ , где  $K_C$  – постоянное значение.

На повороте, чтобы его радиус был  $R_3$ , скорость поворота должна быть постоянной:  $\omega_C = V_C / R_3$ . Т.е. задающие угловую скорость и курс функции здесь следующие:

$$\omega_3(t) = \omega_C, \quad K_3(t) = K_0 + \omega_3(t) \cdot t, \quad (7.1)$$

где  $K_0$  – курс перед поворотом.

В (7.1) задающая функция  $\omega_3(t)$  не учитывает, что судно в момент начала поворота не может сразу изменить угловую скорость от нуля до  $\omega_3$ , а в его конце – от  $\omega_3$  до нуля, что будет одной из причин ошибки управления курсом. При необходимости можно выбрать  $\omega_3(t)$ , учитывающую угловое ускорение судна в начале поворота и замедление в его конце:

$$\omega_3(t) = f_{\omega}(t), \quad K_3(t) = K_0 + \int \omega_3(t) \cdot dt, \quad (7.2)$$

и поставить задачу управления курсом как обеспечение соответствия текущих значений скорости поворота и курса их задающим функциям:

$$\omega = \omega_3(t), \quad K = K_3(t). \quad (7.3)$$

Таким образом, управление курсом состоит в регулировании *курса* и *скорости поворота* судна. Соответственно ошибка этого управления включает ошибку курса ( $\psi$ ) и угловой скорости ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \omega_3(t) - \omega(t), \quad \psi = K_3(t) - K(t). \quad (7.4)$$

Цель управления курсом состоит в сведении этих ошибок к нулю.

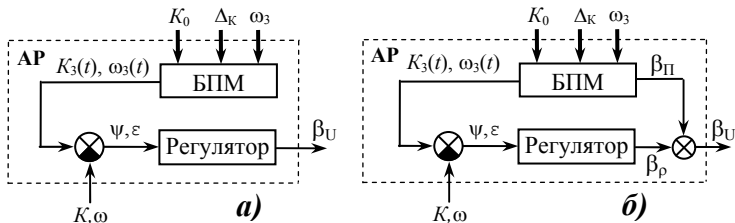


Рис. 7.4. Блок-схемы АР

**Блок-схемы АР.** Современные АР обычно включают блок программ маневров (БПМ) и регулятор, вырабатывающий сигнал перекладки руля в зависимости от ошибки управления (принцип управления по отклонению). БПМ хранит *параметры задающих функций*, в соответствии с которыми при маневре должны изменяться управляемые величины, *программы для генерации значений этих функций* в процессе поворота, а также *программы для выработки сигналов прямого управления рулем* при маневре.

На рис. 7.4,а представлен АР, блок программ маневров которого генерирует значения  $K_3(t)$ ,  $\omega_3(t) = \dot{K}_3(t)$ , в соответствии с которыми должны меняться курс и угловая скорость судна при повороте. Регулятор в зависимости от  $\psi$  и  $\varepsilon$  вырабатывает сигнал:

$\beta_U = f(\psi, \varepsilon)$ , обеспечивающий поворот в соответствии с задающими функциями.

В некоторых АР для поворотов и других маневров курсом используется комбинированное управление  $\beta_U = \beta_{\Pi} + \beta_p$ , включающее прямое управление (сигнал  $\beta_{\Pi}$ , полученный расчетным методом для изменения курса, как требуется при маневре) и сигнал управления по отклонению  $\beta_p = f(\psi, \varepsilon)$  для компенсации погрешностей прямого управления, вызванных действием возмущений. Блок-схема такого АР, в котором предусмотрено автоматическое выполнение поворотов с  $\omega_3$ , показана на рис. 7.4,б, где  $\Delta_K$  – угол поворота;  $K_0$  – курс до поворота.

Адаптивные АР, кроме БПМ и регулятора (блока управления по отклонению), содержат устройство «для приспособления» регулятора к изменению внешних и внутренних факторов САУ<sub>К</sub> с целью обеспечения при всех условиях наилучшего качества управления.

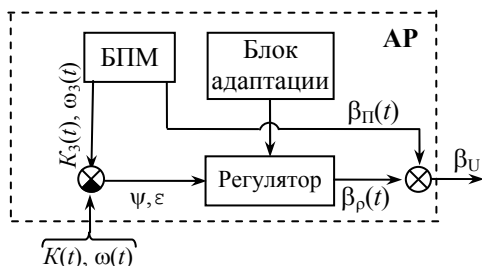


Рис.7.5. Блок-схема адаптивного АР

Таким образом, в общем случае АР можно рассматривать как совокупность **трех элементов**: *блока программ маневров, регулятора, блока адаптации* (рис. 7.5). Современная компьютерная техника позволила использовать для повышения эффективности АР различные методы современной теории управления, развивающейся по разным направлениям. Этим объясняется многочисленность предложенных в последние годы алгоритмов управления курсом судна. Одни АР реализуют традиционный ПИД-закон, в других – регулятор синтезируется по нелинейной модели судна, в третьих – он основывается на нечеткой логике и т.д. **Для адаптации регулятора** также разработаны различные методы, в том числе основанные на нечеткой логике, на применении генетического алгоритма, на использовании искусственных нейронных сетей. Освещение даже

принципов всех предложенных алгоритмов управления курсом судна займет много места. Поэтому ниже характеризуются в основном широко распространенные алгоритмы АР.

## 7.6. Стабилизация курса

### 7.6.1. Принцип решения задачи стабилизации курса

Основная задача АР в режиме «Автомат» – стабилизация курса судна. Задающие функции (7.2) в этой задаче имеют вид

$$\omega_3(t) = 0, \quad K_3(t) = K_C. \quad (7.5)$$

Стабилизация курса заключается в поддержании текущих значений угловой скорости и курса равными этим значениям путем компенсации рулем отклонений от них, вызванных случайными воздействиями. САУ<sub>К</sub> при решении этой задачи должна:

- измерять и поддерживать с требуемой точностью заданное значение курса на маневренных скоростях;
- производить минимально возможное количество включений РМ;
- обеспечивать минимальное отклонение руля по амплитуде;
- работать устойчиво без автоколебаний.

При стабилизации курса используется *принцип управления по отклонению*, который состоит в формировании величины перекладки руля для удержания судна на курсе в зависимости от ошибок управления  $\varepsilon$  и  $\psi$ .

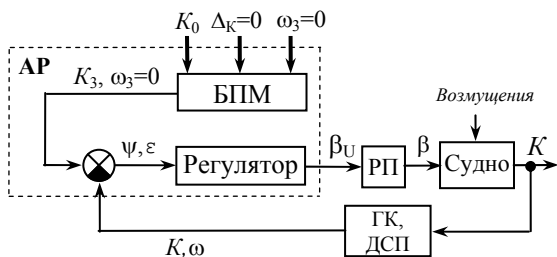


Рис. 7.6. САУ<sub>К</sub> при стабилизации курса

**Блок-схема САУ<sub>К</sub>** с АР в режиме стабилизации курса приведена на рис. 7.6. На ней  $K_3$ ,  $K$  – заданный и текущий курс;  $\omega_3$  и  $\omega$  – заданная и текущая скорость поворота. Так как  $\omega_3 = 0$ , то  $\varepsilon = -\omega$ . Отклонение от заданного курса и скорость поворота судна при стабилизации курса называют также *углом* и *скоростью рыскания*.

Измерителем курса в системе является гирокомпас (ГК). Резервным датчиком курса для средних и больших судов (и основным для АР малых судов) может быть магнитный компас с дистанционной передачей показаний и флюксгейт компас (Fluxgate compass), на показания которого не влияют ускорения на качке и при маневрах. Датчиком скорости поворота (ДСП) обычно служит электронное или электромеханическое дифференцирующее курс устройство либо гиротахометр. Точность измерения угла и скорости рыскания должна быть достаточно высокой. Особое значение точность измерения скорости рыскания имеет для неустойчивых на курсе судов, где от нее существенно зависит погрешность стабилизации курса. Поэтому на крупнотоннажных малоустойчивых и неустойчивых на курсе судах для измерения скорости рыскания применяют высокочувствительные гиротахометры. В САУ<sub>к</sub> может применяться также комбинированный датчик курса и скорости поворота, например, волоконно-оптический компас.

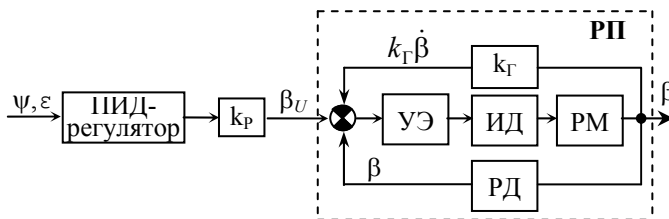


Рис.7.7. ПИД-регулятор с РП

**Блок-схема регулятора с РП** представлена на рис. 7.7. В большинстве находящихся в эксплуатации АР для стабилизации курса применяется ПИД-регулятор, формирующий сигнал перекладки руля  $\beta_U$  по пропорционально-интегрально-дифференциальному закону

$$\beta_U = k_p(k_\lambda \psi + k_d \dot{\epsilon} + k_i \int \psi \cdot dt); \quad (7.6)$$

где  $k_\lambda$ ,  $k_d$ ,  $k_i$  – соответственно коэффициенты пропорционального, дифференциального и интегрального управления;  $k_p$  – масштабный коэффициент, называемый «Руль». Отметим, что  $\epsilon = \dot{\psi}$ .

В АР коэффициенты  $k_\lambda$ ,  $k_i$  при эксплуатации неизменны. Первый коэффициент установлен равным единице, а второй выбирается при заводских испытаниях из диапазона 0,01÷0,04 и в дальнейшем не изменяется. Коэффициент «Руль» (Rudder) служит для настройки АР и выбирается в диапазоне 0,5÷5,0. Для настройки АР

используется и изменение коэффициента  $k_d$ . Эта настройка называется «Контрруль» (Counter rudder).

В РП в общем случае входят усилительные элементы (УЭ), исполнительный двигатель (ИД), рулевая машина (РМ), рулевой датчик (РД). В качестве усилительных элементов используют полупроводниковые, магнитные, электромашинные и релейные усилители. УЭ, ИД и РМ охвачены жесткой  $\beta$  и гибкой  $k_T \dot{\beta}$  обратной связью и образуют *следающую систему управления рулем*. Жесткая обратная связь превращает РП в следающую систему. Гибкая обратная связь препятствует возникновению колебаний в РП при отработке перекладки руля.

### 7.6.2. Назначение составляющих ПИД алгоритма

На вход ПИД-регулятора (см. рис. 7.7) поступают значения  $\psi$  и  $\varepsilon$ . В зависимости от них регулятор формирует сигнал  $\beta_U$  (7.6), определяющий перекладку руля. Он поступает в РП, усиливается и подается на серводвигатель, управляющий насосами рулевой машины. РМ поворачивает руль. Сигнал о действительной перекладке руля  $\beta$  с рулевого датчика подается на компенсацию  $\beta_U$ . Когда  $\beta$  сравнивается с  $\beta_U$ , перекладка руля прекращается. Таким образом, получается, что

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = k_1\psi + k_2\varepsilon + k_3 \int \psi \cdot dt. \quad (7.7)$$

Здесь  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – составляющие кладки руля;  $k_1 = k_A k_P$ ,  $k_2 = k_D k_P$ ,  $k_3 = k_I k_P$  – коэффициенты.

Охарактеризуем назначение компонентов алгоритма (7.7), используемого для стабилизации курса судна.

**Пропорциональная** углу рыскания составляющая  $\beta_1 = k_1\psi$  в ПИД-алгоритме является основной. При отклонении судна от курса она вызывает кладку руля, возвращающую судно на курс. Значение  $k_1$  зависит от коэффициента «Rudder». Увеличение  $k_1$  уменьшает время возвращения судна к курсу при отклонениях от него, но увеличивает колебательность системы «АР-судно».

**Дифференциальная** составляющая  $\beta_2 = k_2\dot{\psi} = k_2\varepsilon$  служит для сведения к нулю погрешности угловой скорости  $\varepsilon$ . Результатом воздействия  $\beta_2$  является демпфирование собственных колебаний



системы «АР-судно». Для нестабильных на курсе судов сигнал  $\beta_2$  обеспечивает структурную устойчивость САУ<sub>К</sub> и требуемое качество переходного процесса. Для устойчивых на курсе судов он выполняет только вторую функцию.

В системе, в которой при стабилизации курса используется только сигнал  $\beta_1$  (П-регулятор), возникают колебания судна относительно курса, обусловленные инертностью судна. Причина этих колебаний состоит в следующем. Выработываемая в ответ на отклонение от курса перекладка руля  $\beta_1 = k_1\psi$  начинает возвращать судно к курсу. Когда судно приходит на заданный курс ( $\psi = 0$ ), перо руля будет в ДП. Но при движении к курсу судно приобрело инерцию и перейдет линию курса. Это и является причиной собственных колебаний системы «АР-судно». Их период для судов водоизмещением 10÷30 тыс.т. обычно лежит в диапазоне 60÷130с. Эти колебания легко различить на курсограмме, полученной при плавании в тихую погоду и на волнении,

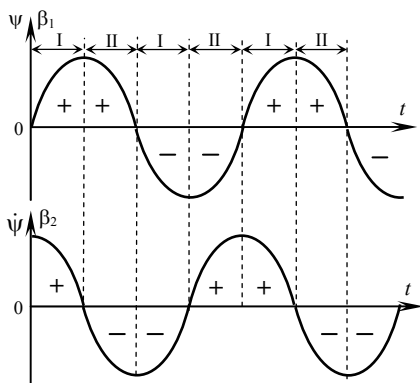


Рис. 7.8. Пояснение действия сигнала  $\beta_2$

так как их период на порядок больше периода рыскания от волн. Чем меньше устойчивость судна на курсе, тем выше колебательность системы «П-регулятор – судно». Система с П-регулятором и неустойчивым на курсе судном нестабильна, и совершает незатухающие колебания с довольно большой амплитудой относительно заданного курса.

Свойство демпфирования собственных колебаний с помощью сигнала  $\beta_2$

поясняется схемой на рис.7.8. Для простоты предполагается, что угол рыскания при колебаниях относительно заданного курса изменяется по синусоидальному закону (производная от угла рыскания – косинусоида). Выделяя в процессе рыскания участки: I – судно уходит от курса и II – судно приходит к курсу, можно установить.

**На участках I** (угол рыскания увеличивается) сигнал  $\beta_2$  одного знака с  $\beta_1$ . Следовательно, руль будет переложен на больший угол, чем  $\beta_1$ , и эффективнее препятствовать росту  $\psi$ .

**На участках II** знак  $\beta_2$  противоположен  $\beta_1$ . В результате, при подходе к курсу руль переключается на некоторый угол другого борта и выполняет одерживание судна.

Отсюда видно, что *дифференцирующее звено выполняет функцию демпфирования собственных колебаний системы «АР-судно»*. Параметр  $k_2$  зависит от  $k_D$  и установки  $k_P$ . Как правило, при одних и тех же условиях для достижения качественной стабилизации неустойчивого на курсе судна требуется большее значения коэффициента  $k_2$ , чем для устойчивого судна.

**Интегральная** составляющая  $\beta_3 = k_3 \int \psi \cdot dt$  служит для устранения статической погрешности, вызываемой медленно меняющейся компонентой  $\overline{M}_B$  момента внешних сил  $M_B$ , стремящейся развернуть судно в какую-то одну сторону. Этот момент обусловлен действием ветра, асимметрией обводов корпуса, упора винта, медленно меняющейся составляющей действия волн и т.д. При П-регуляторе, когда судно лежит на курсе, руль находится в ДП, и момент  $\overline{M}_B$  рулем не компенсируется. Поэтому судно будет уходить от заданного курса в направлении действия  $\overline{M}_B$ , пока момент  $M_R$  от переключки руля  $\beta_1 = k_1 \psi$  не станет равным  $\overline{M}_B$ . Величина  $\psi_{уст}$  отклонения от курса в положении равновесия  $M_R = \overline{M}_B$  представляет собой *статическую погрешность системы* (рис.7.9,а). Система стабилизации курса, имеющая такую погрешность, называется *статической*.

Сигнал  $\beta_3 = k_3 \int \psi \cdot dt$  служит для смещения (при нахождении судна на курсе) среднего положения руля из ДП на величину  $\beta_{CP} = \beta_3$ , при которой компенсируется постоянная составляющая  $\overline{M}_B$  момента внешних сил (рис.7.9,б). Величина параметра  $k_3$  должна быть такой, чтобы САУ<sub>К</sub> была устойчивой на курсе, и на  $\beta_3$  не влияло рыскание от волн. При стабилизации курса величина  $k_3$  зависит от  $k_P$  и  $k_I$  и может находиться в диапазоне  $[0, 0.1]$  с. Система стабилизации

курса с нулевой статической погрешностью называется **астатической**.

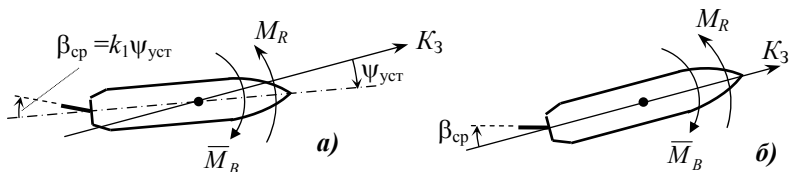


Рис. 7.9. Равновесное состояние статической (а) и астатической (б) систем

### 7.6.3. Анализ эффективности алгоритма управления

Проанализируем свойства системы стабилизации курса, используя уравнение движения судна с АР. В упрощенном виде оно может быть получено из уравнения (6.21)

$$\tau_1 \dot{\omega} \pm \omega = k_S \beta \quad (7.8)$$

при подстановке вместо  $\beta$  закона управления рулем. Напомним, что в (7.8)  $\tau_1$  – постоянная времени судна,  $k_S$  – коэффициент передачи. Устойчивым на курсе судам в уравнении (7.8) соответствует знак «+» перед  $\omega$ , а неустойчивым – знак «-».

**При пропорциональном законе управления** (П-регулятор)  $\beta = k_1 \psi$ . Подставляя это выражение в (7.4), получаем уравнение системы «АР–судно»:

$$\tau_1 \ddot{\psi} \pm \dot{\psi} = -k_S k_1 \psi + M'_B ; \quad (7.9)$$

где  $\omega = \dot{\psi}$ ;  $M'_B$  – приведенный возмущающий момент. Для рассмотрения собственных свойств САУ<sub>К</sub> запишем уравнение ее свободного движения в стандартном виде [4]:

$$\ddot{\psi} \pm 2\gamma\omega_0 \dot{\psi} + \omega_0^2 \psi = 0, \quad (7.10)$$

где  $\gamma = \frac{0.5}{\sqrt{\tau_1 k_S k_1}}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_S k_1}{\tau_1}}$  – соответственно фактор затухания и частота незатухающих колебаний системы при  $\gamma = 0$ .

Система стабилизации курса с П-регулятором будет устойчива только тогда, когда коэффициенты уравнения (7.10) положительны. Отсюда вытекает, что эта система с неустойчивым на курсе судном неработоспособная. Поэтому примем, что судно устойчиво на курсе:

$$\ddot{\psi} + 2\gamma \cdot \omega_0 \dot{\psi} + \omega_0^2 \psi = 0. \quad (7.11)$$

На практике фактор затухания выбирается в диапазоне  $0 < \gamma < \omega_0$ . Учитывая это, получим решение уравнения (7.8) при начальных условиях  $\psi(0) = \psi_H$ ,  $\dot{\psi}(0) = 0$ :

$$\psi = A_0 \exp(-\gamma \cdot \omega_0 t) \cos(\omega_B t + \psi_0), \quad (7.12)$$

где  $\omega_B = \omega_0 \sqrt{1 - \gamma^2}$ ,  $A_0 = \psi_H / \sqrt{1 - \gamma^2}$ ,  $\psi_0 = \arcsin \gamma$ .

Анализируя (7.12) при различных  $\gamma$ , можно установить:

**Когда**  $0 < \gamma < 1$ , то судно после отклонения от направления движения и прекращения действия возмущений приходит к заданному курсу, совершая около него затухающие колебания с частотой  $\omega_B$ .

**При**  $\gamma = 0$  система находится на границе устойчивости. После прекращения действия возмущений судно совершает незатухающие колебания относительно заданного курса.

**При**  $\gamma < 0$  система является неработоспособной. После прекращения действия возмущения в ней возникают расходящиеся колебания.

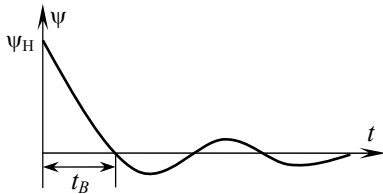


Рис. 7.10. Переходной процесс системы стабилизации курса

**При**  $\gamma \geq 1$ , если какой-то фактор вызвал отклонение от курса, то после прекращения его действия система медленно приходит к заданному курсу по экспоненциальному закону. Из-за малого быстродействия такой характер переходного процесса является нежелательным.

Выражение (7.12) представляет переходную функцию системы при  $0 < \gamma < 1$  (рис. 7.10). По ней можно судить о ряде свойств системы «АР-судно». *Быстродействие* системы определяется временем  $t_B$ , необходимым для прихода судна к курсу после отклонения от него. Если в системе при приходе к курсу после отклонения от него возникают колебания, то они должны быстро затухать. Работа системы стабилизации курса считается удовлетворительной, когда после прекращения действия возмущения судно возвращается к заданному курсу достаточно быстро и с малым числом перерегулировок (переходов через заданный курс). Приемлемым считается наличие только двух-трех перерегулировок.

При использовании П-регулятора довольно сложно обеспечить выполнение требований быстродействия и малой колебательности, так

как они противоречивы. Повышение скорости прихода к курсу достигается увеличением коэффициента  $k_1$ , а снижение колебаний – уменьшением его.

Для исследования влияния на систему стабилизации курса с П-регулятором возмущений, используем уравнение системы (7.9) для устойчивого на курсе судна:

$$\tau_1 \ddot{\psi} + \dot{\psi} + k_S k_1 \psi = M'_B.$$

Отсюда следует, что в установившемся режиме работы ( $\ddot{\psi} = 0$ ,  $\dot{\psi} = 0$ ,  $M'_B = \bar{M}'_B$ ,  $\psi = \psi_{ycm}$ ) будет погрешность в курсе

$$\psi_{ycm} = \bar{M}'_B / (k_S k_1), \quad (7.13)$$

где  $\bar{M}'_B$  – постоянная компонента приведенного момента внешних сил.

На основе проведенного анализа можно установить:

- Система стабилизации курса с П-регулятором и неустойчивым на курсе судном неработоспособна.
- Для устойчивых на курсе судов П-регулятор является неэффективным. Из-за невыполнения им одерживания судно совершает колебания относительно заданного курса. Кроме того, при действии на судно односторонних факторов система имеет статическую погрешность, которая пропорциональна постоянной составляющей момента внешних сил.

По названным причинам П-регулятор считается неудовлетворительным для стабилизации курса морских судов.

**При пропорционально-дифференциальном законе управления** (ПД-регулятор) уравнение свободного движения САУ<sub>К</sub> имеет вид [4]

$$\ddot{\psi} \pm 2\gamma\omega_0 \dot{\psi} + \omega_0^2 \psi = 0, \quad (7.14)$$

$$\text{где } \omega_0 = \sqrt{\frac{k_S k_1}{\tau_1}}, \quad \gamma = \frac{0.5(k_S k_2 \pm 1)}{\sqrt{\tau_1 k_S k_1}}.$$

Таким образом, когда судно неустойчиво на курсе, система с ПД-регулятором является работоспособной, если  $k_S k_2 - 1 > 0$ , т.е.  $k_2 > 1/k_S$ . Необходимость для неустойчивого судна постоянно иметь дифференциальную составляющую при стабилизации курса вызывает определенные *затруднения в уменьшении реакции РП на волновое рыскание*. Если на устойчивых на курсе судах  $k_2$  может быть уменьшен до нуля для предотвращения частых и больших по амплитуде переключений руля, то на неустойчивых на курсе судах это не

может быть использовано, так как система станет структурно неустойчивой.

Сравнивая П-регулятор и ПД-регулятор для устойчивых на курсе судов, можно заметить, что в последнем имеется больше возможностей (подбирая  $k_D$ ) удовлетворить требования к качеству управления. Здесь коэффициент  $\gamma$  больше в  $(k_S k_1 + 1)$  раз, чем в П-регуляторе. Это приводит к более быстрому затуханию колебаний при приходе к заданному курсу.

Анализ уравнения (7.14) при внешнем воздействии показывает, что статическая погрешность при ПД-законе управления, определяется тем же выражением (7.13), что и в П-регуляторе.

Авторулевые с ПД-законом управления нашли практическое применение и выпускаются промышленностью.

**При ПИД-алгоритме** уравнение системы стабилизации курса принимает вид:

$$\tau_1 \ddot{\psi} \pm \dot{\psi} = -k_S (k_1 \psi + k_2 \dot{\psi} + k_3 \int \psi \cdot dt) + M'_B.$$

Дифференцируя это уравнение, получаем

$$\tau_1 \ddot{\psi} + (k_S k_2 \pm 1) \dot{\psi} + k_S k_1 \dot{\psi} + k_S k_3 \psi = \frac{dM'_B}{dt}. \quad (7.15)$$

В установившемся режиме  $\frac{dM'_B}{dt} = \frac{d\bar{M}'_B}{dt} = 0$ ,  $\ddot{\psi} = 0$ ,  $\dot{\psi} = 0$ ,  $\psi_{уст} = 0$ , отсюда следует, что  $\psi_{уст} = 0$ .

Анализ уравнения (7.15) показывает:

1. Система с ПИД-регулятором устойчива, когда все ее коэффициенты положительны и  $(k_S k_2 \pm 1) k_S k_1 > \tau_1 k_S k_3$ ,

2. Статическая погрешность при ПИД-законе равна нулю  $\psi_{уст} = 0$ , т.е. система стабилизации курса является *астатической*.

## 7.7. Выполнение поворотов

В отличие от плавания по заданной криволинейной траектории при выполнении поворотов накладываются требования не на линию пути, а только на один или несколько характеризующих ее параметров. Траектория здесь является производным элементом от функции поворота. Наиболее часто требуется выполнять повороты без существенного падения скорости хода либо с определенным радиусом (исходя из приближенного представления о линии пути на повороте

как о дуге окружности). Выполнение этих требований при ручном управлении сводится к заданию для поворота определенной перекладки руля (в первом случае малой, а во втором – соответствующей заданному радиусу). Изредка повороты необходимо выполнять с максимальным быстродействием. В настоящее время предписано, чтобы АР изменяли курс с заданным значением угловой скорости ( $\omega_3$ ) или с заданным радиусом ( $R_3$ ). АР также должны позволять в режиме «Автомат» экстренно менять направление движения судна. При обычных поворотах на новый курс судно должно приходиться без существенного зарыскивания.

Для изменения курса на требуемый угол  $\Delta_K$  с заданной угловой скоростью и с заданным радиусом предложено довольно много алгоритмов. Из них ниже рассматривается алгоритм, использующий метод слежения за генерируемыми для поворота значениями курса, отвечающими задающей функции  $K_3(t)$ ; и алгоритм, основанный на получении по математической модели САУ<sub>К</sub> сигнала  $\beta_{П}(t)$  прямого управления, определяющего поворот судна. При рассмотрении этих алгоритмов опускаются детали, связанные с учетом влияния изменения скорости хода, волнового рыскания и других факторов на качество выполнения поворота.

**Поворот слежением за  $K_3(t)$ .** Принцип выполнения поворотов методом слежения за задающим воздействием в упрощенном виде поясняется рис. 7.11.

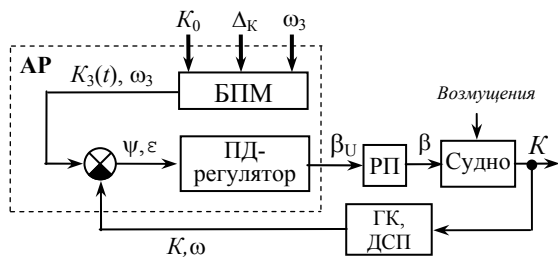


Рис. 7.11. САУ<sub>К</sub> при поворотах слежением за  $K_3(t)$  и  $\omega_3$

Для поворота с  $\omega_3$  на угол  $\Delta_K$  обычно используется линейная задающая функция:

$$K_3(t) = K_0 + \omega_3 t, \quad (7.16)$$

где  $K_0$  – начальный курс.

С момента начала поворота БПМ генерирует по формуле (7.16) значения, поступающие на сравнение с текущим курсом. Слежение за  $K_3(t)$  обеспечивает ПД-регулятор, формируя кладки руля по закону

$$\beta = k_1\psi + k_2\varepsilon. \quad (7.17)$$

Изменение  $K_3(t)$  и  $K(t)$  при повороте характеризуют графики, показанные на рис. 7.12,а.

Судно не может мгновенно изменить угловую скорость в начале поворота от нуля до  $\omega_3$  и в конце поворота от  $\omega_3$  до нуля. Наличие этих скачков у задающей функции  $K_3(t)$  приводит в начале поворота к чрезмерной перекладке руля, а в конце его – к существенному зарыскиванию. Особенно это проявляется у судов с повышенным отношением  $A_R$  произведения  $(L \cdot T)$  к площади руля, где  $T$  – осадка в полном грузу. К таким судам, например, относятся крупнотоннажные танкера. Чтобы улучшить качество поворота, задающую функцию для поворота с  $\omega_3$  формируют с учетом ускорения в начале поворота и замедления в его конце (рис. 7.12,б).

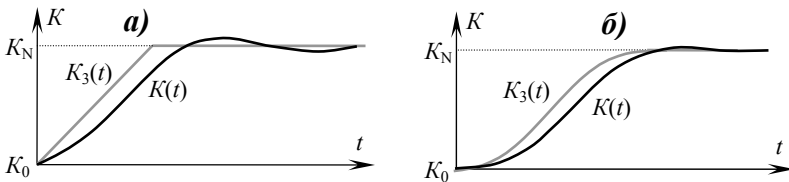


Рис. 7.12. Графики функций  $K_3(t)$  и  $K(t)$

Реальные АР, осуществляющие повороты методом слежения, содержат элементы, обеспечивающие удовлетворительность изменения курса в условиях волнения. Судоводителям при выполнении поворотов с заданной угловой скоростью необходимо учитывать, что при разных скоростях хода  $V$  значению  $\omega_3$  соответствует неодинаковая кривизна траектории поворота судна.

**Поворот с  $R_3$**  обычно сводится к повороту с  $\omega_3$  путем определения  $\omega_3$  по скорости судна и  $R_3$ :  $\omega_3 = V/R_3$ . Чтобы выполнять повороты с  $R_3$ , АР должен быть сопряжен с лагом.

**Схема комбинированного управления движением судна на повороте, основанная на применении эталонной модели САУ<sub>к</sub>**. В ряде АР для изменений курса используется комбинированное



управление  $\beta_U = \beta_{\Pi} + \beta_p$ , включающее прямое управление (сигнал  $\beta_{\Pi}$ , полученный расчетным методом для изменения курса требуемым образом) и сигнал управления по отклонению  $\beta_p = f(\psi, \varepsilon)$  для компенсации погрешностей прямого управления, вызванных действием возмущений. САУ<sub>К</sub> при реализации этого способа можно представить блок-схемой, показанной на рис. 7.13. Сигнал прямого управления  $\beta_{\Pi}$  и приближенная реакция на него судна  $K_3(t)$ ,  $\omega_3(t)$  генерируются блоком программ маневров с момента начала поворота. Для получения  $\beta_{\Pi}$ ,  $K_3(t)$ ,  $\omega_3(t)$  по математической модели САУ<sub>К</sub> имитируется изменение курса путем слежения за задающими функциями  $\omega_{3M} = \omega_C$ ,  $K_{3M}(t) = K_0 + \omega_{3M} t$ , где  $\omega_C$  – заданное для поворота значение угловой скорости.

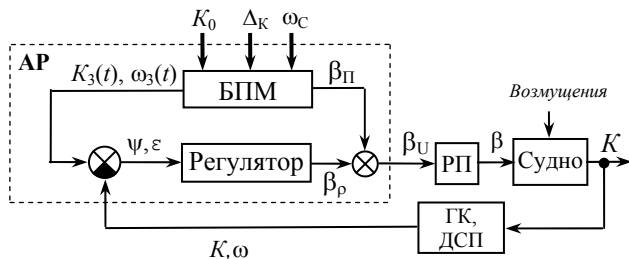


Рис. 7.13. САУ<sub>К</sub> с АР, формирующим для поворотов  $K_3(t)$ ,  $\omega_3(t)$  и сигнал прямого управления по эталонной модели

Математическую модель САУ<sub>К</sub> называют *эталонной*. Она включает модели АР, рулевого привода и судна. **Модель судна** должна отражать без больших погрешностей его реакцию на перекаладки руля. Это, например, может быть полная модель движения судна в горизонтальной плоскости, подобная (6.6)-(6.11), либо другая эффективная для рассматриваемой задачи модель, позволяющая представлять его движение по курсу в реальном и ускоренном времени. Эта модель может учитывать изменение динамики судна на малых глубинах и при разной загрузке, а также влияние ветра и течения, или быть неизменной и отражать движение судна без учета возмущений. Естественно, в последнем случае погрешности моделирования будут больше.

Алгоритм **модели ПД-регулятора** должен быть близким к такому алгоритму в АР и изменять курс модели судна с удовлетворительным качеством. К **модели РП** предъявляется требование отражения с

требуемой точностью запаздывания в обработке управляющего сигнала АР.

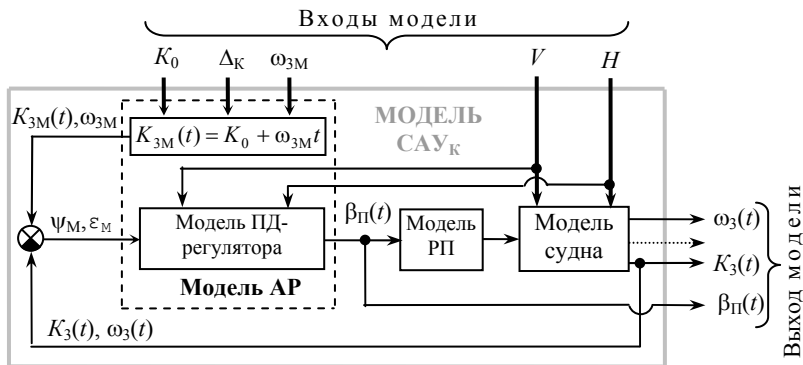


Рис. 7.14. Блок-схема БПМ

Схематично блок программ маневров для рассматриваемого случая представлен на рис. 7.14. После задания параметров поворота ( $\Delta_K, \omega_{3M}$ ), начиная с момента подачи команды на его выполнение, в БПМ в реальном времени моделируется изменение курса до момента, когда курс модели первый раз достигнет значения

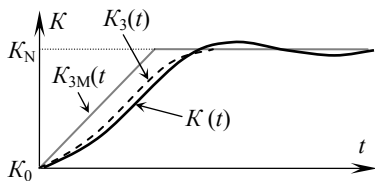


Рис. 7.15. Графики  $K_{3M}(t)$ ,  $K_3(t)$ ,  $K(t)$

$K_N = K_0 + \Delta_K$ . Вырабатываемый БПМ сигнал прямого управления  $\beta_{PI}(t)$  (см. рис. 7.13) поступает на РП, который осуществляет перекладку руля для поворота судна. Если бы поведение САУ<sub>К</sub> было точно таким, как ее модели, то в процессе поворота в любой момент времени соблюдались бы равенства  $\psi = 0, \varepsilon = 0$ .

Однако из-за неполноты учета моделью САУ<sub>К</sub> влияющих на движение факторов, реакция судна на  $\beta_{PI}(t)$  отличается от получаемой при моделировании. Чтобы минимизировать ошибку управления, ПД-регулятор в соответствии с формулой (7.17) вырабатывает сигнал  $\beta_P$ . Характер изменения  $K_{3M}(t)$ ,  $K_3(t)$ ,  $K(t)$  в процессе поворота показан на рис. 7.15. Схема выполнения поворотов (рис. 7.13) меньше подвержена влиянию волнового

рыскания на качество выполнения поворота, чем схема на рис. 7.11. Влияние волнового рыскания на переключки руля здесь ослабляется при выработке корректирующего сигнала  $\beta_P$ . Для этой цели могут применяться различного вида фильтры, в том числе и основанные на процедурах нечеткой логики. Определяющий поворот сигнал  $\beta_{\Pi}(t)$  от волнового рыскания не зависит.

**Дополнительные функции БПМ.** При моделировании поворота, кроме  $\beta_{\Pi}$ ,  $K_3(t)$ ,  $\omega_3(t)$ , рассчитываются и другие элементы движения судна. Это позволяет по модели САУ<sub>К</sub> получать траекторию ЦМ судна при повороте и ее параметры (с учетом ветра, течения и мелководья, если это предусмотрено в модели). Такая возможность используется для оценки расстояния до путевой точки, на котором надо начать поворот, чтобы точно выйти на линию нового курса, и для определения значений задающей траекторию функции, в соответствии с которой должен перемещаться ЦМ судна в процессе поворота.

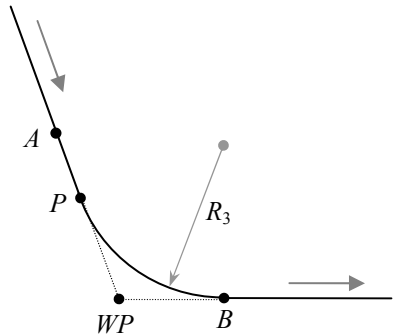


Рис. 7.16. План поворота на новый отрезок пути

Точка начала поворота  $A$  (WOP – wheel-over point) не является точкой  $P$  (рис. 7.16), где на плане перехода прямолинейный отрезок пути переходит в дугу  $PB$  окружности, представляющую траекторию судна при повороте на новый отрезок пути. Точка  $A$  лежит на большем расстоянии от путевой точки (WP), чем  $P$ , так как изменить мгновенно

угловую скорость судна на значение  $\omega_3$ , соответствующее заданному радиусу поворота, невозможно. Дистанция между точками  $A$  и  $P$  равна в среднем длине судна и зависит от многих факторов, в том числе и от заданных угла  $\Delta_K$  и радиуса  $R_3$  поворота.

**Для получения расстояния до WP**, на котором следует начать поворот на заданный угол  $\Delta_K$ , может использоваться прямоугольная система координат (обозначим ее  $rAs$ ), направление оси  $As$  которой совпадает с курсом судна до поворота, а начало (точка  $A$ ) – с местом ЦМ судна в момент начала поворота (рис. 7.17). В этой системе в ускоренном времени моделируется поворот судна. Современные

персональные компьютеры позволяют по модели, подобной (6.6)-(6.11), выполнять эту задачу с ускорением в 1000 раз, т.е. находить все элементы поворота в течение секунды. В процессе моделирования получаются элементы движения судна и координаты траектории с момента начала поворота до момента, когда угол поворота станет равным заданному значению  $\Delta_K$  (точка  $B$  траектории). По координатам  $r_B, s_B$  точки  $B$  и значению  $\Delta_K$  вычисляется расстояние  $s_\Delta$  от точки  $A$  до  $WP$ , на котором надо начать поворот, и расстояние  $b_\Delta$  от  $WP$  до точки  $B$  выхода на новый курс:

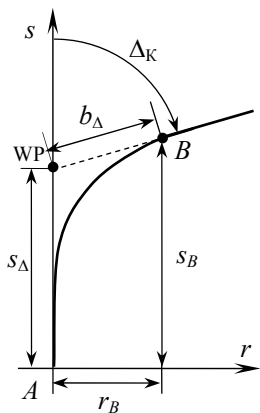


Рис. 7.17. Траектория и параметры поворота

$$s_\Delta = s_B - r_B \operatorname{ctg} \Delta_K, \quad b_\Delta = r_B \sec \Delta_K. \quad (7.18)$$

*Для организации управления с целью удержания ЦМ судна на задаваемой модели траектории* ее точки вместе со значениями  $\beta_\Pi(t), K_3(t), \omega_3(t)$  получаются в процессе поворота в реальном времени. В зависимости от бокового отклонения действительного места судна от получаемой по модели траектории находится управляющий сигнал для компенсации этого отклонения.

## 7.8. Фильтрация волнового рыскания

**Необходимость фильтрации волнового рыскания.** При плавании в условиях волнения на отклонение судна от курса накладывается волновое рыскание, которое является следствием перемещения корпуса вместе с орбитальным движением водной массы в волнах (рис. 7.18). Поэтому полученные на основе измерений курса и угловой скорости значения  $\psi$  и  $\varepsilon$  содержат две компоненты: уход самого судна от курса ( $\psi_H, \varepsilon_H$ ) и движение с волной ( $\psi_B, \varepsilon_B$ ):

$$\psi = \psi_H + \psi_B, \quad \varepsilon = \varepsilon_H + \varepsilon_B.$$

Первая компонента по частоте ниже второй. Когда в зависимости от  $\psi$  и  $\varepsilon$  регулятор (допустим ПД) вырабатывает перекладки руля, то в них будут аналогичные компоненты:

$$\beta = k_1\psi + k_2\varepsilon = (k_1\psi_H + k_2\varepsilon_H) + (k_1\psi_B + k_2\varepsilon_B) = \beta_H + \beta_B.$$

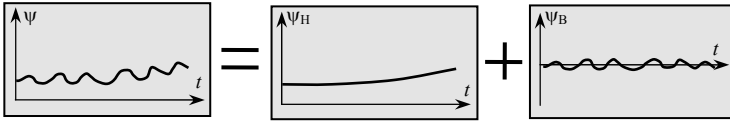


Рис. 7.18. Представление угла рыскания  $\psi$  суммой низкочастотной  $\psi_H$  и волновой  $\psi_B$  компонент

Так как частота и скорость волнового рыскания довольно высоки, то частота и амплитуда переключков руля в условиях волнения резко возрастают. Судно, обладающее большой инерционностью, не успевает на них реагировать. Поэтому контрдействие руля  $\beta_B$  в ответ на волновое рыскание не приносит пользы. Наоборот, интенсивная работа руля сопровождается возрастанием расхода энергии и износа РП. Следствием частых и увеличенных переключков руля является также повышение сопротивления воды движению судна, что приводит к росту расхода топлива главным двигателем. Из вышеизложенного можно заключить: *разрешение судну свободно рыскать на волнении сопровождается меньшими энергетическими потерями, чем контрдействие руля волновому рысканию*. Поэтому требуется, чтобы регулятор на волновое рыскание не реагировал и вырабатывал сигнал для переключки руля только в зависимости от  $\psi_H, \varepsilon_H$ :

$$\beta_U = k_1\psi_H + k_2\varepsilon_H.$$

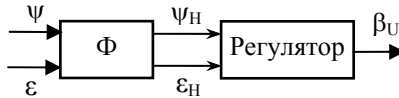


Рис. 7.19. Добавление фильтра в АР

Для исключения  $\psi_B, \varepsilon_B$  из  $\psi$  и  $\varepsilon$  в АР используется устройство (или программа), называемое фильтром, который в АР обычно помещается перед регулятором (рис. 7.19). Ввиду того, что с изменением погоды, а также курса и скорости судна, частота и амплитуда волнового рыскания изменяются, для обеспечения качественной фильтрации фильтр необходимо подстраивать к изменяющимся условиям.

Прежде чем рассматривать применяемые в АР фильтры, в популярной форме поясним задачу, выполняемую фильтром.

**Интерпретация задачи фильтрации.** Фильтр из входного сигнала  $X = Y + E$ , содержащего полезный сигнал  $Y$  и помеху  $E$ , должен выделить полезный сигнал  $Y$ , уменьшив интенсивность помехи. Он может быть представлен как устройство, преобразующее входной сигнал  $X$  в выходной  $Y$  (рис. 7.20,а, где  $\Phi$  – оператор фильтра). Задачу фильтрации сигнала в зависимости от частоты можно интерпретировать следующим образом. Известно, что с помощью преобразования Фурье сигнал на входе и выходе фильтра можно записать в виде суммы гармоник, находящихся в частотном диапазоне, охватывающем области частот  $Y$  и  $E$ :

$$X(f) = \sum_{j=1}^n A_X(f_j) \sin[f_j t + \phi_X(f_j)],$$

$$Y(f) = \sum_{j=1}^n A_Y(f_j) \sin[f_j t + \phi_Y(f_j)],$$

где  $f_j = j \cdot \Delta_f$  – частота  $j$ -той гармоники;  $\Delta_f$  – малый интервал частоты;  $A_X(f_j)$ ,  $A_Y(f_j)$  и  $\phi_X(f_j)$ ,  $\phi_Y(f_j)$  – амплитуды и начальные фазы  $j$ -той гармоники сигналов  $X$ ,  $Y$ .

Отображение сигналов  $X$ ,  $Y$  в частотную область позволяет представить фильтр схемой рис. 7.20,б, где  $\Phi(f)$  – оператор, связывающий  $Y(f)$  с  $X(f)$ :

$$Y(f) = \Phi(f) \cdot X(f).$$

Задача фильтрации состоит в нахождении такого оператора  $\Phi(f)$ , при котором отношение

$$\Lambda(f_j) = A_Y(f_j) / A_X(f_j), \text{ где } j = 1, 2, \dots, n,$$

в области частот полезного сигнала равняется единице (фильтр без искажения пропускает гармоники полезного сигнала), а в области частот помехи значительно меньше единицы (фильтр уменьшает амплитуды гармоник, входящих в помеху). Функцию  $\Lambda(f)$  называют амплитудно-частотной характеристикой фильтра (АЧХ), один из ее видов приведен на рис. 7.20,в. Если области частот полезного сигнала и помехи не пересекаются, то выбором соответствующей АЧХ помеху можно устранить полностью без искажения полезного сигнала. Однако на практике в подавляющем большинстве случаев области частот сигнала и помехи перекрываются, т.е. фильтрацией невозможно без

погрешности выделить полезный сигнал. Поэтому при фильтрации стремятся найти компромисс между двумя требованиями: *существенно не исказить полезный сигнал и полнее подавить помеху.*

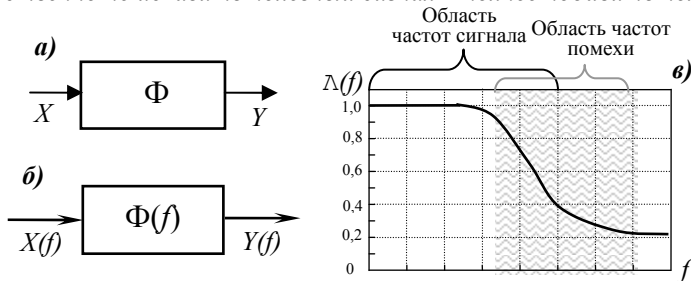


Рис. 7.20. Фильтр и его амплитудно-частотная характеристика

**Способы фильтрации волнового рыскания.** В АР используются различные технологии для фильтрации волновой помехи:

- Зоны нечувствительности и насыщения;
- Низкочастотные линейные фильтры;
- Полосовые фильтры, образованные совокупностью линейных;
- Алгоритм «наблюдателя»;
- Эвристические алгоритмы и другие методы.

При использовании **зон нечувствительности** зависимость между входным и выходным сигналом фильтра имеет вид, показанный на рис. 7.21,а. Когда известно, что полезный сигнал ограничен по величине значением  $Y_{\Gamma}$  (например, скорость поворота при стабилизации судна на курсе не может быть больше  $0,5^0/с$ ), то применяется для фильтрации входного сигнала и зона насыщения (рис. 7.21,б).

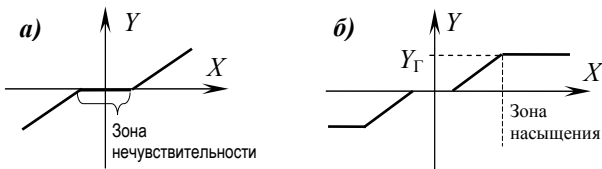


Рис. 7.21. Использование зон нечувствительности и насыщения для фильтрации

**Линейный фильтр** представляет собой устройство, в котором связь между входной и выходной величинами описывается линейным дифференциальным уравнением. Такой фильтр, пропускающий без искажения гармоники с малой частотой и уменьшающий амплитуды

гармоник с большей частотой, называется **низкочастотным**. Так как интервал частот волнового рыскания обычно приходится на более высокие частоты, чем уход судна от курса, который должен учитывать регулятор, то низкочастотные фильтры широко применяются в АР. Простейшим их представителем является так называемое *инерционное звено*, связь между входом  $X$  и выходом  $Y$  которого описывается дифференциальным уравнением:

$$T\dot{Y} + Y = X,$$

где  $T$  – постоянная времени. АЧХ такого фильтра имеет вид:

$$\Lambda(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + f^2 T^2}}.$$

Изменяя параметр  $T$ , можно изменять характеристику фильтра. На рис. 7.22 приведены две характеристики такого фильтра, отвечающие разным значениям постоянной времени. В АР применяют низкочастотные линейные фильтры и с более сложной структурой, позволяющей лучше выполнить задачу фильтрации. Низкочастотные фильтры эффективны для крупнотоннажных судов, у которых отклонение от курса  $\psi_H$ , которое должен учесть регулятор, и волновое рыскание  $\psi_B$  разнесены по частоте. У среднетоннажных судов при волнении с кормовых углов, где  $\psi_B$  уже попадает в полосу пропускаемых судном частот, эффективность таких фильтров меньше. При волнении с носовых курсовых углов на таких судах низкочастотные фильтры хорошо справляются со своей задачей.

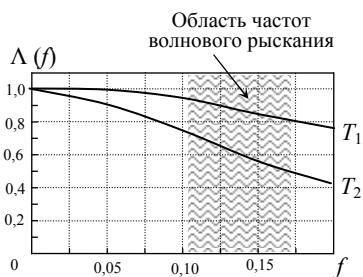


Рис. 7.22. АЧХ низкочастотного фильтра

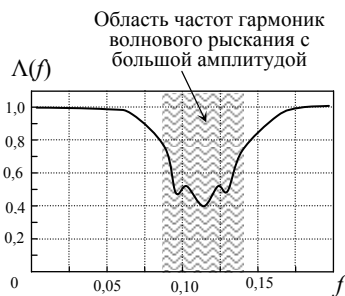


Рис. 7.23. АЧХ полосового фильтра

**Полосовые фильтры.** У малых судов частотное различие между составляющей, по которой должно формироваться управление, и



волновой компонентой невелико. Поэтому здесь меньшее искажение полезного сигнала, чем у низкочастотного фильтра, дает полосовой фильтр, уменьшающий волновую помеху в интервале наиболее интенсивных ее гармоник. Такой фильтр может быть сформирован совокупностью линейных фильтров. На рис. 7.23 представлена характеристика одного из полосовых фильтров.

**Использование алгоритма «наблюдателя».** Для повышения эффективности выделения полезного сигнала задачу фильтрации в ряде случаев сводят к так называемой «задаче наблюдателя». Последняя состоит в непрерывной (либо через малый интервал времени) оценке вектора состояния динамической системы по результатам его измерений и с учетом закономерности изменения во времени. Методы решения такой задачи отработаны, одним из них является фильтрация Калмана. Принцип выделения низкочастотного отклонения  $\psi_H$  из рыскания  $\psi$  судна при использовании алгоритма «наблюдателя» состоит в следующем (рис. 7.24,а).

По модели судна, на которую от рулевого датчика поступают значения реальных переключков руля  $\beta$ , находится прогноз  $\psi_{II}$  отклонения  $\psi_H$ :  $\psi_{II} = \psi_H + e_{II}$ , где  $e_{II}$  – погрешность прогноза. Полученное по информации ГК значение  $\psi$  считается результатом измерения  $\psi_H$  с погрешностью  $e_{II}$ , равной волновому рысканию  $\psi_B$ . Вид статистических характеристики погрешностей  $e_{II}$  и  $e_{II}$  априорно известен из многочисленных наблюдений процесса движения судна в условиях волнения. Обычно волновая составляющая  $e_{II} = \psi_B$  характеризуется корреляционной функцией

$$K_B(\tau) = \sigma_B^2 \exp(-c_B \tau) \cos f_B \tau.$$

Здесь  $\tau$  – разность моментов времени;  $\sigma_B$  – среднее квадратичное значение волнового рыскания;  $f_B$  – частота преобладающей гармоники волнового рыскания;  $c_B$  – коэффициент затухания.

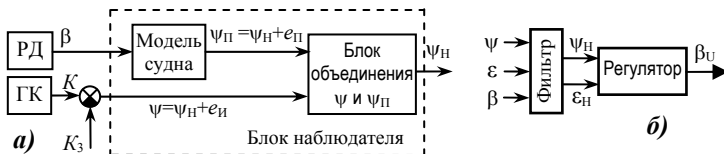


Рис. 7.24. Фильтр с алгоритмом наблюдателя

В блоке объединения по прогнозируемому и измеренному значениям  $\Psi_{\Pi}$  и  $\Psi$  с учетом статистических характеристик их погрешностей находится эффективная оценка  $\Psi_H$ .

На рис. 7.24,б показан регулятор AP с рассматриваемого вида фильтром, выделяющим  $\Psi_H, \varepsilon_H$ . Качество фильтрации может быть повышено при использовании фильтром дополнительной информации, отражающей характер рыскания. Особенно полезными являются определяемые системами контроля мореходности данные о частотном спектре рыскания и качки, а также данные приемоиндикатора DGPS.

**Эвристические алгоритмы фильтрации** отражают методы, используемые опытными рулевыми при управлении судном в условиях волнения. В современных AP они реализуются с помощью средств нечеткой логики.

## 7.9. Настройка авторулевых

Качество осуществляемой AP стабилизации курса зависит от динамических свойств судна и воздействий на него внешней среды. Это обуславливает необходимость подстройки AP к изменяющимся условиям. Находящиеся в эксплуатации AP бывают с ручной настройкой, с частичной адаптацией, адаптивными. Все AP, включая адаптивные, должны иметь возможность ручной настройки режима «Автомат» (Auto fixed).

**Органы для настройки AP.** В различных типах AP для достижения качественного управления изменяют те или иные параметры закона управления. Для настройки большинства AP используется три-четыре регулировки. Встречаемые в AP с ПИД-алгоритмом виды регулировок освещены ниже. Основными из них являются «Руль» и «Контрруль». Для устранения негативного влияния волнового рыскания судна на качество стабилизации курса в AP применяется либо *регулировка чувствительности к отклонениям от курса* либо *регулировка скорости руля* либо регулировка параметра *специального фильтра*.

**Регулировка «Руль» (Rudder)** служит для изменения коэффициента  $k_p$  управляющего сигнала  $\beta_U$ , определяющего перекладку руля (см. рис. 7.7). Диапазон  $k_p$  обычно составляет 0,5÷5,0. Вместо  $k_p$  в ряде AP используется регулировка коэффициента обратной связи ( $k_{OC} = 1/k_p$ ). С ее помощью в РП изменяется сигнал

рулевого датчика, компенсирующий  $\beta_U$ . Диапазон выбора  $k_{OC}$  обычно равен  $0,2 \div 2,0$ .

**Регулировка «Контрруль»** (*Counter rudder*) используется для подстройки коэффициента  $k_D$  дифференцирующего звена, сигнал которого определяет степень одерживания судна рулем. Эта регулировка в АР называется также «Сигнал производной», «Сигнал тахогенератора», «Одерживание». Для установки этой регулировки обычно используется шкала условных делений *от нуля до единицы* либо *от нуля до десяти*.

**Регулировка «Скорость руля»** (*Rudder's rate*) позволяет снижать скорость его поворота (обычно от 5,0 до 1,5  $^{\circ}/c$ ) с целью улучшения качества работы АР на волнении. В отечественных авторулевых типа АР, АТР подобный регулятор называется «Грубо-Точно». Он позволяет установить два значения скорости руля: нормальное – «Точно» и уменьшенное «Грубо» для плохой погоды.

**Регулировка «Рыскание»** (*Yaw*) служит для заглубления работы АР при плохой погоде путем увеличения зоны его нечувствительности (обычно от  $0^{\circ}$  до  $3^{\circ}$ ). В некоторых АР эта регулировка называется «Погода» (*Weather*).

**Регулировка «Рулевой предел»** (*Rudder limit*) используется для ограничения максимального угла руля. Диапазон выбора ограничений составляет  $5^{\circ} \div 35^{\circ}$ . На судах с малым значением метацентрической высоты прибегают к уменьшению  $\beta_{max}$  для предотвращения на повороте больших углов крена, при которых может произойти смещение груза. Эта регулировка может использоваться для изменения курса *с заданным углом руля*. При ПД-законе управления после установки нового курса в режиме «Автомат» АР выведет руль на выбранный предел, на котором он будет удерживаться, пока судно не приблизится к этому курсу.

**Регулировка параметра фильтра** волновой составляющей рыскания (когда в АР он есть). Если таким фильтром является *инерционное звено*, то регулируемый параметр называется «**Постоянная времени**». Когда фильтром служит *звено с запаздыванием*, то эта регулировка называется «**Время задержки**». При усилении рыскания судна от волн значение этих параметров увеличивают (обычно от 0 до 5 с).

**Регулировка среднего положения пера руля** позволяет вручную выбрать определенный угол отклонения руля для компенсации односторонних возмущений. Наличие такого регулятора ускоряет действие интегрирующего звена АР.

**Показатель качества стабилизации курса.** Для настройки АР следует установить показатели, по которым будет определяться ее удовлетворительность. Обычно работа системы стабилизации курса считается качественной, когда обеспечивается высокая точность удержания судна на курсе рациональными переключками руля, с минимумом потерь в скорости хода, в расходе топлива, с малым износом материальной части рулевой машины и с малым расходом энергии. Обобщая, можно установить, что неоптимальное управление выражается, прежде всего, в *недостаточной точности удержания на курсе* и в *пропульсивных потерях*, сопровождаемых дополнительным расходом топлива. Потери полезной мощности ГДУ при стабилизации курса определяются в основном двумя факторами:

1. Торможением судна из-за возникновения углов дрейфа при рыскании. Увеличение сопротивления воды движению судна в этом случае пропорционально *дисперсии угла рыскания*.

2. Дополнительным сопротивлением воды движению судна, вызываемым отклонениями руля от ДП. Величина этого сопротивления пропорциональна *дисперсии переключок руля*.

Исходя из этого, **показателями качественной стабилизации курса** считают величину отклонения от курса и кладок руля.

**Принципы настройки АР.** Ввиду того, что динамика разных судов из-за неодинаковости форм корпусов и движительно-рулевых комплексов отличается, и на нее влияют многочисленные факторы, ряд из которых имеет случайный характер, относительно настройки АР существуют лишь общие рекомендации.

**Первоначальная настройка** параметров «Руль», «Контрруль» на судне с определенной загрузкой выполняется заводскими специалистами во время приемо-сдаточных испытаний. Они проводятся при волнении моря до 2 баллов.

**Текущая настройка АР** производится при изменении: *загрузки судна, скорости хода* (больше, чем на 15%), *внешних условий* (степени волнения или глубины на мелководье), *курса в условиях волнения* (больше, чем на 20°).

**Влияние изменения скорости хода и загрузки** (когда от нее мало меняется степень устойчивости судна на курсе) в общем случае рекомендуется компенсировать изменением коэффициента «Руль». При уменьшении хода падает эффективность руля, поэтому при малых скоростях значение регулятора «Руль» должно быть больше, чем на ППХ. При полной загрузке, когда инерционность судна большая, значение  $k_p$  повышают для увеличения переключок руля. Когда судно

следует в балласте, значение регулятора «Руль» по сравнению с загруженным судном требуется уменьшить.

Однако у большинства судов при уменьшении осадки обычно устойчивость на курсе ухудшается. Кроме того, на устойчивость влияет также изменение дифферента судна. Поэтому в общем случае при изменении загрузки судна учитывают изменение его устойчивости на курсе, для чего кроме регулировки «Руль» применяют также «Контрруль». Ухудшение устойчивости обычно компенсируется увеличением  $k_p$  и  $k_d$ . Правильность настройки контролируется на основе анализа курсограммы. На тихой воде значение регулятора «Контрруль» устанавливают таким, чтобы обеспечить достаточное быстродействие системы «АР-судно» и демпфирование ее собственных колебаний. Короткий путь проверки удовлетворительности настройки  $k_d$  состоит в преднамеренном вводе небольшой градусной поправки (примерно  $3 \div 7^\circ$ ). О нормальной настройке свидетельствует быстрый приход судна на курс без перерегулирования или с одним небольшим перерегулированием.

**На волнении** частота и амплитуда скорости рыскания относительно заданного курса сильно возрастают, что приводит к значительному увеличению сигнала дифференцирующего звена АР, соответственно, и интенсивности работы РМ. Частота и амплитуда переключений руля резко возрастают. Так как частота переключений руля в ответ на волновое рыскание достаточно велика, то судно не успевает на них реагировать, т.е. они не имеют положительного эффекта. Поэтому их необходимо снижать. Одной из мер в этом направлении является уменьшение  $k_d$ . Одновременно можно увеличить, если необходимо, значение  $k_p$ , чтобы компенсировать уменьшение эффективности руля на волнении.

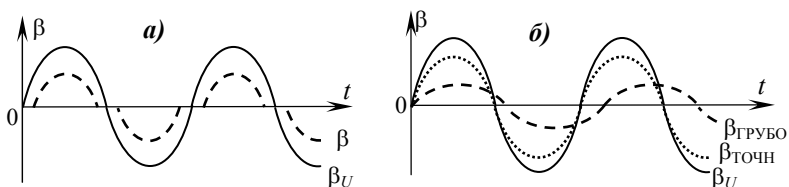


Рис. 7.25. Фильтрация волнового рыскания

**При сильном волнении** принимают меры для уменьшения величины переключений руля в ответ на волновое рыскание с целью

снижения износа рулевой машины и сопротивления движению судна от нерациональных перекладок руля. Простыми способами выполнения этой задачи являются: увеличение зоны нечувствительности, уменьшение скорости перекладки руля, увеличение задержки в отработке РП [4]. **Увеличение зоны нечувствительности** АР приводит к уменьшению амплитуды перекладок руля. Характер изменения выходного сигнала в этом случае представлен на рис. 7.25,а.

**Уменьшение скорости перекладки руля** для снижения негативного влияния волнового рыскания на качество стабилизации курса применялось в авторулевых АБР, АР, АТР, Аист (регулировка «Грубо-Точно»). При сильном рыскании от волн эта регулировка устанавливается в положение «Грубо». В этом случае уменьшается усиления сигнала  $\beta_U$  в РП, что сопровождается снижением скорости перекладки руля. Уменьшение этой скорости при знакопеременном рыскании приводит к запаздыванию отработки РП по отношению к задаваемому АР значению  $\beta_U$ , т.е. к усилению фильтрации волнового рыскания (рис. 7.25,б).

**Увеличение задержки** в отработке РП. «Время задержки» или «Постоянная времени» являются параметром фильтра волновой помехи в выходном сигнале некоторых АР. Нулевое значение параметра фильтра устанавливается в тихую погоду, а максимальное – в шторм, что уменьшает количество перекладок руля порядка на 30%.

## 7.10. Адаптивные авторулевые

При стабилизации курса морских среднетоннажных и крупнотоннажных судов диапазон изменения внешних воздействий и динамики судна обычно не требуют изменения структуры алгоритма управления. В этом режиме в АР используется параметрическая адаптация. Такие АР относятся к **самонастраивающимся** системам.

**Критерии оптимальности.** В общем случае при оценке качества управления курсом учитывается точность поддержания задаваемого курса, величина и рациональность перекладок руля. Обращается внимание на следующее обстоятельство. Сигналы управления рулем в АР формируются в зависимости от отклонения действительного курса от назначенного. Причинами отклонения от курса следования являются:

- медленноменяющиеся составляющие воздействия ветра, волнения;

- несимметричность упора винта и сопротивления корпуса;
- отклонения руля от ДП;
- периодическое (волновое) рыскание судна вправо и влево от заданного курса на волнении.

*При носовых курсовых углах волнения* частота волнового рыскания у среднетоннажных судов лежит выше полосы частот пропускания судном управляющих сигналов. Контрдействие руля в ответ на волновое рыскание в этом случае не влияет на курс судна и сопровождается возрастанием сопротивления воды движению судна, расхода топлива и износа РП. *При кормовых углах волнения* контрдействие руля волновому рысканию вызывает зигзагообразное движение судна относительно водной массы. Оно сопровождается ростом сопротивления воды из-за появления углов дрейфа и увеличением проходимого судном расстояния.

В большинстве адаптивных АР **критерием оптимальности управления курсом** служит функционал, учитывающий дисперсию рыскания и дисперсию переключений руля [4]:

$$I = \sigma_{\psi}^2 + \lambda_{\beta} \sigma_{\beta}^2 = \min, \quad (7.19)$$

где  $\sigma_{\psi}^2$ ,  $\sigma_{\beta}^2$  – соответственно дисперсия рыскания и переключений руля;  $\lambda_{\beta}$  – весовой множитель.

На частоту переключений руля накладывается ограничение:  $N_{\beta} < N_{\text{доп}}$ , где  $N_{\beta}$ ,  $N_{\text{доп}}$  – действительное и допустимое количество переключений руля в единицу времени. Значения  $\lambda_{\beta}$  и  $N_{\text{доп}}$  в основном зависят от типа судна, его устойчивости на курсе, загрузки, скорости хода и требований к точности судовождения.

В адаптивных АР обычно применяют два варианта критерия качества (7.19): экономический и безопасности. **Экономический критерий** направлен на сокращение импульсивных потерь при стабилизации судна на курсе в открытом море и в прибрежных водах путем уменьшения сопротивления воды движению судна. Благодаря этому экономится топливо и уменьшается продолжительность рейсов. **Критерий безопасности** используется с целью обеспечения максимальной точности удержания судна на курсе в стесненных водах, вблизи навигационных опасностей, даже если это достигается ценой некоторых дополнительных потерь топлива. Вес второго слагаемого в выражении (7.19) при использовании критерия безопасности меньше, а значение  $N_{\text{доп}}$  больше, чем в экономическом критерии.

В ряде адаптивных АР критерий качества учитывает и дисперсию угловой скорости рыскания.

Помимо среднеквадратических критериев качество управления курсом определяется и уровнем *статической погрешности*. В этом отношении обычно выдвигается к АР *требование структурного астатизма*, т.е. равенства нулю статической погрешности курса при любых возможных значениях медленноменяющейся составляющей момента внешних сил. Это требование иногда усиливается *ограничением времени*, в течение которого эта погрешность должна быть определена после изменения курса или внешних условий.

**Блок-схема адаптивного АР** одного из видов показана на рис. 7.26, где  $\Phi$  – фильтр. Для выделения из рыскания его низкочастотной компоненты в современных АР используются электронные цифровые фильтры. Из них наибольшее распространение получил **фильтр Калмана** (один из алгоритмов решения «задачи наблюдателя»). В АР он служит для получения раздельных оценок низкочастотного  $\Psi_H, \varepsilon_H$  и волнового  $\Psi_B, \varepsilon_B$  рыскания. Процесс фильтрации по Калману включает операцию прогнозирования оцениваемых величин. Прогноз  $\Psi_H, \varepsilon_H$  получается по модели судна с учетом переключений руля. Для прогноза  $\Psi_B, \varepsilon_B$  используется модель авторегрессии второго порядка, отражающая процесс с корреляционной функцией  $K_B(\tau) = \sigma_B^2 \exp(-c_B \tau) \cos f_B \tau$  волнового рыскания.

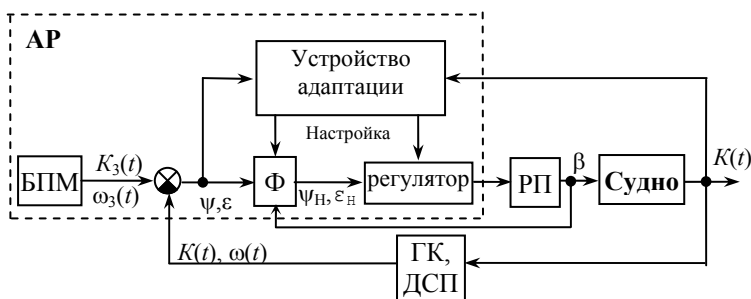


Рис.7.26. САУ<sub>К</sub> с адаптивным АР

При изменении условий работы устройство адаптации целесообразно перенастраивает фильтр и регулятор для обеспечения наилучшего качества управления. Обычно адаптивные АР приспособляются к изменению: *загрузки судна, скорости хода, погодных условий* (характера рыскания), *глубины на мелководье*.



**Устройство адаптации** может включать в себя модули: *анализа входных сигналов* (МАС), *анализа объекта* (МАО), *оценки качества работы* (МОКР), *выработки значений параметров настройки* (УВ), *исполнительный* (ИМ). **Модуль анализа входных сигналов** измеряет параметры рыскания и возмущений, влияющих на регулирование, и производит их анализ. **Модуль анализа объекта** по значениям сигналов управления и реакции на них судна (либо по значениям величин, влияющих на динамику судна) определяет изменение динамических свойств объекта при плавании. **Модуль оценки качества работы** контролирует значение показателя качества управления в процессе работы. **Модуль выработки значений параметров настройки** по информации МАС, МАО, МОКР определяет, какими должны быть значения параметров настройки фильтра и регулятора. **Исполнительный модуль** производит перенастройку фильтра и регулятора.

**Методы адаптации к изменяющимся условиям** в современных АР весьма разнообразны. Существуют *методы отдельной подстройки* к изменению параметрических и координатных возмущений и *методы совместного их учета*. Коэффициенты регулятора курса и фильтра волновой составляющей рыскания при адаптации могут определяться *беспоисковым* и *поисковым методом*.

Различают *адаптацию с применением математической модели судна* и *адаптацию без модели*. Используют в АР математические модели разных видов: линейные и нелинейные, алгебраические, дифференциальные, разностные. Они могут применяться: для прогноза процесса управления, для синтеза закона регулирования или значений его коэффициентов, для получения значений труднодоступных измерений переменных объекта, для моделирования «эталонной» реакции судна. Параметры модели в процессе адаптации могут оставаться неизменными, оцениваться теоретически по данным о параметрических возмущениях, идентифицироваться в режиме работы или в специальном режиме. В самонастраивающихся АР условно можно выделить системы с пассивной, активной и комбинированной адаптацией.

**Пассивная адаптация** применяется, когда факторы, влияющие на качество регулирования, измеряемы, и можно рассчитать, как изменить параметры АР, чтобы качество управления осталось хорошим. При такой адаптации коэффициенты закона регулирования находятся по определенной программе в зависимости от результатов контроля возмущений. Для реализации пассивной адаптации необходимо предварительное исследование системы, в процессе

которого должна быть установлена зависимость между коэффициентами закона регулирования и факторами, влияющими на его качество. Так как возмущения, действующие на судно, весьма разнообразны и большинство из них не поддается измерению, то область применения пассивной адаптации ограничена. Такой вид адаптации может быть использован для подстройки АР к изменению скорости хода судна, либо к изменению его загрузки.

Самонастраивающиеся системы с **активной адаптацией** делятся на поисковые, аналитические, аналитически-поисковые. **Поисковые системы** обладают свойством отыскания значений параметров АР, обеспечивающих экстремальное значение критерия качества управления. Для выполнения своей задачи в этих системах должна быть запрограммирована методика поиска и предусмотрена возможность оперативной оценки качества работы. Поисковым системам не нужна подробная информация об ОУ и о свойствах возмущений, но необходимо время для поиска. Этот метод обычно используется при приспособлении к изменению характера рыскания судна от волн. Такая подстройка АР занимает порядка 10÷15 минут, после чего он обеспечивает наилучшее качество стабилизации курса. В **аналитической самонастраивающейся системе** оптимальные значения параметров АР определяются с помощью того или иного метода аналитического синтеза регулятора на основе идентификации модели объекта и/или моделей возмущений. Для такой адаптации нужна достаточно полная информация о процессе управления, позволяющая надежно оценить параметры модели объекта и возмущений. **Аналитически-поисковые системы** позволяют объединить достоинства поисковых и аналитических методов. Аналитические решения здесь служат для сужения диапазона поиска значений коэффициентов регулирования, а наличие поискового режима ослабляет требования к точности оценки параметров модели судна, как объекта управления.

**Авторулевые с комбинированной адаптацией** используют для получения оптимального режима работы как активную, так и пассивную адаптацию к изменяющимся условиям.

В заключение можно отметить, что каждый метод адаптации обладает своими недостатками и достоинствами. Пассивная адаптация имеет ограниченную область применения, требует целенаправленных предварительных исследований системы. Контур самонастройки в этом случае является разомкнутым, и расчетный экстремум может не соответствовать действительному. Но в то же время этот вид адаптации отличается простотой и высоким быстродействием.

Активная адаптация более сложна, требует времени на поиск значений коэффициентов регулятора или на оценку параметров модели объекта по оперативной информации. Однако она по сравнению с пассивной адаптацией имеет более широкий диапазон применения и замкнутый контур самонастройки, обеспечивающий достижение действительного экстремума функции качества. Поэтому в адаптивных АР чаще всего применяется комбинированный способ адаптации, позволяющий в той или иной мере наилучшим образом использовать достоинства как активной, так и пассивной адаптации.

### 7.11. Авторулевые с элементами искусственного интеллекта

Быстрое развитие недорогих, обладающих высокой производительностью компьютеров и успехи компьютерных технологий вылились в так называемую «Теорию интеллектуального управления» (в других источниках – «Теорию синергетического управления»), в которой алгоритмы управления строятся путем моделирования определенных характеристик интеллектуальных биологических систем, таких как *обучаемость*, *адаптация*, *самоорганизация*. Как известно, изучением процессов самоорганизации, возникновения, поддержания, устойчивости и распада структур самой различной природы и возможности переноса закономерностей этих процессов на искусственно создаваемые системы занимается развиваемая в настоящее время одна из новых наук – *синергетика*. Термин *синергетика* происходит от греческого *синергена* – содействие, сотрудничество. Такое название науки предложено ее основателем Г. Хакеном для акцентирования внимания на основном ее принципе – согласованности взаимодействия частей при образовании структуры как единого целого. Подход к решению задач управления с позиций этой науки называется *синергетическим*. Ему свойственно стремление наиболее полного учета естественных свойств объекта для достижения поставленной цели минимальными управляющими воздействиями. Самоорганизующиеся системы обретают присущие им структуры или функции без какого бы то ни было вмешательства извне. Эти системы обладают способностью переходить из установившегося состояния в хорошо упорядоченное эволюционное состояние или в нескольких возможных состояний. Самоорганизующиеся системы способны сохранять внутреннюю устойчивость при воздействии внешней среды. Они находят способы самосохранения, чтобы не разрушаться и даже улучшать свою структуру.

В рамках синергетической теории развиваются системы на нечеткой логике и с нейронным управлением. Для первых характерно реализуемое средствами нечеткой логики эвристическое построение стратегий управления с использованием экспертных знаний. Основой вторых систем служит искусственная нейронная сеть, которая способна обучаться и выбирать в различных условиях эксплуатации значения своих параметров, при которых она наилучшим образом справляется с поставленной задачей. Достоинством обоих видов систем является ненужность для получения решения задачи точного описания динамики объекта управления. Но отсюда следует и их общий недостаток – невозможность аналитического исследования качества работы.

Нечеткая логика является одним из наиболее перспективных направлений современной теории управления. По сравнению с традиционными САУ главные преимущества систем, базирующихся на нечеткой логике, состоят в возможности:

- более полного учета неточностей и неопределенностей, присущих реальной системе, путем подбора подходящих лингвистических переменных и использования правил логического вывода, учитывающих опыт решения задачи управления человеком и знания экспертов об объекте управления, выраженные на естественном языке;
- повышения быстродействия процессов управления;
- решения задач управления, трудно формализуемых методами традиционной математики;
- адаптации системы при использовании в ней классического ПИД-алгоритма;
- повышения эффективности фильтрации случайных возмущений при обработке информации (при определенных условиях схема с нечеткой логикой является универсальным аппроксиматором, способным в компактной форме представить любую непрерывную функцию);
- снижения вероятности ошибочных решений.

В настоящее время уже применяются на судах гражданского флота серийно выпускаемые высокоэффективные управляющие курсом системы, основанные на нечеткой логике. Из них можно назвать авторулевые *Navipilot AD II* фирмы *Sperry Marine*, *NAVipilot 500* фирмы *Furuno*. Для пояснения принципов работы таких АР охарактеризуем в нестрогой, популярной форме ряд понятий нечеткой логики.

**Сведения из нечеткой логики.** Нечеткая логика (Fuzzy logic) соединяет принципы формальной логики с теорией вероятностей. Это направление было предложено Лофти Заде в 1965 году. В основе

нечеткой логики лежит теория нечетких множеств, где функция принадлежности элемента множеству не бинарная (да/нет), а может принимать любое значение в диапазоне 0-1. Это дает возможность определять понятия, нечеткие по самой своей природе: «хороший», «слабый», «около нуля» и т.д. Нечеткая логика позволяет выполнять над такими величинами весь спектр логических операций: *объединение, пересечение, отрицание* и др.

При определении свойств и параметров состояния объектов либо их совокупностей нередко пользуются словесными значениями. Например, *дистанцию* расхождения судов считают *опасной* и *безопасной*; время суток характеризуют значениями *утро, день, вечер, ночь*; в погрешностях управления выделяют *нулевую, малую, среднюю, большую*. В нечеткой логике такие словесные значения называют *термами*, а название объекта или параметра, к которому они относятся, – *лингвистической переменной*. Так в первом приведенном выше примере *дистанция* – это лингвистическая переменная с двумя термами: *опасная* и *безопасная*. Выбор числа термов для той или иной вводимой в задачу управления лингвистической переменной определяется особенностями задачи. Ниже, если лингвистическая переменная – *название* числового параметра  $x$ , то сокращенно она будет обозначаться  $x^*$ , количество ее термов –  $n$ , а сами термы –  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_j^*, \dots, x_n^*$ . Каждому терму соответствует определенное множество значений вещественного параметра  $x$ .

Для перехода от числовых величин к отражающим их лингвистическим переменным нужно знать границы термов. В обычной логике такие границы определяются четко. Например, в задаче расхождения двух судов в открытом море *дистанции* кратчайшего сближения (обозначим эту вещественную величину  $d$ ), можно поставить в соответствие лингвистическую переменную  $d^*$  с термами *опасная* ( $d_1^*$ ) и *безопасная* ( $d_2^*$ ). Второй терм можно определить четко как множество  $A$  значений  $d$ , отвечающих условию  $A = \{d > 3\}$ . Графически такая граница термина показана на рис. 7.27,а в координатном пространстве, в котором по оси абсцисс отложены значения вещественной переменной  $d$ , а по оси ординат отмечена степень принадлежности значений  $d$  к терму «безопасная».

Во многих случаях четкой границы между термами провести нельзя. Например, термы *утро, день, вечер, ночь* лингвистической

переменной *время суток* размыты. Одни считают утром время от 5 до 8 часов, вторые – от 7 до 11, третьи – от 6 до 9 и т.д. Границу безопасной  $d$  кратчайшей дистанции расхождения в открытом море штурмана устанавливают неодинаковой, обычно от одной до трех миль. Множество без резко очерченных границ называют *нечетким*. Это означает, что переход от «относится к множеству (терму)» и «не относится к множеству» постепенный. Его в нечеткой логике характеризуют так называемой *функцией принадлежности* (ФП), которую для термина «безопасная» переменной  $d^*$  представим в виде, изображенном на рис. 7.27,б. ФП здесь определяет уровень (степень) принадлежности значений  $d$  к терму «безопасная». Так, например (см. рис. 7.27,б), согласно выбранной ФП степень принадлежности дистанции 2 мили к терму «безопасная» составляет  $p = 0,4$ . ФП напоминает функцию вероятностей, но не является ей, так как не обязательно основывается на статистическом материале. На рис. 7.27,в приведены оба термина («опасная» и «безопасная») лингвистической переменной  $d^*$  и соответствующие им ФП.

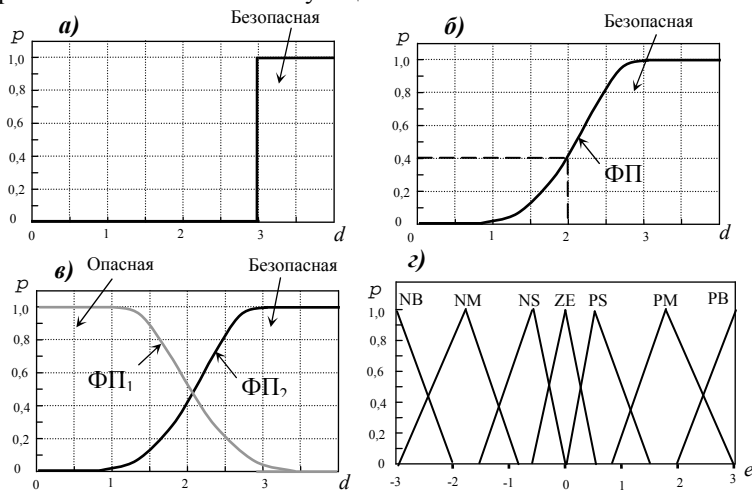


Рис. 7.27. Операторы фазификации

Переход от конкретного значения  $x$  вещественной переменной к лингвистической переменной  $x^*$  с нечеткими терминами (переход в область нечетких множеств) состоит в определении вектора  $[p_{x_1} p_{x_2} \dots p_{x_j} \dots p_{x_n}]$  степеней принадлежности значения  $x$  к

каждому из термов. Операцию такого перехода от величин в области действительных чисел к их представлению лингвистическими переменными с нечеткими термами называют **фазификацией** (fz), а операцию обратного перехода – **дефазификацией** (dfz). Таким образом:

$$fz(x) = x^* = [p_{x1} \ p_{x2} \ \dots \ p_{xn}].$$

На рис. 7.27,б фактически представлен оператор фазификации – процедуры для перехода от действительной переменной  $d$  к лингвистической переменной  $d^*$  с двумя размытыми термами (в область нечетких множеств). Операция fz по аналогии с интегральными преобразованиями Лапласа и Фурье может быть интерпретирована как переход в другое пространство, в котором проще и эффективнее решается задача. Это условие и должно определять применение или неприменение методов нечеткой логики к решению задач управления.

Функции принадлежности в операторах фазификации могут быть разными: треугольными, трапециидальными, колоколообразными и другими. Выбор типа ФП определяется особенностями решаемой задачи. Чаще всего применяются треугольные ФП, для хранения которых нужно мало памяти.

Таблица 7.1 – Названия термов ошибки управления

Номер терма	Код терма	Название терма
1	NB	Negative big (Большая со знаком «-»)
2	NM	Negative medium (Средняя со знаком «-»)
3	NS	Negative small (Малая со знаком «-»)
4	ZE	Zero (Нулевая)
5	PS	Positive small (Малая со знаком «+»)
6	PM	Positive medium (Средняя со знаком «+»)
7	PB	Positive big (Большая со знаком «+»)

На рис. 7.27,г представлены ФП семи термов (табл. 7.1) лингвистической переменной  $e^*$ , отражающей ошибку  $e$  управления в системе с обратной связью. Значения  $e$  с помощью **масштабного фактора**  $\mu$  приведены к диапазону  $[-3, 3]$ , соответствующему числу термов (рис. 7.28)

$$\bar{e} = \mu \cdot e, \text{ если } |\bar{e}| > 3, \text{ то } \bar{e} = \text{sgn}(e) \cdot 3,$$

где  $\hat{e}$  – масштабированное значение  $e$ ;  $e_{\Gamma}$  – минимальное из значений  $e$ , для которого степень принадлежности к **PВ** равна единице;  $\mu = 3/e_{\Gamma}$ .

Если с изменением условий эксплуатации значения  $e$ , соответствующие термам, пропорционально меняются, то это учитывается подстройкой масштабного фактора, без изменения ФП и логики дальнейшей обработки. Значения  $\hat{e}$ , соответствующие максимумам ФП термов NB, NM, ... , PB, и вид этих функций определяются экспертами.

Перевод исходных данных задачи из числовой области в область лингвистических переменных позволяет использовать для получения решения механизм нечеткого логического вывода, включающий совокупность правил «если-то».

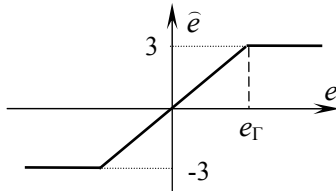


Рис. 7.28. Масштабирование значений  $e$

решена в соответствии с неформальными приемами, используемыми опытными специалистами, если описать эти приемы системой правил «если-то». В результате применения процедур логического вывода решение получается в нечетком виде как вектор степеней принадлежности выходной величины ее термам. Для

передачи этого результата на отработку средств управления, он из нечеткого формата должен быть переведен в область четких действительных чисел. В устройствах управления, основанных на нечеткой логике, обычно для этой цели используется система вывода результата **Мамдани**, либо система вывода **Суджено**. Допустим, управляющее воздействие  $z$  находится в зависимости от результатов измерения двух входных переменных  $x, y$ . Согласно Мамдани в этом случае правило получения выходной величины  $z$  имеет вид

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ THEN } z \text{ is } C,$$

где  $z$  должно быть вычислено в четком виде с помощью одного или нескольких методов дефазификации.

В системе вывода Суджено дефазификации сводится к нахождению функции входных переменных:

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ THEN } z = f(x, y),$$

где  $f(x, y)$  – четкая функция входных переменных.



**Принцип работы нечеткого АР.** Одной из областей внедрения алгоритмов нечеткой логики являются задачи управления с высоким уровнем неопределенности и/или зашумленности, вызванной теми или другими причинами (например, задачи расхождения судов, управление курсом в шторм), а также задачи управления нелинейными объектами, где применение ПИД и ПД управления сопровождается существенными погрешностями. Судно – нелинейный объект. Невозможно обеспечить высокое качество выполнения им «сильных» маневров курсом с помощью ПД-управления без дополнительной коррекции сигнала управления. Особо следует отметить штормовые условия, в которых меняется и динамика судна, и уменьшаются прикладываемые к судну силы средств его управления, и где значительны возмущающие движение судна и работу силовых средств воздействия волн и ветра. Качество работы ПИД-авторулевых в этих условиях неудовлетворительно, а в сильный шторм такие АР не справляются с задачей управления курсом. Для обеспечения безопасности в условиях сильного шторма переходят на ручное управление. Для малых судов (рыболовных, яхт и т.д.) этот недостаток ПИД-управления начинает проявляться уже при умеренном волнении. Этим объясняется тот факт, что первые АР с нечеткой логикой были разработаны именно для малых судов.

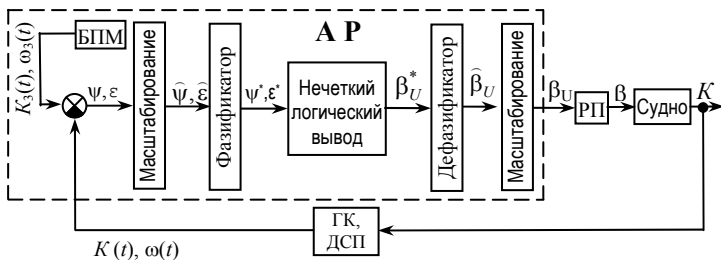


Рис. 7.29. Блок-схема САУ<sub>К</sub> с нечетким АР

Нечеткая логика позволяет выразить самые различные подходы к управлению курсом, что определило многочисленность предложенных для этой цели нечетких алгоритмов. Ниже характеризуется только один из них [38], когда САУ<sub>К</sub> с нечетким АР представляется схемой, показанной на рис. 7.29.

При использовании такой схемы оператором масштабирования ошибки управления  $\psi$  и  $\varepsilon$  приводятся к диапазону  $[-3, 3]$ . Затем фазификатор преобразует масштабированные значения в логические

переменные  $\psi^*$ ,  $\varepsilon^*$  с 7 термами (табл. 7.1). Фазификация значений  $\psi$  и  $\varepsilon$  выполняется с помощью оператора, приведенного на рис. 7.27,г.

Таблица 7.2. – Правило логического вывода

		Ошибка $\psi$						
		<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
Ошибка $\varepsilon$	<b>NB</b>	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	<b>NM</b>	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	<b>NS</b>	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	<b>ZE</b>	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	<b>PS</b>	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
	<b>PM</b>	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
	<b>PB</b>	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Согласно правилу логического вывода (табл. 7.2) в зависимости от термов входных величин находятся 49 значений выходной величины (обозначим их  $\beta_{ij}^*$ ) в лингвистической форме. Степень  $p_{ij}$  принадлежности к ним действительного значения выходной величины определяется по правилу  $p_{ij} = \min\{p_{\psi_i}, p_{\varepsilon_j}\}$ .

В рассматриваемом АР используется система вывода Суждено. Согласно ей сначала значениям выходной величины  $\beta_{ij}^*$  ставятся в соответствие значения  $b_{ij}$  согласно правилу:

IF  $\beta_{ij}^*$  is **NB** THEN  $b_{ij} = -3$ ; IF  $\beta_{ij}^*$  is **NM** THEN  $b_{ij} = -2$ ; ...

IF  $\beta_{ij}^*$  is **PB** THEN  $b_{ij} = 3$ .

Затем как средневзвешенное вычисляется масштабированное значение выходной величины

$$\widehat{\beta}_U = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 p_{ij} b_{ij}}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 p_{ij}}.$$

По  $\widehat{\beta}_U$  с помощью масштабного коэффициента  $\mu_\beta$  находится величина перекладки руля:  $\beta_U = \mu_\beta \widehat{\beta}_U$ .

**Адаптация нечетких АР.** У АР с нечеткой логикой используется изменение трех видов данных для улучшения качества управления.

Это: масштабные факторы, функции принадлежности, правила логического вывода. AP с нечеткой логикой, у которых подстраиваются масштабные факторы или функции принадлежности, называются *самоадаптирующимися*. Основные схемы для подстройки масштабных факторов были разработаны Хаяши (1991), Танака и Сано (1991). Для подгонки функций принадлежности Номура и Ваками предложили процедуру (1991), в которой используется метод градиентного спуска. Такаги и Хаяши (1991), Карра и Гентри (1993) для адаптации этих функций применили соответственно искусственные нейронные сети и генетический алгоритм.

AP, в которых модифицируются правила «если-то» логического вывода, называются *самоорганизующимися*. основополагающими работами по самоорганизующимся системам с нечеткой логикой считаются труды Процука и Мамдани (1979). Их идея самоорганизации состоит в идентификации правила, ответственного за текущее плохое качество управления, и замене его лучшим. К исследованиям, посвященным автоматическому образованию нечетких правил «если-то» из образцов данных, генерируемых искусственными нейронными сетями, относятся работы Пачини и Коско (1992); Наразаки, Шигаки (1995); Помареса, Ортеги (2000) и других авторов.

## 8. Система вождения судна по маршруту

### 8.1. Назначение и режимы СВМ

Бортовые системы для автоматического вождения судна по заданной траектории начали применяться на гражданском флоте с 60-х годов прошлого века. Однако до 2002 года к обязательному навигационному оборудованию судов они не относились. Как известно, перечень навигационных приборов и систем, которые должны быть на судах, определяется правилом 19 пятой главы СОЛАС. В 1999 году эта глава была переработана. Ее новое содержание было утверждено на 73 сессии Комитета ИМО по безопасности на море и вошло в действие 1 июля 2002 г. В переработанном правиле 19 перечень обязательных навигационных приборов расширен. В частности, в ней определено, что на судах валовой вместимостью 10 тыс. р.т. и более АР должен быть дополнен **системой вождения судна по маршруту – СВМ (Track Control System – TCS)**. В соединении с компасом, лагом и позиционным датчиком СВМ предназначена для проводки судна по линии заданного пути.

Выбор маршрута движения не входит в задачу СВМ. Он считается известным и задается в памяти системы координатами точек поворота (**WP – way points**). Им система присваивает порядковые номера, начальная точка маршрута считается нулевой или первой. Часть пути по локсодромии между двумя соседними WP называется прямолинейным *отрезком маршрута*, а направление движения по нему – *курсом по отрезку маршрута* (**CUR – course under route**). Отрезок маршрута, по которому в данный момент движется судно, и путевая точка, к которой оно следует, называют *активными*. Согласно предъявляемым к планированию пути требованиям, маршрут, кроме прямых отрезков, должен включать и заданные **радиусом** криволинейные участки поворотов с одного прямолинейного отрезка на другой.

При проводке судна по намеченной траектории СВМ использует информацию о положении, курсе и скорости судна, получаемую от позиционного датчика, гирокомпаса и лага. Датчиком координат судна обычно является приемоиндикатор GPS или DGPS. Им также может быть приемоиндикатор других электронных позиционных систем и радиолокатор. Для улучшения качества проводки СВМ может использовать информацию дополнительных датчиков: указателя скорости поворота, датчика параметров ветра, измерителя параметров качки и т.д.

СВМ обычно имеет два режима автоматического управления. Первый служит для проводки судна по маршруту, определенному последовательностью путевых точек. Его называют **навигационным** (NAV). Встречаются в СВМ иностранного производства и следующие названия этого режима: «Track steering», «Track keeping», «Track auto». Второй режим управления «**Way point steering**» предназначен для вывода судна в указанную точку по линии кратчайшего пути.

В режиме «NAV» выделяются два подрежима вождения судна: «*по линии маршрута*» и «*от WP к WP*» (от точки поворота к точке поворота). В первом из них судно должно следовать, не отклоняясь от линии активного отрезка маршрута. Управлением здесь сводится к нулю *смещение с этой линии* (cross track error). Поэтому этот подрежим обозначают также «XTE». Во втором подрежиме (который иногда называют «*Course to WP*») при отклонении от активного отрезка судно не возвращается на него. Главной задачей считается движение к точке поворота, на которую направляется вектор скорости судна. Т.е. по существу это режим «Way point steering», последовательно применяемый после каждого поворота на новый отрезок маршрута. Подрежим вождения «*по линии маршрута*» обычно используют при движении в узкостях, по фарватерам, а подрежим «*от WP к WP*» – в открытом море и в акваториях, где опасности лежат достаточно далеко от маршрута.

В ряде СВМ при автопроводке по маршруту используют два вида начала поворота на новый отрезок пути: поворот только после подтверждения вахтенным помощником принятия предупреждения СВМ о приближении к точке WOP, и поворот в любом случае, с подтверждением или без него. Первый вариант называется «WP switching MANUAL», а второй – «WP switching AUTO».

Следует отметить, что СВМ и AP должны рассматриваться как вспомогательное оборудование, облегчающее вождение судна, но не освобождающее судоводителя от мер по обеспечению безопасности плавания и от ответственности. Аварийные случаи при использовании AP и СВМ чаще всего происходили от упущений вахтенного помощника или из-за плохого знания им процедур перехода из автоматического режима управления на ручной. Например, суда сталкивались, находясь под управлением AP, когда вахтенными помощниками не велось должного наблюдения за обстановкой. Посадки на мель и другие происшествия случались, когда судно в стесненных водах управлялось AP, но возможность быстрого перехода на ручное управление не была обеспечена.

Не запрещается использовать АР и СВМ при сложных условиях плавания. Но при интенсивном движении, ограниченной видимости и всех других опасных навигационных обстоятельствах автоматическое вождение должно применяться только тогда, когда ручной режим может быть установлен немедленно, и квалифицированный рулевой готов сразу стать на руль. Если в течение 30 с. это не может быть выполнено, то судно в стесненных водах должно управляться вручную. Переход с ручного на автоматический режим управления и наоборот должен производиться капитаном, вахтенным помощником или под их наблюдением.

Следует учитывать, что эффективность СВМ и АР зависит от преобладающих условий плавания, скорости судна, его водоизмещения и главное – состояния моря. Особое внимание судоводители должны обращать на возможность/невозможность этих систем надежно выполнять свои функции при малой скорости и в штормовых условиях.

## 8.2. Требования к СВМ

Эксплуатационные требования к системам вождения судна по маршруту устанавливаются ИМО и классификационными обществами. Стандарты ИМО представлены в Резолюции MSC.69(22), Приложение 2, «Recommendation on performance standards for Track control systems». Они должны применяться к СВМ судов, максимальная скорость поворота которых не превышает  $10^0/с$ , в диапазоне скоростей хода от минимальной маневренной до 30 узлов. Ниже представлены основные требования к СВМ.

**Функциональность.** СВМ должна быть способной вести судно от его позиции к отдельной точке или по маршруту, определенному последовательностью путевых точек. Система должна позволять начинать вождение судна, если отклонение его места от линии пути и разность между курсом по маршруту и действительным курсом позволяют с помощью безопасного маневра прийти на линию заданного пути.

Требуется, чтобы главная позиционная система, предоставляющая СВМ координаты судна, была электронной и одобренной ИМО. Необходим непрерывный мониторинг места судна по информации второго независимого датчика позиции. Эта дополнительная мониторинговая система может не являться частью СВМ.

При подходе к точке поворота тревожный сигнал и предупреждение индикацией об изменении курса должны быть поданы

СВМ не позже, чем за минуту перед перекладкой руля для выполнения поворота. В системе следует иметь средство, с помощью которого вахтенный помощник подтверждает прием этого сигнала. С получением подтверждения этого сигнала или без него СВМ в режиме автоматического вождения должна вести судно по заданному маршруту. Если вахтенный помощник не подтвердил прием сигнала СВМ об изменении курса в течение 30 с. после его подачи, то система должна подать повторный тревожный сигнал.

Необходимо, чтобы поворот с одного отрезка маршрута на другой основывался на заданном радиусе или радиусе, вычисленным по предварительно назначенной угловой скорости с учетом маневренных возможностей судна. На новый отрезок маршрута судно должно приходиться с требуемой точностью и без перерегулирования. Выход траектории судна за пределы судоходной части при повороте недопустим. В процессе изменения курса по возможности не следует допускать существенного падения скорости хода из-за значительной скорости поворота. Крен судна при повороте не должен достигать опасных значений, при которых может произойти смещение груза. Поворот должен производиться малым числом перекладок руля.

Система должна быть способной вручную или автоматически подстраиваться к изменению характеристик управляемости судна при различной погоде, скорости и загрузке. Необходимо иметь средства для предупреждения излишних активаций руля при нормальном рыскании на волнении, при смещениях ЦМ судна на поперечно-горизонтальной качке, и при «разбросе» измеряемых значений координат судна из-за случайных ошибок позиционной системы.

Предписано иметь возможность перехода от автоматического вождения по маршруту к ручному управлению судном при любом положении руля и в любых условиях, включая отказ СВМ. Обратный переход от ручного управления к режиму вождения по маршруту должен быть возможен только намеренным действием оператора.

СВМ должна быть способной работать в режиме управления курсом и удовлетворять в нем всем требованиям к управляющей курсом системе (АР). Во всех условиях следует иметь возможность перехода от режима вождения по маршруту к режиму АР. При активации режима АР система должна приводить курс судна к заданному значению. Необходима непрерывная информация о курсе от второго независимого компаса. Устройство такого дублирующего мониторинга курса может не являться частью СВМ.

Обратный переход от управления курсом к вождению по маршруту в системе должен производиться намеренным действием

судоводителя. Индикацией следует указывать название активированного режима управления.

СВМ должна соединяться с датчиками позиции, курса и скорости судна, отвечающими стандартам ИМО. Курсоуказателем должен быть гирокомпас. Все подсоединяемые к СВМ датчики должны быть способны предоставлять информацию о своем статусе, включая сведения о выходе из строя.

**Сигнализация и индикация** должны быть в случаях:

- выхода из строя системы электропитания или его снижения до уровня, при котором нарушается безопасность функционирования;
- бокового смещения от линии пути на величину, большую заданной;
- отклонения от курса, превышающего заданный предел;
- выхода из строя позиционного датчика или компаса;
- снижения скорости ниже предела, необходимого для безопасного управления судном;
- отсутствия подтверждения вахтенным помощником приема аварийного сигнала в течение 30 с. после его подачи.

В СВМ необходимо **непрерывно** отображать такие данные:

- режим управления;
- источники информации о позиции, курсе и скорости;
- статусы всех датчиков и случаи их отказа;
- курс по активному отрезку маршрута, действительный курс, курс на следующем отрезке маршрута;
- координаты, боковое отклонение от линии пути, скорость судна;
- номер активной и следующей за ней путевой точки;
- время и дистанцию до активной точки поворота;
- название маршрута.

**По требованию** следует показывать перечень запланированных путевых точек, включая их номера, координаты, курсы и дистанции между соседними из них, радиусы поворота, допустимые отклонения и другие параметры плана движения.

**Интерфейс.** СВМ должна взаимодействовать с судовой навигационной системой согласно протоколу МЭК 61162.

### 8.3. Структура системы

СВМ совместно с РП и судном образует систему автоматического управления движением по маршруту (САУ<sub>М</sub>). Вождение по маршруту рассматривают либо как **единую задачу** управления курсом  $K$  и боковым смещением  $r$  от линии пути (или путевым углом на точку



поворота), либо разделяют его на **две задачи**: *стабилизацию курса и управление боковым смещением* (или путевым углом на WP) системы «АР-судно». Оба эти подхода реализованы при синтезе алгоритмов управления СВМ. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Ввиду того, что в СВМ требуется иметь отдельно режим управления курсом, второй подход, по-видимому, предпочтительней. Поэтому он освещается ниже.

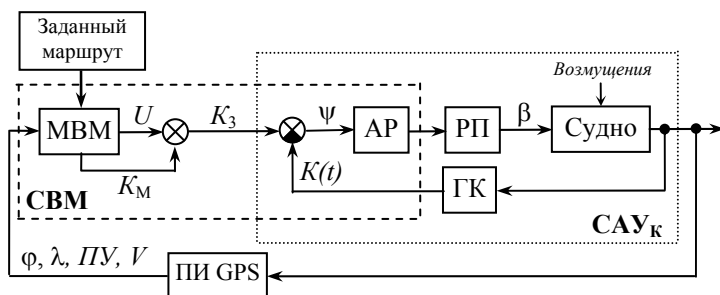


Рис. 8.1. Блок-схема двухконтурной САУ<sub>М</sub>

Блок-схема САУ<sub>М</sub> при раздельном управлении курсом и боковым смещением  $r$  представлена на рис. 8.1. Она включает два контура управления. Внутренний контур с АР служит для регулирования курса, а второй контур с модулем вождения по маршруту (МВМ) применяется для управления координатой  $r$ . САУ<sub>К</sub> во втором контуре является объектом управления боковым смещением.

Управление координатой  $r$  **при движении по прямолинейному отрезку маршрута** заключается в расчете и задании АР курса  $K_3$ , стабилизация которого обеспечивает движение по линии пути ( $r = 0$ ). Управляемой координатой системы «МВМ-САУ<sub>К</sub>» является  $r$ , а управляющим воздействием – поправка  $U$  к курсу  $K_M$  активного отрезка маршрута.

**Для перехода с одного отрезка маршрута на другой** необходимо, прежде всего, точно определить момент начала поворота. Это достигается применением эффективных методов прогноза маневров судов, например, прогнозирования изменений курса по разностной модели системы «АР-судно» (см. параграф 7.7). По ней с учетом функции и параметра намеченного поворота в ускоренном времени производится моделирование его выполнения на требуемый угол. При таком моделировании рассчитываются точки траектории

движения ЦМ судна при повороте и расстояние  $s_{\Delta}$  до активной путевой точки (см. рис. 7.17), на котором надо начать изменение курса, чтобы точно выйти на следующий отрезок пути. Когда правильно выбран момент начала поворота, то за короткое время его осуществления вызываемый возмущениями уход ЦМ судна от полученной по модели траектории не успевает достичь большого значения. При необходимости, в зависимости от отклонения от этой траектории может быть введена коррекция в перемещение судна.

## 8.4. Алгоритмы вождения по маршруту

### 8.4.1. Режим вождения «по линии маршрута»

**Управление на прямолинейных отрезках пути.** Как уже упоминалось, проводка судна по маршруту включает стабилизацию ЦМ судна на прямолинейных отрезках пути и выполнение поворотов. Первая задача решается путем коррекции задаваемого АР курса (см. рис. 8.1). Значения  $K_3$  получают, исправляя курс  $K_M$  активного отрезка маршрута

$$K_3 = K_M + U. \quad (8.1)$$

Поправка  $U$  к курсу  $K_M$  находится в зависимости от величины бокового отклонения  $r$  ЦМ судна от линии пути. Анализ характера сноса судна в различных условиях и районах плавания показывает, что для большинства из них по структуре оптимальным для выработки поправок к  $K_M$  является ПИ-алгоритм:

$$U = a_1 r + a_2 \int r \cdot dt = U_{\Lambda} + U_{\text{И}}, \quad (8.2)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты пропорциональной  $U_{\Lambda}$  и интегральной  $U_{\text{И}}$  компонент.

**Пропорциональная  $r$  составляющая  $U_{\Lambda} = a_1 r$**  является основной. Она обеспечивает возвращение судна на линию пути при появлении отклонения от нее. Однако только этой компоненты недостаточно для обеспечения качественной проводки. Если для выработки поправки  $U$  используется только этот сигнал, то при наличии ветра и течения, вызывающих боковой снос судна вправо или влево от линии пути, у САУ<sub>М</sub> будет статическая погрешность  $r_{\text{уст}}$  [41], пропорциональная скорости бокового сноса (рис. 8.2).

Эту погрешность необходимо учитывать, так как она может быть значительной. Для примера оценим  $r_{уст}$  при скорости бокового сноса  $v_{C\perp} = 0,5$  узл,  $a_1 = 0,1^0/м$ ,  $V = 12$  узл. Для этого рассмотрим с П-алгоритмом управления уравнение (6.23) смещения ЦМ судна при проводке по линии пути

$$T_r \ddot{r} + \dot{r} = UV + v_{C\perp} = -a_1 r \cdot V + v_{C\perp},$$

где знак «-» при подстановке  $U = -a_1 r$  берется, так как действие  $U$  направлено на компенсацию бокового сноса судна.

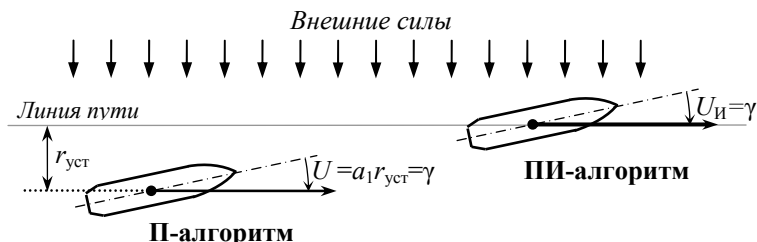


Рис. 8.2. Равновесное состояние САУ<sub>М</sub> с П- и ПИ-алгоритмом коррекции  $K_M$

Для установившегося режима движения ( $\ddot{r} = 0$ ,  $\dot{r} = 0$ ) из этого уравнения следует

$$r_{уст} = 57,3 \cdot v_{C\perp} / (a_1 V) = 25 \text{ м.}$$

**Интегральная компонента**  $U_{И} = a_2 \int r \cdot dt$  служит для устранения статического отклонения, появляющегося у системы с П-алгоритмом управления при односторонних возмущениях, вызывающих снос судна от линии пути. По величине  $U_{И}$  равно значению суммарного угла  $\gamma$  сноса судна ветром и течением.

**Расчет бокового отклонения по данным позиционного датчика.** От датчика позиции поступают координаты определенной точки судна (например, для приемоиндикатора GPS – это координаты места его антенны). Поэтому вначале они должны быть пересчитаны на ЦМ судна:  $\varphi$  и  $\lambda$ .

Для расчета бокового отклонения ЦМ судна от активного отрезка маршрута используется промежуточная ориентированная по меридиану прямоугольная система координат  $xу$  и ориентированная

по  $K_M$  маршрутная система координат  $sr$  (рис. 8.3). Начало этих систем связывается с исходной путевой точкой активного отрезка маршрута (на рисунке точка  $A$ ).

Координаты судна в системе  $xу$  находятся по формулам

$$\left. \begin{aligned} y &= \varphi - \varphi_A \\ x &= (\lambda - \lambda_A) \cos[0,5(\varphi + \varphi_A)] \end{aligned} \right\}, \quad (8.3)$$

где  $\varphi_A, \lambda_A$  – широта и долгота начальной точки активного отрезка маршрута.

Маршрутные координаты судна рассчитываются по его прямоугольным координатам  $x$  и  $y$

$$\begin{cases} r = x \cdot \cos K_M - y \cdot \sin K_M \\ s = x \cdot \sin K_M + y \cdot \cos K_M \end{cases} \quad (8.4)$$

Расстояние по отрезку маршрута до путевой точки  $B$  равно

$s_B = s_{AB} - s$ , где  $s_{AB}$  – длина отрезка маршрута.

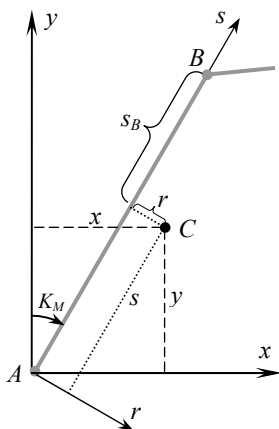


Рис. 8.3. К расчету маршрутных координат

**Критерий оптимальности.** При выборе критерия оптимальности стабилизации ЦМ судна на прямолинейном отрезке пути руководствуются следующими соображениями. Из опыта мореплавания известно, что проводка по отрезку маршрута считается квалифицированной, когда заданная точность движения достигается малыми и редкими корректировками курса. Поэтому критерий качества управления может быть сформулирован как обеспечение точной проводки судна по линии пути минимальными по величине и частоте корректировками курса следования. Такой критерий учитывает необходимость

*обеспечения безопасности проводки, избегания удлинения пути судна от излишних по величине корректировок курса, предотвращения существенных возмущений оптимального режима работы системы «АР-судно».*

Математически этот критерий записывается:

$$I = \sigma_r^2 + \lambda_U \sigma_U^2 = \min, \quad (8.5)$$

где  $\sigma_r^2$ ,  $\sigma_U^2$  – дисперсия соответственно отклонений от линии пути и изменения величины  $U$  корректировки  $K_3$ .

Помимо критерия (8.5), качество управления боковым смещением определяется и уровнем статической погрешности. В этом отношении обычно выдвигается **требование астатизма** системы.

**Особенность использования информации GPS** для вождения по отрезку пути. Величину бокового отклонения  $r$  при автоматической проводке судна по маршруту обычно измеряют с помощью приемоиндикатора GPS или DGPS. Кроме координат места, они предоставляют значения путевого угла и путевой скорости судна. Частота обновления информации у судовых приемоиндикаторов лежит в диапазоне 1–10 Гц. Высокочастотная составляющая погрешности этих приемоиндикаторов незначительна, т.е. их информация не нуждается в дополнительном сглаживании. Кроме того, эти позиционные датчики позволяют установить угол сноса ( $\gamma = ПУ - K$ ) и использовать его значение как  $U_{И}$ .

Коэффициент пропорциональной  $r$  компоненты управления в общем случае зависит от допустимого отклонения ( $r_{\text{доп}}$ ) от отрезка маршрута и может быть представлен в виде  $a_1 = \hat{a}_1 / r_{\text{доп}}$ , где  $\hat{a}_1$  – нормированный коэффициент. Если задавать курс  $K_3$  авторулевому с точностью до градуса, то поправку к  $K_M$  по информации GPS можно получать по формуле

$$U = \text{ROUND} \left( \frac{\hat{a}_1}{r_{\text{доп}}} r + \gamma \right). \quad (8.6)$$

**Выполнение поворотов.** Основным условием для обеспечения точного выхода судна на новый отрезок пути является определение расстояния  $s_\Delta$  до активной путевой точки, на котором надо начать поворот. В зависимости от заданного радиуса  $R_3$  и угла поворота  $\Delta_K = K_{MN} - K_{MA}$  (где  $K_{MA}$ ,  $K_{MN}$  – курсы вдоль активного и следующего за ним отрезка маршрута) значение  $s_\Delta$  и отрезка  $b_\Delta = ZB$  от WP до точки  $B$  выхода на новый курс можно рассчитать, по упрощенным формулам, поясняемым рис. 8.4:

$$s_\Delta = (R_3 + k_{R_3} L) \cdot \text{tg} \frac{\Delta_K}{2}, \quad b_\Delta = R_3 \text{tg} \frac{\Delta_K}{2}. \quad (8.7)$$

На рис. 8.4:  $Z$  – путевая точка (WP);  $A$  – точка начала поворота (WOP);  $L$  – длина судна;  $k_{R_3}$  – коэффициент, соответствующий конкретному судну (обычно лежит в диапазоне от 0.7 до 1.7, в среднем его считают равным единице).

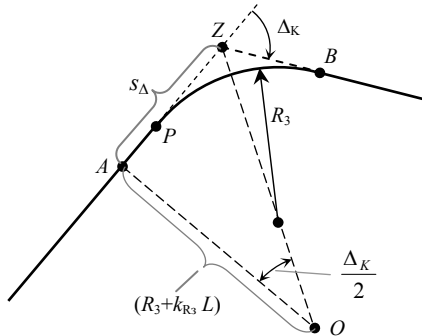


Рис. 8.4. К расчету  $s_{\Delta}$

Таким образом, траектория поворота упрощенно представляется совокупностью участка задержки поворота  $AP$  и дугой окружности  $PB$ . Длину траектории поворота можно найти по формуле:

$$l_{\Delta} = k_{R_3}L \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta_K}{2} + R_3 \Delta_K. \quad (8.8)$$

Точнее  $s_{\Delta}$ ,  $b_{\Delta}$ ,  $l_{\Delta}$  можно рассчитать по эталонной модели САУ<sub>К</sub> (см. параграф 7.7).

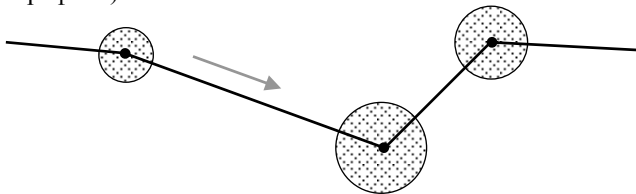


Рис. 8.5. Маршрут с зонами эволюционного движения

Маршрут перехода в ряде случаев представляют как ломаную линию с круговыми областями радиусом  $s_{\Delta} = f(R_3, \Delta_K)$  около путевых точек (рис. 8.5). Эти области, на границе которых начинается поворот, называют *зонами эволюционного движения*. Если они перекрываются, то это значит, что судно не успеет завершить поворот, как надо начать уже следующее изменение курса.

При движении по активному отрезку маршрута в СВМ непрерывно контролируется расстояние от места судна до активной WP. Когда оно станет равным  $s_{\Delta}$ , авторулевому дается команда выполнить поворот требуемым образом.

**Контроль прохождения маршрута.** СВМ ведет непрерывный контроль проводки судна по маршруту. Она предоставляет вахтенному помощнику наименование маршрута и данные, характеризующие его прохождение. Это – боковое смещение от линии пути (ХТЕ), расстояние (DTG), пеленг (BRN) и расчетное время (TTG) движения до активной путевой точки, ожидаемое время прибытия в нее (ETA). Индицируются также курсы активного и следующего за ним отрезка маршрута.

СВМ предупреждает об отклонениях от маршрута, выходящих за заданный предел, а также о подходе к точке поворота, чтобы судоводитель мог заблаговременно подготовиться к маневрированию.

При неполадках СВМ подает тревожный сигнал. Некоторые СВМ при невозможности вождения по маршруту автоматически переключаются в режим управления курсом. Если такое нарушение возникает при плавании по отрезку маршрута, СВМ переходит к стабилизации курса  $K_M$ . Если же оно происходит во время осуществления поворота, то его выполнение доводится до конца, после чего система переводится в режим стабилизации курса, соответствующего направлению нового отрезка маршрута.

#### 8.4.2. Режим вождения «от WP к WP»

Режим автопроводки по маршруту «от WP к WP» по существу сводится к режиму «Way point steering», последовательно применяемому после каждого поворота на новый отрезок маршрута [43]. Поэтому рассмотрим вначале алгоритм вождения к введенной одной путевой точке  $Z$  (рис. 8.6), начиная от момента включения этого режима в точке  $A$ . Допустим, судно следовало курсом  $K_0$  и была выбрана функция «с заданной угловой скоростью» ( $\omega_3$ ) для поворота на курс к точке  $Z$ . С момента включения **режима «Way point steering»** СВМ через малый интервал времени  $\Delta_t$  ( $0,1 \div 1,0$  с) начинает рассчитывать пеленг  $P_J$  на точку  $Z$ , а также значения  $K_{3,J}$  задающей изменение курса функции согласно алгоритму:

$$\begin{aligned} \text{IF } |P_J - K_J| > \delta \text{ THEN } K_{3,J} &= K_{3,J-1} + \omega_3 \Delta_t \\ \text{ELSE } K_{3,J} &= P_J - \gamma. \end{aligned} \quad (8.9)$$

Здесь  $\delta$  – малая величина;  $K_J$  – значение текущего курса.

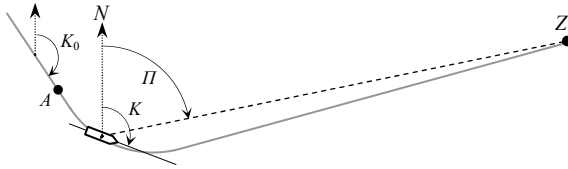


Рис. 8.6. Поворот на курс к точке Z

Регулятор AP вырабатывает перекладки руля для обеспечения равенства  $K_J$  и  $K_{3,J}$ . Концом поворота считается момент, когда в первый раз условие  $|\Pi_J - K_J| > \delta$  не выполняется. После этого по алгоритму (8.9) находятся значения  $K_{3,J}$  для движения по направлению к точке Z. Значения пеленга на точку Z в этом случае исправляются поправкой на угол сноса  $\gamma$ .

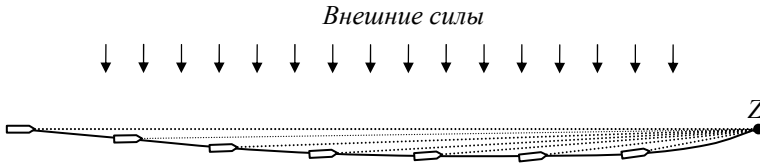


Рис. 8.7. Влияние сноса на траекторию движения судна курсом к точке Z

При работе СВМ в **режиме вождения «от WP к WP»** повороты при переключении на следующую путевую точку начинают выполняться на границе зоны эволюционного движения (см. рис. 8.5). Если судно сносится ветром и течением, то при удержании курса на путевую точку траектория судна отклоняется от направления на эту точку, которое было в момент окончания поворота на курс к ней (рис. 8.7). Для уменьшения такого отклонения следует учесть угол сноса. Его значение может быть найдено интегрированием  $\gamma = a_{и} \int (\Pi - K) dt$ , либо получено по данным приемоиндикатора GPS. С учетом угла сноса на заданную путевую точку направляется не ДП судна, а вектор скорости его движения.



## 8.5. Оперативное изменение маршрута для расхождения с судами и препятствиями

В настоящее время разрабатываются многоцелевые системы для *путепрокладки, оценки ситуаций и вождения судна*. В них судном управляет навигационно-информационная система (НИС). В режиме управления она должна позволять оперативно и легко намечать на электронной карте (ЭК) изменение маршрута движения для уклонения от столкновения с препятствием или судном, просто оценивать по изображению на ЭК эффективность намечаемых мер, активировать их с модуля ЭК, контролировать процесс движения судна по измененному маршруту. Охарактеризуем два предложенных А.Л.Вагущенко метода оперативного изменения маршрута для расхождения с судами: *параллельного смещения активного отрезка пути, вставки поутевой точки*.

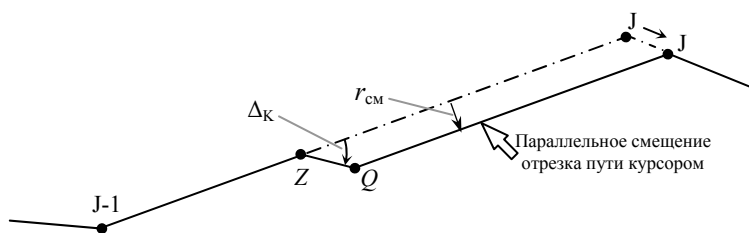


Рис. 8.8. Изменение маршрута для расхождения с судном маневром смещения на параллельную линию пути

**Параллельное смещение отрезка пути.** Во многих ситуациях для предупреждения чрезмерного сближения с другими судами целесообразным является смещение на параллельную линию пути (СПЛП). Этот стандартный маневр может использоваться с углом отклонения от курса следования вплоть до  $150^{\circ}$ . Чтобы разойтись таким способом, задается угол уклонения от курса ( $\Delta_K$ ) и смещение ( $r_{см}$ ) оставшейся части активного отрезка пути без изменения его направления (рис. 8.8). В результате в маршрут вводятся две новые поутевые точки ( $Z$ ,  $Q$ ) и изменяется положение точки поворота  $J$ . Точкой  $Z$  обычно считается место на расстоянии  $s_{\Delta}$  впереди текущего положения ЦМ судна (см. рис. 8.4). Если начало маневра намечается с задержкой ( $t_{зд}$ ) по времени, то в качестве  $Z$

принимается будущее положение ЦМ судна на расстоянии  $(s_{\Delta} + V \cdot t_{зд})$  от его текущего места. Положение путевых точек  $Q$ ,  $J$  находится в зависимости от  $\Delta_K$ ,  $r_{см}$ , а также курсов вдоль активного и следующего за ним отрезков маршрута.

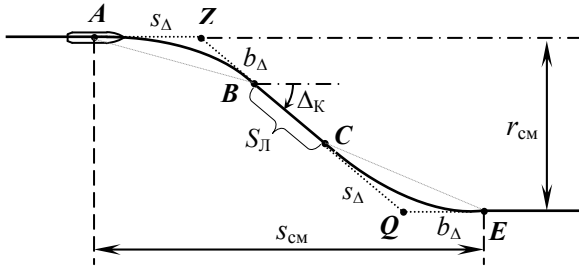


Рис. 8.9. Маневр смещения на параллельную линию пути

Траектория ЦМ судна при маневре СПЛП показана на рис. 8.9. Этот маневр характеризуется: углом изменения курса  $\Delta_K$ , заданным параметром поворотов (допустим  $R_3$ ), временем поворота  $\tau_{нов}$  на угол  $\Delta_K$  и проходимым за это время расстоянием  $l_{\Delta}$ , дистанциями  $s_{\Delta}$ ,  $b_{\Delta}$  от путевой точки  $Z$  до точек начала  $A$  и конца  $B$  поворота, длиной  $S_{\Delta}$  прямолинейного отрезка, прямым  $s_{см}$  и боковым  $r_{см}$  смещением конечной точки  $E$  относительно начальной  $A$ , продолжительностью  $\tau_m$  маневра и моментом  $t_m$  его начала.

Параметры маневра  $s_{\Delta}$ ,  $b_{\Delta}$ ,  $l_{\Delta}$  находятся в зависимости от  $\Delta_K$ ,  $R_3$  по упрощенным формулам (8.7, 8.8) либо (более точно) моделированием поворота с помощью эталонной модели САУ<sub>к</sub>. Время  $\tau_{нов}$  поворота на угол  $\Delta_K$  и продолжительность маневра СПЛП вычисляются по формулам:

$$\tau_{нов} = l_{\Delta} / V, \quad \tau_m = 2\tau_{нов} + S_{\Delta} / V. \quad (8.10)$$

Если при малых значениях  $r_{см}$  зоны эволюционного движения в точках  $Z$  и  $Q$  перекрываются, то для таких  $r_{см}$  маневр СПЛП с заданными  $\Delta_K$ ,  $R_3$  не существует.

Для оперативного изменения маршрута рассматриваемым образом в НИС необходимо ввести функцию (назовем ее СПЛП) и программу ее реализации. Эта программа должна позволять назначать радиус  $R_3$

и угол  $\Delta_K$  поворота, смещение  $r_{\text{см}}$  отрезка пути. Целесообразно предусмотреть и ввод времени задержки  $t_{\text{зд}}$  маневра.

Смещать активный отрезок маршрута удобно «перетаскиванием» его курсором при нажатой левой клавише манипулятора. При выполнении этой операции необходимо вычислять значения параметров маневра СПЛП (в области его существования), соответствующие смещению  $r_{\text{см}}$  отрезка пути. На экране при этом следует отображать: прогноз пути нашего судна и рассчитанное на конец маневра его место с вектором скорости и областью безопасности; суда-цели, их путь от текущего места до прогнозируемого на конец маневра, вектора истинного и относительного движения.

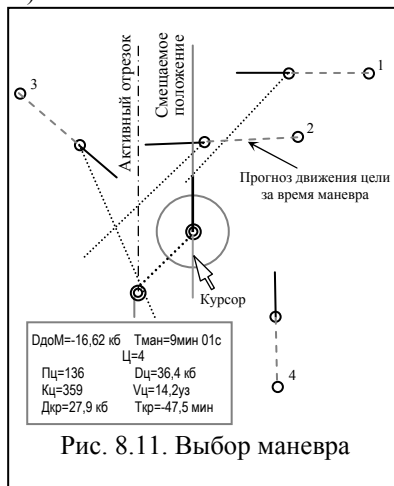
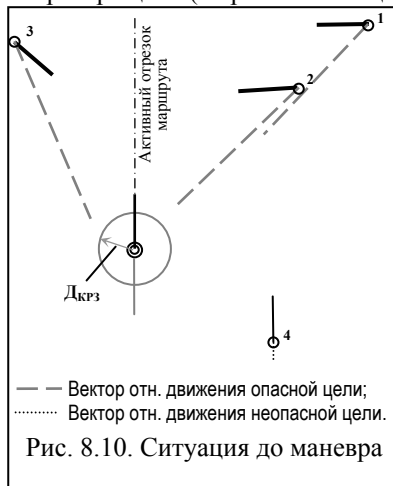
На рис. 8.10-8.12 приведен пример отображения данных при выборе маневра СПЛП для расхождения с 4-мя целями. **Исходная ситуация** представлена на рис. 8.10. Время векторов истинного движения взято равным 6 мин, векторов относительного движения – 12 минут, время задержки маневра – 0 мин. Допустимая дистанция кратчайшего сближения ( $D_{\text{крз}}$ ) установлена 10 кб.

**При выборе маневра** (рис. 8.11) прогноз траектории перехода нашего судна на смещаемый курсором активный отрезок маршрута показан точечной линией. Около прогнозируемого на конец маневра СПЛП места нашего судна отображен сплошной линией вектор его скорости и зона безопасности с радиусом  $D_{\text{крз}}$ .

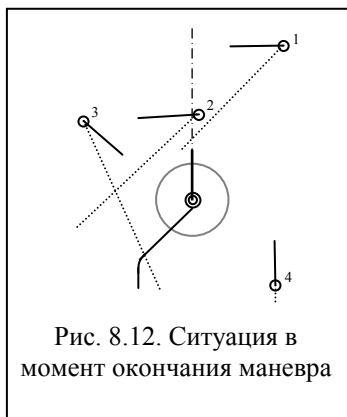
Действительное положение цели на рис. 8.11 обозначено номером. У прогнозируемого на время окончания маневра места цели показаны вектора истинного и относительного движения. Если на момент конца маневра цель неопасна, то вектор истинного движения будет тонким сплошным, а вектор относительного движения – тонкой точечной линией. Если же цель опасна, вектор истинного движения будет жирной сплошной линией, а вектор относительного движения – жирной штриховой линией. Если в интервале от начала до конца маневра СПЛП не будет чрезмерного сближения с целью, то ее путь от действительного до прогнозируемого на конец маневра ее положения показывается тонкой штриховой линией. Если опасное сближение в названном интервале времени будет иметь место, то этот путь отображается линией «штрих - две точки».

Приведенный метод отображения данных выбран для пояснений в этой книге. На экране монитора НИС для улучшения понимания обстановки информация выделяется более эффективными способами: разными цветами, миганием и т.д.

В области цифровых данных при «перетягивании» курсором отрезка пути отображается  $r_{см}$  и время маневра  $\tau_m$  (на рис. 8.11 – **ДдоМ** и **Тман**). Здесь можно показать и параметры интересующей оператора цели (на рис. 8.11 – цели 4).



**Выбор маневра расхождения** заключается в нахождении (при смещении курсором вправо и влево отрезка пути относительно его начального положения) наименьшего  $r_{см}$ , при котором маневр СПЛП



не противоречит МППСС и не приводит к опасности чрезмерного сближения с другими судами в процессе выполнения смещения и в момент его завершения. В рассматриваемом примере такое смещение ( $r_{см} = 16,62$  кб) приведено на рис. 8.11.

Выбрав  $r_{см}$ , судоводитель в зависимости от ситуации определяет точку начала маневра. При приходе судна в нее дает команду начать движение по измененному маршруту.

По этой команде в НИС в запланированный маршрут вводятся путевые точки  $Z$ ,  $Q$ ,  $J$ , соответствующие выбранному значению  $r_{см}$ . НИС, обеспечивая движение по измененному маршруту, выполнит задачу

расхождения. Ситуация сближения судов в момент выхода на смещенный отрезок пути показана на рис. 8.12.

**Вставка путевой точки.** Этому способу выбора изменения траектории для расхождения с судами соответствует вставка двух путевых точек  $Z$  и  $Q$  (рис. 8.13). Точка  $Q$  появляется при нажатии клавиши манипулятора в режиме выбора маневра расхождения этим способом. Ее место совпадает с положением курсора. При нажатой клавише точка  $Q$  может *перетягиваться* курсором по полю ЭК. Точка  $Z$  появляется при отображении  $Q$ . Место  $Z$  определяется положением нашего судна, точки  $Q$  и назначенным временем задержки маневра. При любом выбираемом курсором положении точки  $Q$  можно просматривать (в области существования маневра), какой будет ситуация сближения судов в момент выхода нашего судна на отрезок  $QJ$  и какой будет величина потери ходового времени.

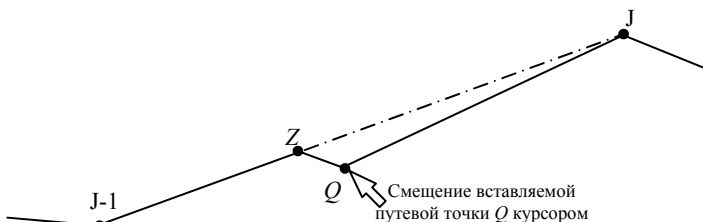


Рис. 8.13. Изменение маршрута для расхождения с судном вставкой путевой точки  $Q$

Программно устанавливается, что при *перетягивании* точки  $Q$  с нажатой правой клавишей манипулятора первый поворот при маневре расхождения (на рис. 8.14,а – поворот на угол  $\Delta_{K1}$ ) будет вправо, а при *перетягивании* точки  $Q$  с нажатой левой клавишей – влево. Это позволяет задавать угол уклонения от цели вправо и влево от нуля до  $360^\circ$  (рис. 8.14,б). Второй поворот (на угол  $\Delta_{K2}$ , рис. 8.14,а) выполняется в ту сторону, в которую он меньше.

На экране в режиме **выбора маневра** прогнозируемая ситуация при перемещении курсором путевой точки  $Q$  отображается в виде, аналогичном рассмотренному при маневре СПЛП (см. рис. 8.11). Показывается прогнозируемый путь нашего судна в точку  $E$  конца маневра. В точке  $E$  отображается символ нашего судна и

направленный к WP  $J$  (см. рис. 8.13) вектор его скорости, а также зона безопасности с радиусом  $D_{крз}$ .

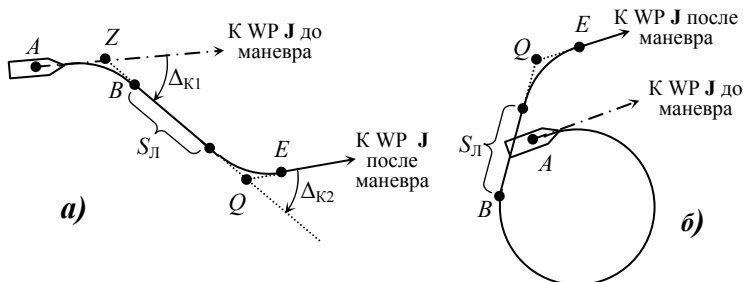


Рис. 8.14. Примеры задания путевой точки  $Q$

Для целей показывается их действительное место, от него путь к прогнозируемому на конец маневра положению, у этой точки – вектора истинного и относительного движения. Способы выделения опасных в интервале маневра целей и опасных целей после завершения его такие же, как при прогнозе маневра СПЛП.

Безопасным маневрам соответствует область положений точки  $Q$ , при которых все цели безопасны, как на этапе маневрирования, так и в конце его. В этой области судоводитель **выбирает положение  $Q$** , при котором маневр уклонения отвечает требованиям МППСС и сопровождается минимальной потерей ходового времени. После этого подается команда начала маневра. По ней в НИС вводятся соответствующие выбранному положению точки  $Q$  изменения в запланированный маршрут. НИС, обеспечивая движение по измененному маршруту, выполнит расхождение с судами.

## 9. Электронные управляющие скоростью судна системы

### 9.1. Понятие о системе управления скоростью хода

**Система автоматизированного управления скоростью судна** (САУ<sub>V</sub>) служит для выполнения операций, связанных с изменением скорости движения судна и с поддержанием ее неизменной. Современные САУ<sub>V</sub> могут быть представлены в виде совокупности интегрированной управляющей скоростью судна системы (ИУС<sub>V</sub>) и объекта управления (ОУ<sub>V</sub>).

**Объектом управления** в САУ<sub>V</sub> считается пропульсивный комплекс, включающий *главный двигатель, движитель и корпус судна*. Обратим внимание на три основные особенности этого объекта.

**Первой особенностью** является зависимость свойств ОУ<sub>V</sub> от условий работы (волнения, мелководья, загрузки, обрастания корпуса и т.д.). Отсюда следует необходимость приспособления управляющей скоростью системы к эксплуатационным условиям, чтобы качество управления было высоким.

**Вторая особенность** ОУ<sub>V</sub> состоит в его сложности. В первую очередь это касается главной движительной установки. Она представляет собой комплекс технических средств, включающих двигатель, его вспомогательные устройства, системы и механизмы, валопровод и движитель. Сложность этого комплекса уменьшает его надежность. В результате в процессе плавания всегда существует вероятность возникновения неисправности ГДУ. Учитывая повышенную опасность процесса судовождения, это обстоятельство требует при переходе к электронному управлению скоростью принятия специальных мер по обеспечению целостности САУ<sub>V</sub>.

**Третья отличительная черта** ОУ<sub>V</sub> – изменение свойств с течением времени. Под характеристикой корпуса судна как элемента ОУ<sub>V</sub> понимают его буксировочное сопротивление. В процессе эксплуатации оно изменяется в зависимости от эксплуатационных факторов, главными из которых являются: увеличение шероховатости корпуса из-за разрушения краски, коррозии, органического обрастания. Пропульсивными характеристиками гребного винта являются зависимости его КПД, коэффициентов упора и момента в свободной воде от относительной поступи. В условиях эксплуатации они также непостоянны из-за изменения состояния лопастей гребных

винтов, обусловленного коррозией, кавитационной эрозией, обрастанием, отложением солей и т.д. Двигатель внутреннего сгорания как часть ОУ<sub>V</sub> может быть представлен зависимостью частоты вращения от эффективной мощности или другими характеристиками. С течением времени они также изменяются.

### **Интегрированная управляющая скоростью судна система.**

Судовая энергетическая установка является наиболее ответственным и сложным комплексом, обеспечивающим движение судна и функционирование всех судовых систем и механизмов. Однако условия работы в машинном отделении неблагоприятны для членов экипажа (шум, вибрация, повышенные температура и влажность и т.д.). Кроме того, косвенное (через механика) управление этой установкой с мостика при выполнении маневров скоростью уступает по быстрдействию непосредственному прямому управлению ей. В экстремальных ситуациях это может стать причиной аварии. Этим объясняется переход на флоте к безвахтенному (автоматизированному) обслуживанию систем и механизмов ГДУ и к непосредственному с мостика управлению ей. Автоматизация процессов управления скоростью движения определяется также необходимостью повышения эффективности эксплуатации судов.

Интегрированная управляющая скоростью система обобщенно рассматривается как совокупность трех систем: *дистанционного автоматизированного управления главным двигателем (СДАУ<sub>ГД</sub>)*, *обеспечения целостности (СОЦ) САУ<sub>V</sub>*, *адаптации к условиям эксплуатации (СА)*.

СДАУ<sub>ГД</sub> предназначена для выполнения задаваемых с мостика команд пуска двигателя, изменения режимов его работы, остановки, а также для поддержания назначенных режимов работы.

**Обеспечение целостности систем** (см. параграф 1.10) включает операции мониторинга работы, обнаружения неполадок, аварийно-предупредительной сигнализации, диагностики неисправностей, защиты от поломок, восстановления целостности. Чаще всего СОЦ представляется в ИУС<sub>V</sub> только теми или иными своими подсистемами. Распространенным вариантом, например, является применение подсистем мониторинга, аварийно-предупредительной сигнализации и защиты. Для того чтобы обеспечение целостности системы управления скоростью было эффективным, обычно требуется, чтобы СОЦ была независима от СДАУ<sub>ГД</sub>.

**Система адаптации** является распределенным комплексом, предназначенным для оптимизации рабочих процессов главного



двигателя и его вспомогательных систем по вектору подходящих критериев.

**Обобщенная блок-схема САУ<sub>v</sub> судна с ВФШ** показана на рис. 9.1, где  $Z$  – задание (программа), которое должна выполнять система;  $n$  и  $P$  – частота вращения и полезный упор гребного винта;  $V$  – скорость хода;  $U(t)$  – вектор управления главной движительной установкой;  $N(t)$  – вектор воздействий, связанных с обеспечением целостности САУ<sub>v</sub>;  $Y(t)$  – вектор параметров состояния ГДУ. С позиции управления движением судна главными выходными величинами реверсивной ГДУ с ВФШ являются направление и частота вращения гребного винта; для неревверсивной установки с ВРШ – частота вращения и шаг гребного винта. Основными управляющими воздействиями на пропульсивный комплекс служат: изменение количества подводимого топлива (дизельные установки); изменение количества подводимого пара (паросиловые установки); изменение угла атаки лопастей гребного винта (установки с ВРШ). Применение основных управляющих воздействий сопровождается обычно изменением и ряда других параметров ГДУ.

Задание, которое должна выполнить СДАУ<sub>ГД</sub>, определяет оператор. Это может быть «запуск двигателя», «реверсирование двигателя с указанием новой частоты вращения», «переход на новую частоту вращения» и т.д.

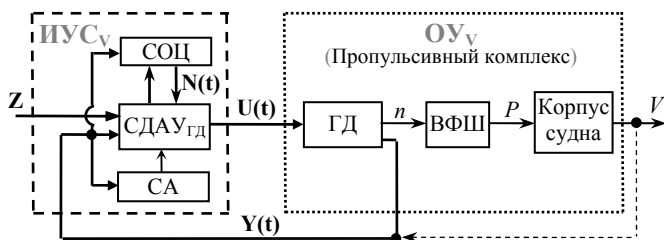


Рис. 9.1. Обобщенная блок-схема САУ<sub>v</sub>

Параметры управляющего вектора  $U(t)$  находятся по  $Z$  и вектору  $Y(t)$  состояния ГДУ. Состав координат вектора  $Y(t)$  зависит от задания и от функций, выполняемых СОЦ. Он может включать в себя частоту вращения гребного вала, скорость изменения этой частоты, давление надвучного воздуха, температуры выхлопных газов и деталей цилиндропоршневой группы, а также другие параметры ГДУ, значения которых необходимы при расчете управления процессами главного двигателя и его систем.

Традиционно САУ<sub>V</sub> *разомкнуты* по скорости судна. Для обеспечения назначенного режима хода такие системы поддерживают определенные значения кинематических параметров двигателя, при которых скорость судна примерно равняется намеченной. У ВРШ этими параметрами являются частота вращения  $n$  и угол поворота лопастей  $\theta$  гребного винта, а у ВФШ – только частота  $n$ . В последние годы появились в эксплуатации и замкнутые по  $V$  системы. Они стабилизируют назначаемую скорость  $V_3$  относительно грунта, формируя управляющие воздействия в зависимости от отклонения  $V$  от  $V_3$ . Действительная скорость судна  $V$  измеряется обычно прямоиндикатором GPS.

Чтобы быть способной выполнять свои задачи, ИУС<sub>V</sub> имеет необходимые датчики информации о параметрах работы ГДУ, один или несколько постов управления, исполнительные средства, аварийную сигнализацию, соответствующее программное обеспечение и т.д. Согласно правилам и требованиям Классификационных обществ ИУС<sub>V</sub> должна включать в себя, по крайней мере, три части:

- систему дистанционного автоматизированного управления главным двигателем (СДАУ<sub>ГД</sub>);
- систему телеграфов;
- систему обеспечения безопасности главного двигателя.

*Система обеспечения безопасности* должна быть независимой от *управляющей двигателем системы*, т.е. иметь свою сеть, контроллеры, датчики и другие элементы.

Специальные процедуры (программы) пуска, управления режимами и остановки главного двигателя, а также компьютерное управление им и его системами позволяют с помощью ИУС<sub>V</sub> значительно повысить эффективность работы ГДУ, минимизировать расход топлива, уменьшить механические и термические нагрузки, износ оборудования и т.д. Например, применение только электронной системы топливоподачи оптимизирует характеристики главных двигателей на различных эксплуатационных режимах. Кроме того, в этом случае снижается масса и упрощается конструкция ГД за счет отказа от громоздких и достаточно сложных механических приводов систем топливоподачи, газораспределения и реверса; повышается маневренность судна благодаря снижению минимальной частоты вращения и улучшению пуско-реверсионных характеристик, включая подачу контровоздуха для уменьшения выбега судна; уменьшается выброс окислов азота вследствие улучшения топливоподачи и

некоторого ухудшения экономичности при плавании в ограниченных акваториях.

Если отвлечься от обеспечения целостности САУ<sub>V</sub> и ее адаптации, то ИУС<sub>V</sub> представляется своей основной системой – СДАУ<sub>ГД</sub>. Эта система состоит из комплекса технических средств и программного обеспечения. Упрощенно СДАУ<sub>ГД</sub> можно представить схемой (рис. 9.2), включающей: пульт, с которого оператор может давать команды системе; блок программ для формирования управляющих сигналов  $U_c(t)$ , обеспечивающих выполнение этих команд требуемым образом; исполнительный модуль, преобразующий сигналы управления в воздействия на главный двигатель. Исполнительный модуль (ИМ) включает в себя усилители, преобразователи и исполнительные устройства. Такими устройствами могут быть гидравлические, электрические и пневматические сервомоторы и сервомеханизмы.

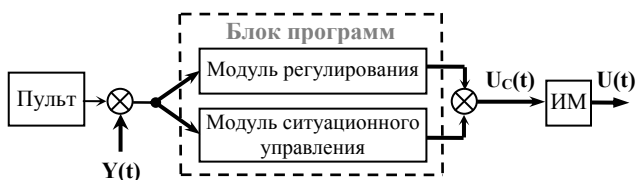


Рис. 9.2. Обобщенная блок-схема СДАУ<sub>ГД</sub>

Ввиду того, что для оперирования главным двигателем требуется применять два вида управления (ситуационное и регулирование), в блоке программ конструктивно либо условно выделяются два соответствующих модуля. К задачам ситуационного управления относятся запуск и остановка двигателя, его реверс и ряд других. К задачам регулирования – стабилизация частоты вращения гребного вала, регулирование подачи топлива и т.д.

## 9.2. Требования к системе дистанционного управления главным двигателем

Основной частью ИУС<sub>V</sub>, непосредственно относящейся к управлению движением судна, является система дистанционного автоматизированного управления главными двигателями – СДАУ<sub>ГД</sub>. Предъявляемые к ней требования для наиболее распространенного вида ГДУ, когда двигателем является дизель, работающий на винт

фиксированного шага непосредственно или через реверсивную передачу, характеризуются ниже.

СДАУ<sub>ГД</sub> должна содержать совокупность взаимодействующих устройств, необходимых и достаточных для автоматического выполнения команд, задаваемых с дистанции оператором. Такое управление считается эффективным при условии полного освобождения судоводителя от обслуживания этой системы.

СДАУ<sub>ГД</sub> и ее составные части должны надежно работать в морских условиях. Срок службы и ресурс системы должны быть не менее срока службы и ресурса дизеля при ежегодной наработке СДАУ<sub>ГД</sub> без наладки и регулировки не менее 5000 ч.

#### **Требования к системе управления реверсивным двигателем.**

Система должна обеспечивать пуск и остановку реверсивного дизеля, изменение частоты вращения коленчатого вала и направления вращения гребного вала при помощи одного органа управления, устанавливаемого в требуемое положение без ограничения скорости перемещения и без выдержек в промежуточных положениях. Она должна отрабатывать команды по управлению дизелями в соответствии со специальными программами, учитывающими особенности функционирования ГДУ.

Статическая погрешность управления частотой вращения (включая регулятор скорости и собственно дизель) не должна превышать 3% номинальной частоты вращения.

Предписано, чтобы действие блокировок СДАУ<sub>ГД</sub> не зависело от блокировок других систем управления. По согласованию изготовителя и судовладельца допускается применять объединенные блокировки.

Последняя команда оператора должна выполняться системой независимо от порядка подачи предыдущих команд.

Требуется, чтобы при отказе питания СДАУ<sub>ГД</sub> на период перехода на аварийное управление сохранялся заданный режим работы дизеля. Длительность сохранения и допускаемые отклонения режима устанавливаются по согласованию между изготовителем системы и судовладельцем, при этом не допускаются самопроизвольные пуск и увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя, включение или изменение направления вращения гребного вала.

Необходимо обеспечивать возможность управления дизелем при отключенной СДАУ<sub>ГД</sub> с помощью других систем управления: дистанционной в центральном посту управления (ЦПУ) или местной, с местного поста управления (МПУ). В любой момент времени должна быть возможность передачи управления с поста ходового мостика на ЦПУ или МПУ и обратно, независимо от заданного режима работы

дизеля. Переключатели постов должны располагаться соответственно на ЦПУ и МПУ. Высший приоритет управления имеет МПУ. Время передачи управления с одного поста на другой не должно превышать 10 с. Режим работы двигателя при переключении постов управления должен сохраняться (положение органов управления постов должно быть согласованным). В системе следует иметь блокировку, исключающую одновременное управление с разных постов, кроме дублированных (например, в рубке и на крыльях мостика).

Для назначения режимов хода в СДАУ<sub>ГД</sub> следует использовать набор команд машинного телеграфа. Также необходимо иметь возможность плавного (бесступенчатого) задания частоты вращения коленчатого вала дизеля.

Должна быть возможность остановки двигателя с помощью независимых от СДАУ<sub>ГД</sub> схем аварийной и/или экстренной остановки.

Так как условия судовождения оказывают влияние на требуемое быстродействие в управлении скоростью хода (например, при возникновении опасности для судна может понадобиться ускорение процессов изменения скорости), а маневрирование с большим быстродействием неблагоприятно для главного двигателя, то СДАУ<sub>ГД</sub> должна иметь режимы реагирования на команды судоводителя с разной скоростью.

Под влиянием внешних условий на главный двигатель передаются значительные колебания нагрузки. Они приводят к соответствующим отклонениям частоты вращения винта, а, следовательно, и скорости судна. В результате возрастают погрешности при прогнозировании движения судна. Частота вращения гребного винта при неизменном положении задающего скорость органа должна поддерживаться постоянной, если только это не приводит к недопустимой перегрузке двигателя и не сопровождается резким возрастанием расхода топлива, как это может наблюдаться на мелководе, при движении в условиях волнения, при плавании во льдах.

СДАУ<sub>ГД</sub> должна выдавать тревожный сигнал при работе в запретной зоне частоты вращения и обеспечивать ускоренное автоматическое прохождение этих зон, независимо от заданного режима работы.

Для повышения безопасности управления скоростью хода целесообразно дополнять СДАУ<sub>ГД</sub> средствами обеспечения целостности САУ<sub>У</sub>. К ним относятся системы: мониторинга работы ГДУ, обнаружения неполадок, аварийно предупредительной сигнализации, диагностики состояния и неполадок, защиты двигателя и восстановления работоспособности. СДАУ<sub>ГД</sub> должна обеспечивать:

возможность проверки исправности своей работы (объем и условия проверки определяются судовладельцем); возможность приема предусмотренных алгоритмом управления контрольных воздействий от внешних систем и выдачи необходимых сигналов о работе и неисправностях; возможность восстановления работоспособности в судовых условиях. Система обеспечения целостности комплекса управления скоростью судна необязательно должна быть частью СДАУ<sub>ГД</sub>, но требуется, чтобы эти системы были независимы.

Мониторинг работы ГДУ и системы управления ей позволяет в наглядном виде представить текущие значения основных параметров, а также графические характеристики работы главного двигателя и СДАУ<sub>ГД</sub>. Это помогает специалистам оперативно определять состояние двигателя, его систем и вспомогательных механизмов, а также быстро находить причины неполадок в работе.

Целесообразным также считается автоматическое ведение документации о функционировании ГДУ. Для этой цели должны циклически измеряться и регистрироваться наиболее важные параметры, характеризующие рабочий процесс ГДУ, ее состояние, подаваемые на нее команды и т.д. СДАУ<sub>ГД</sub> должна обеспечивать возможность подсоединения регистратора маневров к приводу задающего устройства от рукоятки машинного телеграфа.

**Требования к СДАУ<sub>ГД</sub> нереверсивного двигателя** в основном совпадают с перечисленными выше требованиями к реверсивным ГД.

### 9.3. Назначение и классификация систем, управляющих скоростью судна

**Назначение.** ИУС<sub>V</sub> предназначены для контроля и управления рабочими процессами ГДУ, выполнения мероприятий для сохранения ее функциональности и предоставления судоводителю возможности непосредственного управления скоростью судна из рулевой рубки. Степень автоматизации процессов управления ГДУ должна быть достаточной для того, чтобы судоводитель при задании режимов хода действовал привычным для себя образом, перемещая рукоятку управления скоростью судна в любое положение с любой скоростью без опасности аварии ГДУ. Вахтенный помощник должен быть полностью освобожден от обслуживания управляющей скоростью системы. Поэтому необходимо, чтобы главный двигатель был автоматизирован. Управлять его системами и внутренними процессами должны автоматические устройства. Их задачей является

реализация всех команд, поступающих от ИУС<sub>V</sub>. В современных ГДУ многие операции выполняются с помощью микропроцессорных средств. Они используются для оптимизации подачи топлива, воздуха, воды, смазочных материалов и решения других задач.

Интегрированные управляющие скоростью судна системы имеют обычно несколько уровней управления. Независимо от числа таких уровней, они могут быть сгруппированы и разделены на два основных: верхний и нижний.

**Верхний уровень** называется командным или операторским. Его устройства располагаются на ходовом мостике и в ЦПУ. На этом уровне автоматизируются функции централизации контроля основных параметров ГДУ, диагностирования и прогнозирования состояния оборудования, интегральной оценки работы энергетической установки и оперативного управления главными двигателями путем воздействия на устройства нижнего уровня.

**Нижний уровень** – это уровень автоматизации управляемого оператором комплекса технических средств. На нем осуществляются функции управления, контроля состояния и аварийно-предупредительной сигнализации о неисправностях механического и электрического оборудования машинного отделения. К задачам нижнего уровня относятся:

- мониторинг и контроль состояния, предупреждение о требующих внимания ситуациях и сигнализация о неисправностях ГДУ;
- формирование управляющих сигналов для защиты главного двигателя при неисправностях путем снижения частоты вращения или остановки;
- автоматическое управление вспомогательными системами ГД;
- управление судовой электроэнергетической установкой (генераторами и электросетями);
- регистрация команд при маневрировании;
- автоматическое восстановление режима работы ГДУ после обесточивания главного распределительного щита;
- выдача информации о значениях контролируемых величин по требованию оператора и т.д.

**Классификация.** ИУС<sub>V</sub> классифицируют в зависимости от используемой элементной базы, вида ГДУ и ее особенностей: типа двигателей и движителей, вида передачи энергии от двигателя к движителю, количества двигателей и числа движителей, степени автоматизации и других факторов.

**В зависимости от типа энергетической установки** различают ИУС<sub>V</sub> для дизельных, паротурбинных, газотурбинных, дизель-электрических, турбоэлектрических и других установок. **По виду движителя** ИУС<sub>V</sub> бывают для двигателей с ВФШ, с ВРШ, либо с другими типами движителей. **В зависимости от числа двигателей и движителей**, входящих в ГДУ, выделяют ИУС<sub>V</sub> для одномашинных и многомашинных ГДУ, для одновинтовых и многовинтовых установок. **В зависимости от частоты вращения двигателя** ИУС<sub>V</sub> классифицируют на системы для малооборотных, среднеоборотных, высокооборотных двигателей. **В зависимости от направлений вращения двигателя** различают системы ИУС<sub>V</sub> для реверсивных и неререверсивных двигателей.

**По виду элементной базы** ИУС<sub>V</sub> бывают механическими, гидравлическими, пневматическими, электрическими, электронными и комбинированными. Наиболее совершенными являются компьютеризованные комбинированные системы. Автоматизация рабочих процессов ГДУ всех уровней на основе компьютерной техники позволяет упростить построение ИУС<sub>V</sub> создавать такие системы пригодными к работе с различными движительными установками, значительно повысить эффективность пропульсивного комплекса. Из нашедших широкое применение на судах компьютеризованных ИУС<sub>V</sub> можно назвать системы: «AutoChief 4», «AutoChief 7» и «AutoChief C20» фирмы Kongsberg Maritime (Норвегия), «Geamar 120 ISL» фирмы ATLAS Marine Electronics (Германия), «Mega-Guard» фирмы Praxis-automation, «D-MaC» фирмы Prime Mover Control Inc. и ряд других [14].

#### 9.4. Структура одной из управляющих скоростью судна систем

В основу современных ИУС<sub>V</sub> положены принципы распределенных интегрированных электронных систем управления, сбора и обработки информации с последовательными каналами обмена данными. Эти системы строятся на базе компьютерных программно-аппаратных средств и обладают гибкой структурой, обеспечивающей управление сложными комплексами, состоящими из большого количества различного по назначению оборудования. Важными эксплуатационными свойствами распределенных интегрированных



систем является живучесть и открытость (функциональная расширяемость).

Ниже приведены краткие сведения об одной из современных интегрированных управляющих скоростью судна систем, предназначенной для однодизельной, малооборотной, реверсивной ГДУ с прямой передачей мощности на ВФШ. В нее (рис. 9.3) входит:

- система дистанционного автоматизированного управления пуском, остановкой, режимами и реверсом главного двигателя (СДАУ<sub>ГД</sub>);
- система мониторинга и аварийно-предупредительной сигнализации;
- система защиты главного двигателя;
- модуль съема показаний датчиков.

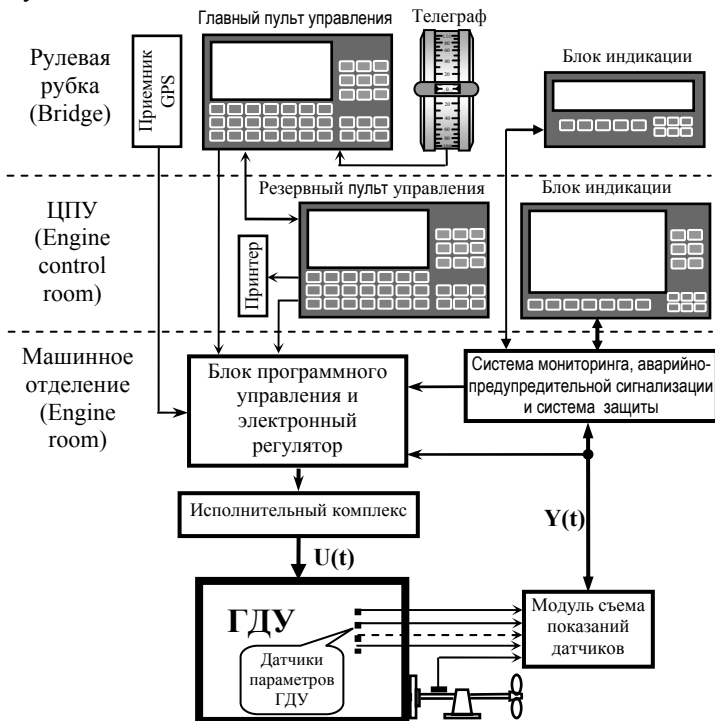


Рис. 9.3. Функциональная схема ИУС<sub>v</sub>

СДАУ<sub>ГД</sub> включает в себя главный, выносные, резервный и местный посты управления; рукоятку управления (телеграф); блок

программного управления; электронный регулятор, исполнительный комплекс. На рисунке выносные и местный пост управления этой системы не показаны. Эта система обеспечивает управление процессами запуска и остановки дизеля, а также оптимального изменения частоты вращения и реверсирования в соответствии с выбранными критериями. При исполнении команд учитывается в первую очередь необходимая скорость обработки, величина перегрузок двигателя, расход топлива.

**Блок программного управления** предназначен для формирования последовательностей управляющих сигналов, обеспечивающих запуск, остановку, реверс, изменение режимов двигателя с учетом его состояния и определенных критериев.

**Электронный регулятор** обеспечивает поддержание требуемых значений ряда параметров ГДУ. Основным из них является частота вращения гребного вала. При ее стабилизации используются данные тахометра и ПИД-закон регулирования. Если нагрузка при заданной частоте вращения вала или скорости хода чрезмерна для двигателя, то система его защиты снизит частоту вращения вала до значения верхней границы допустимого диапазона.

**Исполнительный комплекс** содержит усилители, преобразующие устройства и исполнительные механизмы, трансформирующие выработанные блоком программного управления и электронным регулятором сигналы управления в воздействия на двигатель.

**Система мониторинга и аварийно-предупредительной сигнализации** производит мониторинг работы ГДУ, накопление и анализ информации, предупреждает о появлении нежелательных тенденций в работе ГДУ, сигнализирует о нарушениях ее нормального функционирования. В процессе плавания система может представлять оператору:

- текущие значения параметров работы двигателя (частоту вращения; температуру – выхлопных газов, охлаждающей воды, масла, деталей цилиндропоршневой группы; давление в цилиндрах и т.д.);
- мнемосхемы, диаграммы, графики, отражающие процессы в ГДУ;
- кривые оперативной диагностики.

Подсистема включает два блока индикации, один из них находится на мостике, а другой – в ЦПУ. **Блок в ЦПУ** позволяет получить подробную информацию о работе ГДУ и возникающих неполадках. **Блок индикации на мостике** может быть точно таким же, как в ЦПУ, либо упрощенным. Упрощенный модуль настраивается на представление *обобщенных основных сведений о работе двигателя* и о

возникающих неполадках. Он дает судоводителю только ту информацию, которая нужна для принятия решений. Если этот блок такой же, как в ЦПУ, то можно на мостике получать те же данные о работе двигателя, что и в ЦПУ.

**Система защиты двигателя** обеспечивает выполнение необходимых блокировок, снижение частоты вращения двигателя либо его остановку для предупреждения механических и тепловых перегрузок и избежания поломки двигателя.

## 9.5. Основные функции системы

**Функциональные возможности системы.** Интегрированные управляющие скоростью судна системы выполняет многочисленные функции. Среди них можно назвать:

- пуск подготовленного к работе ГД, в случае неудачного пуска – повторные попытки с подачей светозвукового сигнала;
- автоматическая блокировка пуска при низком давлении пускового воздуха;
- прием входных сигналов от датчиков и сигнализаторов главного двигателя и его вспомогательных систем, преобразование информации в соответствии с алгоритмом управления и контроля;
- управление режимами и реверсом главного двигателя;
- независимое от компьютерного ручное управление главным двигателем с мостика, с ЦПУ и местного поста управления;
- управление дизель генераторами;
- управление техническими системами: топливной, масляной, сжатого воздуха и другими;
- быстрое прохождение зоны критической угловой скорости;
- аварийно-предупредительную сигнализацию по параметрам главных дизелей, дизель-генераторов и технических систем судна;
- аварийную остановку ГД при подаче соответствующей команды с пульта управления или от системы защиты;
- отображение на дисплее в буквенно-цифровом и графическом виде информации о состоянии и работе судовых установок;
- тестирование каналов измерений, встроенный автоконтроль работоспособности системы;
- имитация работы ГДУ с целью проверки отдельных элементов схемы программного управления и функционирования СДАУ<sub>ГД</sub> при остановленном двигателе;
- оценку выработки ресурса дизелей и многие другие операции.

Отметим ниже только основные функции ИУС<sub>V</sub>, в той или иной мере касающиеся управления судном на мостике.

**Система дистанционного автоматизированного управления** ГД перед запуском двигателя обеспечивает возможность контроля давления пускового воздуха, выбранного направления вращения вала, нагрева двигателя. Она позволяет осуществить запуск подготовленного к работе двигателя, назначать различные режимы его работы, производить реверсирование, остановку, аварийную остановку и уменьшение оборотов, избегать критических, чрезмерно больших и чрезмерно малых оборотов, уменьшать ускорение, программно увеличивать и уменьшать нагрузку, исполнять по заложенным алгоритмам задания оператора. Система может управляться с разных постов управления, например: автоматизированное управление из рулевой рубки (Bridge control), такой же режим из ЦПУ (Engine control), ручной режим управления двигателем с мостика (Bridge Stand by), управление с местного поста (Emergency control).

Выделяются несколько режимов изменения скорости хода для обеспечения возможности изменять мощность двигателя в соответствии с критериями: наибольшего быстродействия (экстренный режим), максимального быстродействия без перегрузок двигателя (нормальный маневренный режим), и с малым температурным градиентом (замедленные режимы). Последние режимы применяются для уменьшения скорости с полного морского хода до маневренного (Enter port) и увеличения скорости от маневренных значений до полного хода (Leave port). Режимы «Enter port» и «Leave port» называются также режимами программы нагрузки двигателя или режимами программ его охлаждения и разогрева.

Предусматривают также режимы для длительного движения одним ходом (At sea) и для окончания работы с ГДУ (Finish with engine). СДАУ<sub>ГД</sub> позволяет путем нажатия на ее пульте специальной кнопки (Emergency Stop) быстро остановить двигатель при нарушениях в его работе. Вручную аварийная остановка двигателя производится, когда он не может быть остановлен обычным способом. Если блок защиты выдал сигнал об остановке двигателя (Аварийный стоп) в ответственный для судна момент, когда отключать двигатель опасно, то действие блока защиты может быть задержано путем нажатия специальной кнопки (Emergency Operation) для перевода двигателя в аварийный режим работы.

Основной функцией *электронного регулятора* является стабилизация заданной частоты вращения двигателя на всех скоростных режимах его работы. Для выполнения этой задачи обычно

используется ПИД-алгоритм регулирования с непосредственным воздействием на положение органа управления подачей топлива. Может быть два режима работы этого устройства: нормальный и с пониженной чувствительностью. Во втором режиме увеличивается зона нечувствительности регулятора к отклонениям от заданной частоты вращения, чтобы уменьшить количество воздействий на орган подачи топлива и снизить его расход. Этот режим применяют при движении в условиях волнения. Дополнительно электронные регуляторы могут выполнять функции: управления смазкой цилиндров двигателя, оптимизации подачи на него топлива (VIT-функция) и ряд других. Функция регулирования угла опережения подачи топлива (VIT – variable injection timing) устанавливается для поддержания оптимального значения давления сгорания при долевых нагрузках двигателя с целью минимизации расхода топлива.

В последние годы в электронных регуляторах для судов, которые строго должны соблюдать расписание, были реализованы алгоритмы поддержания с высокой точностью как числа оборотов двигателя ( $\pm 0,1$ об/мин), так и скорости движения судна относительно грунта ( $\pm 0,1$  узл.) с минимизацией расхода топлива, вредных выбросов в атмосферу и износа двигателя. Примером реализующих эти алгоритмы устройств являются системы ESP-1000 и ESP-2000 (ESP – Electronic Speed Pilot) фирмы Stellar Marine (Канада). Они имеют режимы работы:

- *Наилучшая скорость* (Best Speed) – поддержание наибольшей допустимой скорости судна относительно грунта;
- *Назначенная скорость* (Set Speed) – обеспечение движения относительно грунта со скоростью, значение которой было введено судоводителем;
- *Автоматический режим* (Automatic mode) – вычисление (в соответствии с заданными оператором расстоянием перехода и временем на его выполнение) и стабилизация скорости судна, обеспечивающей приход в пункт назначения точно в заданное время;
- *Назначенное число оборотов* (RPM mode) – стабилизация установленной оператором частоты вращения гребного вала с автоматической балансировкой работы двигателя для уменьшения вибрации и износа деталей;
- *Ручной режим* (Manual mode) – управление двигателем при отключенной системе ESP.

Эти системы имеют блок адаптации, организующий сбор данных о параметрах функционирования ГДУ. На основе их анализа этот блок выбирает для действительных условий погоды и состояния моря

наилучший (с точки зрения расхода топлива, износа ГД и загрязнения окружающей среды) режим работы двигателя. Значения скорости судна относительно грунта, которое необходимо системе для выполнения ее задач, поступает от GPS- или DGPS-приемника. Когда нагрузка на двигатель начинает превышать допустимую, система уменьшает скорость до наибольшего безопасного для двигателя ее значения. Эти системы обеспечивают снижение расхода топлива на 4-6%. Оно возможно потому, что система использует наименьшее значение скорости для прибытия в пункт назначения точно в установленное время. Кроме того, система на переходе «приспосабливает» работу ГДУ к погодным условиям, влиянию ветра, течения, волнения, мелководья с целью уменьшения расхода топлива, вибрации, нагрузки двигателя, вредных выбросов в атмосферу.

**Система телеграфов** позволяет передавать команды об изменении скоростного режима с любого поста управления.

Большой объем операций выполняет **система мониторинга, аварийно-предупредительной сигнализации**. Она обеспечивает сбор и анализ информации, представление текущих параметров работы двигателя, сигнализирует о неполадках, выдает сообщения о ненормальностях, предварительно сортируя их по степени опасности для двигателя. По этому признаку выделяют неполадки первой, второй и третьей степени опасности.

**Неполадки I степени опасности** требуют немедленной остановки главного двигателя. На них указывает выход за допустимые пределы ряда параметров, характеризующих работу двигателя. Такими обстоятельствами могут быть: *превышение частоты вращения, низкое давления смазочного масла двигателя или распредвала, высокая температура упорного подшипника, низкое давление воды для охлаждения цилиндров и/или поршней двигателя.*

При возникновении таких неполадок подается аварийный сигнал, и система защиты автоматически останавливает двигатель.

**Неполадки II степени опасности** оказывают ограниченное воздействие на двигатель. Его эксплуатация может продолжаться при сниженной скорости судна. Признаками таких неполадок являются низкое давление (смазочного масла, охлаждающей воды главного двигателя, охлаждающего масла поршней) высокая температура (продувочного воздуха двигателя, газов на выходе цилиндров, охлаждающей воды или масла, сегментов упорного подшипника), отсутствие протока масла охлаждения поршней и ряд других. При выходе значений названных параметров за определенные границы система защиты автоматически снижает обороты двигателя.

**Неполадки III степени опасности** не имеют серьезных последствий, так что для продолжения эксплуатации судна не требуется изменения его ходового режима.

При появлении неполадки первой степени и сигнализации о ней (Shut down) блок защиты выдерживает паузу перед отсечением подачи топлива. Если необходимость остановки главного двигателя возникла в ответственный для судна момент, то при определенных признаках неисправности в течение этой паузы вахтенный помощник может перевести двигатель в аварийный режим работы, в котором он еще может работать определенное время. При выходе частоты вращения двигателя за верхнее предельное значение (overspeed) такой возможности продолжить работу главного двигателя нет, и он автоматически будет остановлен.

Соответственно, после предупреждения об автоматическом снижении частоты вращения главного двигателя (Slow down) в случае неполадки второй степени срабатывание блока защиты также происходит с задержкой, позволяющей судоводителю при необходимости отключить действия по снижению оборотов.

Пауза после предупреждения об автоматической остановке главного двигателя составляет порядка 30 с., а после сообщения о снижении его частоты вращения – порядка 120 с.

Современные системы мониторинга, аварийно-предупредительной сигнализации *производят ежесекундный опрос многочисленных датчиков рабочих параметров* главного двигателя и его систем. Значения основных рабочих параметров представляются вахтенному помощнику. Возможность просмотра всех контролируемых величин обеспечивается в ЦПУ. *Результаты предыдущих измерений запоминаются* с интервалом опроса за определенный промежуток времени, который может достигать 12 часов. Они составляют достаточный материал для анализа и прогнозирования состояния ГДУ. На основе анализа работы оборудования *процессы ГДУ характеризуются* скользящими графиками, различного вида диаграммами, а также анимационными схемами. Прогнозирование рабочих процессов дает возможность заблаговременно наметить мероприятия, чтобы избежать нежелательного состояния ГДУ. В современных системах для этой цели имеются специальные «генераторы» рекомендаций. Они по ходу работы на базе текущего прогноза *автоматически выдают советы о действиях, которые следует предпринять для обеспечения нормальной работы ГДУ.*

После обнаружения ненормальностей ряд систем контроля работы ГДУ устанавливают их причину и определяют неисправные элементы.

В современных системах для автоматической диагностики будущих состояний ГДУ, для выработки рекомендаций по обеспечению нормальной работы, для защиты от поломок и восстановления целостности используются **интеллектуальные открытые экспертные системы**. «Открытость» обеспечивает возможность дополнения базы знаний экспертной системы новыми сведениями о причинах возникающих неполадок и методах их предупреждения.

ИУС<sub>V</sub> ведут также **электронные журналы**: *контроля ГДУ, неполадок и нарушений режимов, маневренных операций*. В первом журнале периодически регистрируются наиболее важные технологические характеристики главного двигателя и вспомогательных устройств с указанием даты и времени. Журнал неполадок и нарушений режимов служит для записей ненормальных отклонений параметров с регистрацией точки измерения, величины и направления отклонения, а также времени его появления и исчезновения. Журнал маневренных операций предназначен для регистрации изменений режимов работы главного двигателя. В журнал заносятся: время, дата, вид команды, значения основных параметров состояния движительной системы. При необходимости, записанная в электронных журналах информация может быть представлена на экране монитора или распечатана на принтере.

В управляющей скоростью судна системе имеется также **функция для проверки своей работы** с имитацией работы главного двигателя и его вспомогательных систем, когда сам главный двигатель не функционирует.

**Панель управления СДАУ<sub>ГД</sub> на мостике судна**. Судоводители должны знать базовые принципы построения, функциональные возможности, назначение расположенных на мостике органов управления СДАУ<sub>ГД</sub>, типы вырабатываемых этими системами сигналов, сообщений и предупреждений. Уметь работать с этим оборудованием, объективно оценивать отображаемую информацию, реагировать должным образом на нарушения в функционировании системы. На судах используются системы дистанционного автоматизированного управления главным двигателем многих производителей. Эти образцы СДАУ<sub>ГД</sub> отличаются по функциональным возможностям и оформлением пультов управления. Поэтому для представления об операциях управления с мостика главным двигателем осветим расположенный на мостике пульт управления системы «Auto Chief», в упрощенном виде показанный на рис. 9.4 (эта модификация системы «Auto Chief» предназначена для



реверсивных с ВФШ и нереверсивных с ВРШ главных дизельных установок).

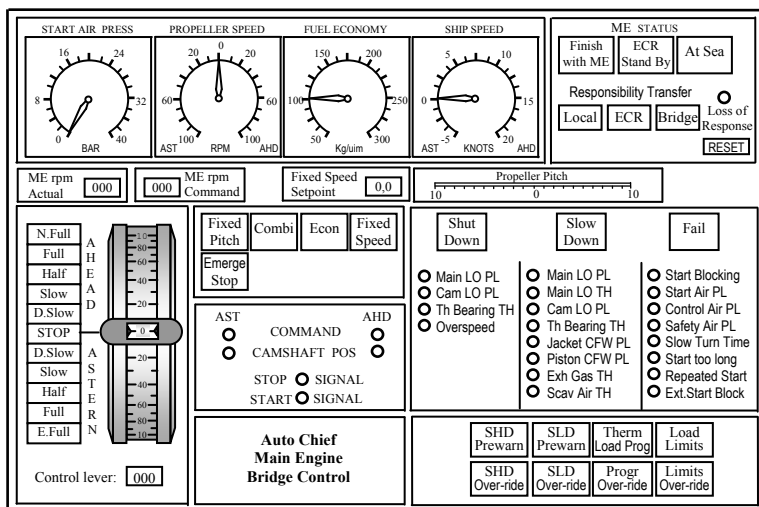


Рис. 9.4. Схема панели СДАУ<sub>ГД</sub> на мостике судна

Приведенные на схеме сокращения обозначают следующее:

- AHD – вперед (Ahead);
- AST – назад (Astern);
- Cam – кулачковый вал (Camshaft);
- CFW – охлаждающая вода (cooling fresh water);
- Combi – комбинированный (Combinatory);
- Econ – экономический (Economy);
- ECR – ЦПУ (Engine Control Room);
- Exh Gas – выхлопной газ (Exhaust Gas);
- Ext – внешний (External);
- LO – смазочное масло (Lubricated Oil);
- ME – главный двигатель (Main Engine);
- N Full – ППХ морской (Navigational Full);
- E Full – аварийный ЗПХ (Emergency Full);
- PL – низкое давление (Pressure low);
- POS – положение (Position);
- Scav Air – продувочный воздух двигателя (Scavenge Air);
- SHD – аварийная остановка двигателя (Shut down);
- SLD – аварийное снижение оборотов (Slow down);

TH – высокая температура (Temperature high);

Th Bearing – упорный подшипник (Thrust Bearing).

Слева сверху на панели управления СДАУ<sub>ГД</sub> находятся **индикаторы значений основных параметров работы ГДУ**: «START AIR PRESS» – давления пускового воздуха, «PROPELLER SPEED» – частоты и направления вращения гребного винта, «FUEL ECONOMY» – экономии топлива, «SHIP SPEED» – скорости и направления движения судна.

Для обмена информацией между мостиком и ЦПУ служат три индикаторные кнопки **о статусе главной движительной установки** – «ME status», помещенные на панели сверху справа. Включенная кнопка «Finish with ME» означает, что двигатель остановлен, обслуживающие двигатель механизмы выключены, пусковой воздух закрыт. Когда выбрано «ECR Stand By», то главная машина должна быть готова к маневрированию, а вахтенный механик находится в ЦПУ (судно управляется с мостика). Кнопка «At Sea» нажимается для сообщения, что судно в море, управление двигателем производится с мостика, машинное отделение – в режиме без механика.

Ниже перечисленных указателей статуса ГД находится группа «Responsibility Transfer» кнопок-индикаторов **для выбора поста, ответственного за управление двигателем**. Аварийное управление с местного поста (Local) выбирается, когда существуют проблемы с работой или неполадки СДАУ<sub>ГД</sub>. Управление из ЦПУ (ECR) используется при испытаниях главного двигателя, а также в ситуациях, когда требуется специальное управление. Например, когда СДАУ<sub>ГД</sub> было подано предупреждение об автоматической остановке или снижении оборотов двигателя из-за неполадки, но это действие было отменено судоводителем из-за сложности навигационной обстановки, и двигатель работает в аварийном режиме. Управление с мостика (Bridge) является нормальным режимом управления двигателем в большинстве эксплуатационных условий. В этом режиме персонал машинного отделения освобождается от контроля работы главного двигателя.

Слева внизу на панели находятся **машинные телеграфы**: кнопочный – для назначения основных режимов хода; с рукояткой – для плавной установки частоты вращения двигателя.

Справа внизу панели управления находятся **индикаторы предварительных предупреждений** о действиях, предпринимаемых системой защиты двигателя, и **кнопки для отмены операций автоматической защиты**. Предварительное предупреждение об аварийной остановке двигателя «SHD Prewarn» подается, когда

возникла неполадка, требующая прекращения работы двигателя. Соответственно предварительный сигнал «SLD Prewarn» появляется, если из-за появившейся неполадки автоматически будут снижены обороты двигателя.

Рассматриваемая СДАУ<sub>ГД</sub> снабжена программой нагрузок двигателя. Эта программа предназначена для медленного увеличения и уменьшения нагрузки двигателя при вводе и выводе из эксплуатационного режима. Программа нагрузки подключается при изменении положения телеграфа и находится в действии до тех пор, пока не будет достигнута назначенная частота вращения двигателя. Если в процессе изменения мощности двигателя появляется перегрузка, то подается предварительное предупреждение «Therm Load Prog» о прерывании нарастания или снижения скорости двигателя.

При работе в режиме постоянной мощности, когда появляется температурная перегрузка машины, вызываемая внешними факторами (увеличением сопротивления движению судна на мелководье или при плавании на волнении и т.д.), появляется предварительное сообщение «Load Limits» об автоматическом уменьшении частоты вращения.

После появления того или иного из названных предупреждений судоводитель в течение небольшого промежутка времени может отменить автоматическое действие системы по защите двигателя. Эта отмена выполняется соответствующей предварительному предупреждению кнопкой («SHD override», «SLD override», «Prog override», «Limits override»).

Выше группы этих элементов находятся **индикаторы (светодиоды) неполадок разной степени опасности для двигателя**. К неполадкам, требующим остановки двигателя (**Shut down**), относятся: «Main LO PL» – низкое давление смазочного масла двигателя, «Cam LO PL» – низкое давление смазочного масла распредвала, «Th Bearing TH» – высокая температура упорного подшипника, «Overspeed» – превышение частоты вращения двигателя.

Нарушениями работы двигателя, влекущими автоматическое снижение его мощности (**Slow down**) системой защиты, являются: «Main LO PL» и «Main LO TH» – низкое давление и высокая температура смазочного масла двигателя, «Cam LO PL» – низкое давление смазочного масла распредвала, «Th Bearing TH» – высокая температура упорного подшипника, «Jecket CFW PL» и «Piston CFW PL» – низкое давление охлаждающей воды рубашки цилиндров и поршней, «Exh Gas TH» – высокая температура выхлопных газов,

«Scav Air TH» – высокая температура продувочного воздуха двигателя.

Нарушениями работы ГДУ третьей степени (**Fail**), обуславливающими невозможность выполнения команд оператора, но не происходящими от повреждений двигателя, являются: «Start Blocking» – пуск заблокирован (из-за закрытия клапана системой маневрирования двигателем); «Start Air PL», «Control Air PL», «Safety Air PL» – низкое давление пускового воздуха (для функций запуска), воздуха управления (требуемого для управления системой маневрирования двигателя), воздуха защиты (для операций с клапанами для прекращения подачи топлива); «Slow Turn Timeout» – превышение времени от подачи команды на малый ход до начала вращения двигателя; «Start too long» – превышение времени между командой на запуск и моментом, когда обороты должны достичь стартового уровня; «Repeated Start» – повторный запуск; «External start block» – внешняя блокировка запуска.

Справа от верхней части машинного телеграфа находятся **переключатели режимов оперирования скоростью судна**, которые применяются, когда рассматриваемая СДАУ<sub>ГД</sub> управляет ГДУ с ВРШ. Ниже этих переключателей находится кнопка аварийной остановки двигателя (Emerg Stop).

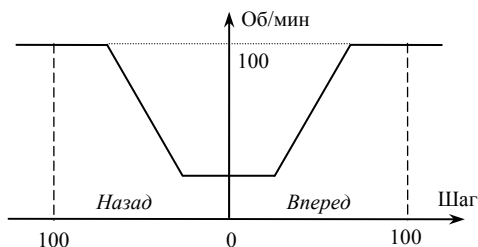


Рис. 9.5. Изменение шага и частоты вращения ВРШ при положении телеграфа от 0 до 100

При использовании режима «Fixed Pitch» шаг ВРШ устанавливается близким к оптимальному для режима полного хода. В дальнейшем, если не изменяется направление хода судна, шаг ВРШ остается постоянным. При изменении положения рукоятки машинного телеграфа для обеспечения выбранной скорости хода системой изменяется частота вращения двигателя.

В комбинированном режиме (Combi) при назначении телеграфом режима хода системой меняется шаг винта и частота вращения

двигателя в соответствии с установленной постоянной зависимостью между этими параметрами (рис. 9.5).

Экономичный режим «Econ» является наиболее эффективным комбинированным режимом управления, в котором для обеспечения заданного хода компьютер выбирает наилучшие при данных условиях значения шага и частоты вращения ВРШ.

В режиме «Fixed Speed» частота вращения двигателя постоянна. Заданный режим хода система обеспечивает, изменяя шаг винта.

Справа от нижней части телеграфа находятся **индикаторы**, работающие, когда СДАУ<sub>ГД</sub> управляет ГДУ с **ВФШ**. Их загорание указывает задаваемое телеграфом направление движения и положение распредвала (AST, AHD), поступление команды на остановку (STOP) либо пуск (START) двигателя.

На панели управления имеются также цифровые индикаторы действительной (ME grm Actual) и заданной (ME grm Command) частоты вращения, установленной постоянной частоты вращения (Fixed Speed Setpoint) для ВРШ, и графический указатель шага ВРШ (Propeller Pitch).

## 9.6. Программное обеспечение СДАУ<sub>ГД</sub>

**Общая структура программ управления.** От СДАУ<sub>ГД</sub> требуется, чтобы она в соответствии с заданной программой (пуск, разгон и т. д.) с учетом текущего рабочего состояния ГДУ вырабатывала определенную последовательность управляющих воздействий. Для этой цели СДАУ<sub>ГД</sub> выполняет многочисленные тесты, результаты которых определяют дальнейшие ее функции. Такой тип управления называют **ситуационным** либо **кондициональным** (причинно-следящим).

Программа СДАУ<sub>ГД</sub> расчленяется на отдельные части, каждая из которых соответствует завершенным в технологическом отношении функциональным комплексам. Каждая часть программы состоит, как правило, из нескольких ступеней (шагов) со следующей структурой:

- При поступлении сигнала о завершении определенной ступени программы, с помощью так называемых первичных критериев проверяются предварительные технологические условия допустимости следующего шага программы.
- Если первичные критерии выполнены, то выдаются предусмотренные управляющие команды. При отрицательном результате вырабатывается сигнал о наличии неполадки.

- При помощи соответствующих вторичных критериев проверяется последующее правильное по времени выполнение операций в ответ на управляющие команды.
- Если все эти операции выполнены корректно, выдается сигнал о завершении ступени программы.

Содержание программного обеспечения СДАУ<sub>ГД</sub> определяется типом пропульсивного комплекса.

**Программы дистанционного управления дизелями.** Ниже характеризуются программы, относящиеся в основном к дистанционному автоматизированному управлению крупных однодизельных малооборотных установок с ВФШ с непосредственной передачей мощности от двигателя на гребной вал.

**Программа запуска двигателя.** Фактически все главные малооборотные судовые дизели пускаются сжатым воздухом. Он используется для первоначальной раскрутки дизеля до определенной *пусковой частоты* вращения, при которой возможно надежное воспламенение топлива, подаваемого в цилиндры. Программа запуска главного судового дизеля включает следующие операции.

***Процесс запуска в нормальном режиме*** начинается с переключки рукоятки управления из нулевого положения, когда двигатель находится в состоянии покоя. Затем производится проверка соответствия положения распределительного вала заданному направлению вращения. При отсутствии такого соответствия подается команда на переключение распределительного вала. После подтверждения выполнение этой операции, переходят к следующей ступени программы.

На второй ступени проверяется готовность к действию различных вспомогательных устройств путем сравнения значений (минимального давления масла в подшипниках, охлаждающей воды, топлива, пускового воздуха и др.) с пусковыми критериями. Если критерии выполнены, то подается сигнал «все вторичные критерии выполнены». В противном случае дальнейший процесс пуска блокируется и вырабатывается сигнал о наличии неполадки.

Если вторая ступень программы пуска выполнена успешно, подается команда на открытие клапана пускового воздуха, который соединен с включающим звеном счетчика выдержки времени. Работа двигателя начинается тогда, когда частота вращения вала превысит пусковое значение. С помощью специального теста устанавливается, запустился ли двигатель в течение заданного отрезка времени. Если пуск оказался неудачным, клапан пускового воздуха закрывается.

Производится переход на начало второй ступени, и процесс запуска включается снова (петля программы).

В *нормальном режиме* обычно процесс запуска повторяется до трех раз. Для этой цели петля программы имеет счетчик. Если процесс запуска остается безуспешным, то пусковая операция прекращается и подается сигнал неисправности. Если же двигатель начал работать, то задача его запуска считается выполненной. **Аварийный запуск** двигателя в отличие от нормального может повторяться большее число раз без подачи сигнала о неисправности.

**Программа разгона (торможения) двигателя.** После сигнала о завершении программы запуска, дальнейшее управление ГДУ переходит к программе разгона. Она подключается и в случае изменения положения рукоятки управления в пределах диапазона одного направления вращения. Таким образом, *задача программы* состоит в повышении (снижении) частоты вращения вала от одного значения  $n_{3,1}$  до нового заданного значения  $n_3$  с учетом различных внутренних технологических условий работы ГДУ.

**Программа разгона в нормальном режиме** обеспечивает выполнение следующих операций. При задании новой частоты вращения  $n_3$  (внешняя команда) образуется внутреннее (программное) задающее воздействие  $n_{\Pi}(t)$ , которое изменяется от старого  $n_{3,1}$  до нового  $n_3$  значения, согласуясь с внутренними рабочими критериями:

$$n_{\Pi}(t) = n_{3,1} + f(t, p_1, p_2, \dots, p_k),$$

где –  $p_1, p_2, \dots, p_k$  – рабочие параметры двигателя.

Этим исключается влияние скорости изменения внешнего воздействия на ГДУ. До тех пор, пока  $n_3$  и  $n_{\Pi}(t)$  не соответствуют друг другу, скорость изменения  $n_{\Pi}(t)$  регулируется в зависимости от значений рабочих параметров в направлении постепенного уравнивания внутреннего и внешнего задающих воздействий. В процессе изменения  $n_{\Pi}(t)$  производится:

- Ограничение ускорения дизеля для предотвращения срыва потока с лопастей гребного винта и снижения его упора. Для этой цели контролируется частота вращения вала или скорость ее изменения.
- Управление наполнением цилиндров в соответствии с количеством рабочего воздуха, подаваемого воздухоподкой. Это соответствие оценивается по давлению надвучного воздуха.

- Ограничение температурного градиента. Контрольным параметром может служить температура стенок цилиндров и выхлопных газов.
- Ограничение момента на валу, который зависит от частоты вращения и скорости судна.

При работе программы проверяется нахождение фактической частоты вращения вала в диапазоне критических значений. При попадании частоты в этот диапазон внутреннее задающее воздействие корректируется, чтобы быстро выйти из опасной области частот.

Исполнительный модуль СДАУ<sub>ГД</sub> вместе с двигателем работают как следящая система, обеспечивающая с максимальной точностью равенство действительной частоты вращения вала  $n$  внутреннему задающему воздействию  $n_{П}(t)$  (рис. 9.6). При неизменном значении  $n_3$  модуль работает как *всерезжимный регулятор частоты вращения*, компенсируя влияние внешних возмущающих воздействий (от волнения моря, мелководья и др. причин), если поддержание этой частоты не связано с недопустимыми механическими и температурными перегрузками двигателя.



Рис. 9.6. К пояснению работы программы разгона

**В режиме экстренного управления** обеспечивается ускоренный переход от одной частоты вращения к другой за счет допущения повышенной нагрузки на двигатель.

**Программа** разгона (увеличения нагрузки, разогрева) дизеля выбирается для замедленного повышения частоты его вращения от маневренных оборотов до заданных (чаще всего до полного хода) в наиболее благоприятном для дизеля режиме (без превышения определенной скорости нарастания температуры). **Программа** торможения (уменьшения нагрузки, охлаждения) двигателя подключается для снижения частоты вращения винта до назначенного значения без превышения значения определенного температурного градиента.

**Программа** «At sea» выбирается при следовании судна одним ходом в открытом море. По сравнению с нормальным режимом



маневрирования она характеризуется более редкой частотой опроса датчиков параметров дизеля и воздействий на него.

**Программа реверсирования.** При реверсе дизель останавливается, производится реверсирование распределительного вала. После этого дизель запускается в противоположном направлении вращения и разгоняется. Признаком для включения программы реверсирования служит перевод рукоятки управления через нулевое положение. *При нормальном реверсировании* перекрывается подвод топлива и переключается распределительный вал на противоположное направление вращения. Затем программа обеспечивает выдержку времени, продолжающуюся до тех пор, пока частота вращения гребного винта, приводимого в движение потоком воды, не снизится до определенной величины. С этого момента начинает действовать *программа запуска дизеля* в нужном направлении. По завершении запуска включается *программа разгона дизеля* до заданной частоты вращения. *Программа аварийного реверса* отличается от программы нормального изменения направления вращения включением в нее дополнительного торможения гребного вала двигателем (повышением момента сопротивления). В крупных однодизельных установках это достигается соответствующим воздействием на клапан контрподдачи воздуха. Дополнительно к этому автоматика производит запуск дизеля в противоположном направлении при более высоких, чем при нормальном реверсе, оборотах гребного винта, вращаемого потоком воды. В ряде ГДУ для быстрого снижения частоты вращения гребного вала используется *механическое тормозное устройство*.

## 9.7. Интеграция системы управления скоростью судна с системой ее планирования

**Актуальность оптимизации скорости судна.** Одним из направлений повышения экономичности работающих по расписанию и зафрахтованных на условиях рейсового тайм-чартера судов является интеграция двух бортовых систем: оперативного планирования скорости хода и управления этой координатой. Примером названной интеграции служит использование на автомобильных паромас программы планирования «SeaPacer Route Planning» с системой Searac (фирма «Сипэйсер», Швеция), способной точно выдерживать скорость судна по данным GPS и оптимизировать режим работы двигателя.

Наличие плана скорости движения, обеспечивающего экономию топлива в ожидаемых условиях плавания, и точное его выполнение с минимизацией потребляемой энергии позволяют достичь

существенной экономии финансовых средств. Оптимизация эксплуатационных расходов топлива аппаратными средствами является простейшим не требующим больших затрат методом повышения эффективности эксплуатации судов. К путям экономии топлива относятся: нахождение рациональной посадки судна, повышение эффективности управления курсом (минимизация рыскания, частоты и углов перекладки руля), выбор наилучшего в данных условиях режима работы главного двигателя и др. За счет этих мер по данным исследований и результатам практического применения реализующих эти методы систем можно достичь экономии топлива от 6 до 15%.

Ряд зарубежных фирм разработали и внедрили системы, позволяющие планировать и выполнять переходы, оптимизируя расход топлива главным двигателем. Среди них следует назвать: Fuelmaster-II, Optitrim, Sal-Fe, Seapac1 шведских фирм «Кокумс», «Асеа», «Юнгер Марин», «Сипэйсер» соответственно; KSP (Kuma Ship Performance) норвежской фирмы «Кума»; Ko-Fu-Saver и Kontrim финской фирмы «Котрам АВ» (Хельсинки); TONAC-N2 японской фирмы «Мицубиси Хеви Индастриез», Ekomatic исландской фирмы «Технобрайн ИНК», ESP 2000 (Electronic Speed Pilot) фирмы «Stellar Marine» и ряд других. В этих системах использованы различные методы для определения расхода топлива и для его оптимизации при планировании перехода и его выполнении, учитывающие влияния внутренних и внешних факторов на работу пропульсивного комплекса. Так система Kontrim позволяет измерять динамические значения дифферента и крена судна и установить оптимальный дифферент по расходу топлива.

Программное обеспечение системы Optitrim позволяет планировать движение с учетом ожидаемого ветра, волнения, поверхностных течений, мелководья. По расчетному времени определяет оптимальные значения скорости и расхода топлива для участков перехода. При вводе уточненных данных о времени прибытия система Optitrim находит новую оптимальную скорость хода и расход топлива для прибытия в порт в назначенное время. Наличие датчиков состояния моря и погоды позволяют системе оптимизировать работу двигателя с учетом реальных условий плавания. Программа оптимизации дифферента дает возможность определить наилучшую дифферентовку судна в зависимости от его скорости и водоизмещения. Система выдает точную и непрерывную информацию о мощности, частоте вращения, моменте на валу главного двигателя.

Рассмотрим ряд вопросов, относящихся к оптимизации скорости движения судна.

**Оперативное планирование скорости судна** заключается в определении ее наилучших значений для участков перехода перед рейсом и в периодической коррекции этих значений в процессе рейса на основе получаемых прогнозов погоды. Такие прогнозы обычно принимаются на судне через 24 или 12 часов.

Постановка задачи планирования скорости предполагает в первую очередь выбор критерия эффективности плана, а также введение необходимых упрощений, позволяющих получить решение задачи с помощью известных методов оптимизации. Для упрощения планирования маршрут перехода делится на элементарные с относительно постоянными условиями плавания участки, на которых движение судна при неизменном режиме ГДУ может считаться равномерным. Полученное количество таких участков ниже обозначается  $m$ . Им присваиваются номера от 1 до  $m$ , начиная с первого. Время разгона/торможения при переходе с одного такого участка на другой считается малым и не учитывается при планировании. Номер рассматриваемого участка ниже обозначается  $j$ , его протяженность в милях –  $S_j$ , скорость движения по нему в узлах –  $V_j$ . Совокупности  $S_j, V_j$  всех участков представляются в виде векторов

$$\mathbf{S}^{\{m\}} = (S_1, S_2, \dots, S_m), \quad \mathbf{V}^{\{m\}} = (V_1, V_2, \dots, V_m).$$

Критерий оптимальности выбирается в виде некоторой функции  $F(\mathbf{S}^{\{m\}}, \mathbf{V}^{\{m\}})$ , отражающей степень соответствия плана скорости цели рейса. Дополнительные условия задачи формулируются в виде ограничений на план движения. Основным из них является ограничение на скорость судна. Она должна находиться в диапазоне  $\check{V}_j \leq V_j \leq \hat{V}_j$ , в котором не возникают неблагоприятные явления, представляющие опасность для судна и груза (чрезмерная качка, заливаемость, слеминг, перегрузка двигателя, большие ускорения и т.д.). В этом условии  $\check{V}_j, \hat{V}_j$  – нижняя и верхняя граница допустимых на  $j$ -ом участке значений скорости хода. Очевидно, чтобы судно оставалось управляемым,  $\check{V}_j$  не должна быть меньше скорости самого

малого хода ( $\tilde{V}_j \geq V_{\text{ПСМХ}}$ ). Верхняя граница  $\hat{V}_j$  не назначается большей скорости полного морского хода ( $\hat{V}_j \leq V_{\text{ПМХ}}$ ).

На практике при планировании скорости судна в качестве критерия оптимальности используется: время перехода, расход топлива, величина эксплуатационных расходов и другие показатели. Очевидно, что наиболее полной характеристикой эффективности перехода является прибыль. Однако применение такого критерия затрагивает факторы (стоимость фрахта, топлива и др.), которыми на судне не распоряжаются, так как они находятся в ведении сугубо судовладельца.

На судне, работающем по расписанию, ставится обычно задача минимизации **расхода топлива**. С учетом деления пути перехода на  $m$  элементарных участков она формулируется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^m f_{S_j} S_j &\rightarrow \min \\ \tilde{V}_j &\leq V_j \leq \hat{V}_j \\ \sum_{j=1}^m S_j / V_j &= T_T \end{aligned} \right\}, \quad (9.1)$$

где  $f_{S_j}$  – расход топлива на милю пути на  $j$ -ом участке;  $T_T$  – предписанное время перехода.

По установленному порядку решения о скорости судна принимает капитан, учитывая часть обстоятельств плавания (волнение, ветер, течение, дифферент, состояние корпуса и др.) самостоятельно. Другие факторы (состояние ГДУ, параметры работы двигателя, удельный расход топлива и др.), находящиеся обычно в ведении судомехаников, он принимает во внимание, советуясь со старшим механиком. Традиционно на судах выбор скорости движения производится приближенно, так как на применение точных расчетных методов не хватает времени. В результате возможность повышения эффективности рейсов за счет дополнительной экономии топлива не реализуется.

Компьютеры позволяют в определенной мере преодолеть этот недостаток. Однако имеются проблемы и при компьютерном выборе скорости хода. Они заключаются в необходимости учета многих факторов: типа, технико-экономических показателей ГДУ и движителя; состояния главного двигателя, движителя и корпуса судна; загрузки судна; сорта топлива, и т.д. Кроме того, требуется

учитывать внешние условия на переходе, характер их влияния на движение и безопасность судна. Поэтому алгоритм планирования весьма сложен. Но трудность определения оптимальной скорости движения состоит не только в разработке учитывающего все названные выше факторы алгоритма, но и в необходимости использования индивидуальных характеристик каждого конкретного судна. Известно, что нередко даже у судов одной серии поворотливость, ходкость и другие качества отличаются. Кроме того, и у одного судна на разных отрезках времени его эксплуатации пропульсивные качества неодинаковы из-за изменения состояния корпуса, гребного винта, главного двигателя.

Под характеристикой корпуса судна как элемента пропульсивного комплекса понимают его буксировочное сопротивление. В процессе эксплуатации оно изменяется в зависимости от эксплуатационных факторов, главными из которых являются: увеличение шероховатости корпуса из-за разрушения краски, коррозии, органического обрастания; характер загрузки; гидрометеорологические условия.

Пропульсивными показателями гребного винта являются зависимости его КПД, коэффициентов упора и момента в свободной воде от относительной поступи. В условиях эксплуатации они также непостоянны из-за изменения состояния лопастей винтов, обусловленного коррозией, кавитационной эрозией, обрастанием, отложением солей и т.д. Кроме того, на характеристики винта влияет изменение его погружения и оголение лопастей в период качки.

Двигатель внутреннего сгорания как часть пропульсивного комплекса может быть представлен зависимостью эффективной мощности от частоты вращения или другими характеристиками. С течением времени они также изменяются.

Влияние различных причин на скорость судна имеет сложный характер. Изменение состояния поверхности обшивки корпуса, увеличение шероховатости лопастей гребного винта и воздействие на судно метеорологических факторов приводят к возрастанию сопротивления движению судна, изменению гидромеханических характеристик гребного винта, «утяжелению» винтовых характеристик дизеля. Уменьшаются частота вращения гребного винта, мощность дизеля и, соответственно, упор, развиваемый винтом. Одновременно снижается КПД винта. Из-за влияния этих факторов падает скорость судна, изменяется поступь гребного винта. Изменение относительной поступи сопровождается изменением коэффициентов упора, момента и КПД винта. Одновременно увеличение шероховатости корпуса судна приводит к росту коэффициента попутного потока, что вызывает

некоторое увеличение пропульсивного коэффициента при определенном снижении КПД винта.

В качестве показателя изменения со временем ходовых качеств системы «дизель – гребной винт – корпус судна» нередко берут коэффициент нагрузки  $c_S$ , входящий в упрощенное уравнение винтовой характеристики [13]

$$N_e \approx c_S n^3 = c_h c_p c_\lambda n^3,$$

где  $c_h$ ,  $c_p$ ,  $c_\lambda$  – сомножители, учитывающие изменение соответственно сопротивления корпуса, состояния поверхностей гребного винта, характеристики взаимодействия винта с корпусом;  $n$  – частота вращения гребного винта.

Критерием влияния состояния пропульсивного комплекса на использование топлива часто считают так называемый топливный коэффициент

$$K_F = D^{2/3} V / f_d,$$

где  $D$  – водоизмещение в тоннах;  $V$  – скорость в узлах;  $f_d$  – суточный расход топлива.

Коэффициенты  $c_S$  и  $K_F$  применяются для оценки состояния пропульсивного комплекса и качества доковых и междоковых работ по очистке и окраске корпуса.

В целом ухудшение пропульсивных качеств с течением времени эксплуатации характеризуется величиной потери скорости. Расчетные методы не позволяют пока с высокой точностью прогнозировать изменение с течением времени пропульсивных качеств конкретного судна и влияние на его скорость ветроволновых условий. Поэтому для улучшения планирования переходов судов большое значение имеет уточнение коэффициентов моделей для прогноза скорости и расхода топлива по наблюдениям, проводимым в процессе эксплуатации.

Учет индивидуальных особенностей судна при планировании скорости требует сбора статистических данных по его эксплуатации за продолжительный период, их анализа, определения изменения со временем ходовых качеств, показателей расхода топлива и других свойств судна, а также их прогноза на будущее. Только при организации системы определения индивидуальных, отвечающих времени эксплуатации характеристик судна можно достичь высокого качества планирования скорости по критерию расхода топлива.

Из сказанного выше нетрудно установить, что оптимизация плана по критерию (9.1) базируется на зависимостях: *скорости судна*

$V(n, \mathbf{W})$ ; эффективной мощности двигателя  $N_e(V, \mathbf{W})$ ; расхода топлива на милю пути  $f_S(V, \mathbf{W})$ ; граничных значений скорости  $\tilde{V}(\mathbf{W})$  и  $\hat{V}(\mathbf{W})$ . В этих функциях  $\mathbf{W}$  – совокупность параметров, определяющих условия плавания (осадка, дифферент, курс, скорость, метацентрическая высота, глубина под килем, элементы ветра, волнения, течения и т.д.). Только имея эти функции, можно говорить о возможности оптимизации плана скорости судна. Наиболее точно названные зависимости отражаются с помощью математических моделей: ГДУ, судна как объекта управления скоростью, внешних факторов, включая спектральные характеристики волнения. Однако, это и наиболее громоздкие выражения зависимостей  $V(n, \mathbf{W})$ ,  $N_e(V, \mathbf{W})$ ,  $f_S(V, \mathbf{W})$ ,  $\tilde{V}(\mathbf{W})$ ,  $\hat{V}(\mathbf{W})$ , требующие большого количества исходных данных. Применение этих выражений сопровождается большим объемом вычислений. Кроме того, модели судна, ГДУ, влияния внешних воздействий меняются со временем, что требует их подстройки в процессе эксплуатации. Поэтому в ряде систем для судов, которые работают на одной линии, используются полученные в процессе эксплуатации эмпирические зависимости. Примером служит шведская система «SeaPacer Route Planning».

Учитывая сложность рассматриваемой задачи (9.1), ниже поясняется только принцип ее решения для одновинтового судна с ВФШ, на основе использования упрощенных описаний зависимостей  $V(n, \mathbf{W})$ ,  $N_e(V, \mathbf{W})$ ,  $f_S(V, \mathbf{W})$ ,  $\tilde{V}(\mathbf{W})$  и  $\hat{V}(\mathbf{W})$ .

**Скорость судна в зависимости от  $n$  и элементов  $\mathbf{W}$**  можно рассчитывать по эмпирическим упрощенным формулам, приведенным в специальной литературе, например, [7, 9, 11, 17, 19, 26, 29-32]. Ряд из них позволяют найти отношение  $(V/V_{ST})$  скорости  $V$  судна для эксплуатационных условий (на малых глубинах, в каналах, при волнении и т.д.) к скорости  $V_{ST}$  для стандартных условий (глубина больше 4-х осадок; ветер до 5-ти баллов по шкале Бофорта, состояние моря не более 4-х баллов, течения нет). Значения скорости для стандартных условий и разных осадок определяются по информации, приведенной в формуляре маневренных характеристик судна.

**Эффективная мощность двигателя  $N_e$**  в зависимости от  $n$  и  $V$  находится с помощью численного метода, отражающего графоаналитическое решение этой задачи с помощью паспортной диаграммы судна [13, 22, 23, 25].

**Часовой  $f_h$  или удельный  $f_{y\partial}$  расход топлива** определяется по топливной характеристике [22], представляющей собой зависимость  $f_h$  или  $f_{y\partial}$  от эффективной мощности двигателя  $\{f_h(N_e)$  или  $f_{y\partial}(N_e)\}$ . Топливная характеристика приведена в паспорте судового двигателя. Расход топлива на милю пути  $f_S$  получается по формуле:

$$f_S = f_h / V_G, \quad (9.2)$$

где  $V_G$  – скорость судна относительно грунта в узлах.

Следует отметить, что фактический расход топлива близок к паспортным данным, когда двигатель работает в установившемся режиме заданной постоянной мощности и не происходит значительных колебаний частоты вращения гребного винта от изменения его погружения на качке. Если же ГДУ управляется по закону поддержания постоянства частоты вращения ВФШ, то двигатель при ходе судна на волнении работает в условиях резко переменной нагрузки. В этом случае из-за высокой инерции системы воздухооборудования давление наддува не успевает подстраиваться к изменению цикловой подачи топлива, что ведет к увеличению  $f_{y\partial}$ , к росту тепловой напряженности деталей двигателя. Здесь фактические значения  $f_h$  превышают паспортные данные. Это обстоятельство в приведенном ниже алгоритме решения задачи не принимается во внимание.

**Верхнюю  $\bar{V}$  и нижнюю  $\check{V}$  границу безопасных скоростей** определяют в зависимости от норм, характеризующих мореходность судна [1, 5, 25, 26]. Условие мореходности включает проверку нахождения в допустимых пределах значений: параметров качки и нагрузок на корпусе, параметров работы главного двигателя, вероятности заливания, слеминга, разгона гребного винта и др.

**Алгоритм планирования скорости движения.** Когда названные выше зависимости представлены математически, становится возможным корректное решение задачи планирования скорости судна. Один из алгоритмов, предложенных для этой цели, включает следующие этапы:

1. нахождение режимов хода для стандартных условий без учета срока прибытия в конечный пункт;
2. деление на основе картографической информации и прогнозов погоды маршрута перехода на участки, на которых при постоянной мощности ГДУ движение равномерно;



3. расчет допустимой максимальной скорости на участках пути и продолжительности рейса с учетом района плавания и ожидаемых погодных условий без учета заданного времени прихода;
4. сравнение полученного времени с заданным;
5. определение режимов хода, обеспечивающих максимальную экономию топлива при заданном времени прибытия в пункт назначения.

**На первом этапе**, исходя из возможностей судна и установленных официальными властями для ряда районов ограничений, определяются наибольшая  $V_j^{\wedge}$  и наименьшая  $V_j^{\vee}$  допустимые скорости хода на отрезках маршрута для стандартных условий. Если официальных ограничений на скорость движения в районе плавания нет, то максимальной считается скорость ППХ.

**На втором этапе** по значениям  $V_j^{\wedge}$  с учетом среднестатистических течений рассчитывается скорость хода относительно грунта и моменты прибытия судна в поворотные точки. По этим моментам и данным прогнозов погоды определяются ожидаемые значения параметров ветра, волнения, поверхностного течения на отрезках маршрута. На основе анализа глубин на линии пути выделяются мелководные участки. Если на одном отрезке маршрута погодные условия разные и/или на нем наряду с глубокой водой имеется мелководье, то он разбивается на меньшие участки, на каждом из которых коэффициент сопротивления  $k_R$  движению судна приближенно одинаков. Направление движения вдоль  $j$ -го участка обозначим  $K_j$ .

**На третьем этапе** для всех выделенных участков находятся максимальные  $\widehat{V}_j$  и минимальные  $\check{V}_j$  границы скорости, при которых движение в ожидаемых условиях безопасно. С этой целью применяют подходящий для судна вектор критериев мореходности с соответствующей ему нормой. Для расчета  $\widehat{V}_j$ ,  $f_{sj}$  всех участков, а также времени  $\Delta t_j$  их прохождения, используется **метод последовательных приближений**, поясняемый рис. 9.7.

При его реализации начальное значение  $n_j$  принимается отвечающим  $V_j^{\wedge}$ . Для ожидаемых условий  $\mathbf{W}$  в зависимости от  $n_j$  по выбранной упрощенной зависимости  $V(n, \mathbf{W})$  находится  $\widehat{V}_j$ . По  $n_j$ ,

$\widehat{V}_j$ ,  $K_j$  рассчитывается эффективная мощность двигателя  $N_{ej}$ , часовой расход топлива  $f_{hj}$  и по критерию мореходности проверяется, безопасно ли движение при скорости  $\widehat{V}_j$ .

Если небезопасно, то из  $n_j$  вычитается малая величина  $\Delta_n$  и вычисляется отвечающее уменьшенному  $n_j$  значение  $\widehat{V}_j$ . По  $n_j$ ,  $\widehat{V}_j$ ,  $K_j$  рассчитывается эффективная мощность двигателя  $N_{ej}$ , часовой расход топлива  $f_{hj}$  и проверяется условие мореходности. Если оно не выполняется, то  $n_j$  снова уменьшается на величину  $\Delta_n$ , и расчет  $\widehat{V}_j$  повторяется. Так продолжается до тех пор, пока не будет получена максимальная скорость  $\widehat{V}_j$  судна на  $j$ -ом участке, при которой мореходность судна будет обеспечена.

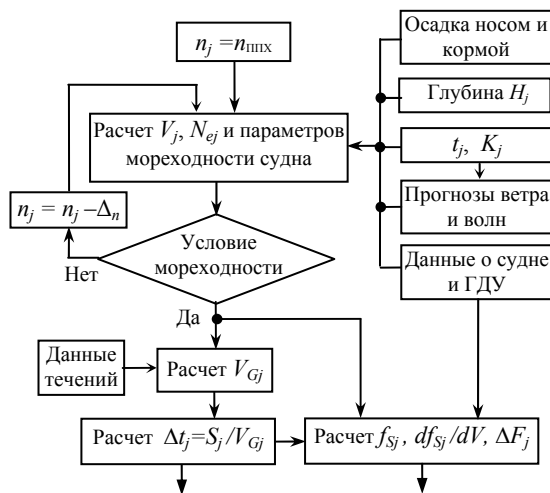


Рис. 9.7. Алгоритм расчета  $\widehat{V}_j$ ,  $\Delta t_j$ ,  $\Delta F_j$

После этого находится:

- скорость судна на  $j$ -ом участке относительно грунта ( $V_{Gj}$ );
- время прохождения участка ( $\Delta t_j$ );

- расход топлива на милю ( $f_{sj}$ ), производная  $df_{sj}/dV$ , расход топлива на  $j$ -ом участке ( $\Delta F_j$ ).

Значения перечисленных величин определяются для всех участков пути. После этого рассчитывается общее время перехода  $T_\Sigma$  и количество топлива –  $F_\Sigma$ , необходимое для его выполнения.

**На четвертом этапе** сравнивается полученное время перехода  $T_\Sigma$  с заданным  $T_T$ :  $\delta t_Z = T_T - T_\Sigma$ . Если  $\delta t_Z < 0$ , то доставить груз в порт назначения в заданный срок не представляется возможным. Сообщение об этом выдается оператору, и вычисления заканчиваются. При  $\delta t_Z > 0$  можно уменьшить скорость хода, сэкономить топливо и смазочное масло. В этом случае переходят к выполнению пятого этапа.

**На пятом этапе** выбирается отрезок пути, на котором целесообразно снизить скорость хода. Чтобы экономия топлива была максимальной, анализируются значения производной по времени расхода топлива на милю и выбирается участок (или участки маршрута), на котором эта производная максимальна. Назначают на этих участках такую скорость, чтобы продолжительность перехода соответствовала заданной.

На этом вычисление плана заканчивается. На переходе судна с помощью СДАУ<sub>ГД</sub> этот план выполняется. Через каждые 12 или 24 часа с получением нового прогноза погоды план скорости движения корректируют.

## **10. Системы позиционирования судна**

### **10.1. Назначение систем динамического позиционирования**

**О значении управляемости судна на предельно малых скоростях движения.** Управляемость судов на малых и предельно малых скоростях хода имеет большое практическое значение. В узкостях, в гаванях, в портовых водах суда часто вынуждены двигаться на таких скоростях, на которых они без активных силовых средств неуправляемы либо даже при слабом ветре не слушаются руля.

В портовых водах для перемещения судов издавна применяются буксиры. Их роль сводится к созданию сил, обеспечивающих требуемое движение корпуса судна. Управление судном с помощью буксиров имеет ряд недостатков. Прежде всего, требуется наличие в порту развитого и дорогостоящего буксирного хозяйства. Для маневрирования буксиров около судна в процессе управления его движением должно быть свободное пространство. С капитанами буксиров должна быть связь, взаимопонимание. И, естественно, за услуги буксиров требуется платить.

На акваториях портов и в других ограниченных районах в общем случае требуется управлять не только курсом и скоростью судна, но и перемещением его оконечностей. Самостоятельно так маневрировать могут только **полностью управляемые** суда, т.е. управляемые по всем горизонтальным степеням свободы: продольному, боковому перемещению и вращению вокруг вертикальной оси. Чтобы обладать такой способностью, судно должно иметь достаточное число вспомогательных средств управления. Ввиду различия используемых на судах главных движительных, рулевых и вспомогательных силовых средств, пропульсивные схемы управляемых по всем горизонтальным степеням свободы судов неодинаковы. Для получения такой управляемости одновинтовые суда, как минимум, должны снабжаться носовыми и кормовыми подруливающими устройствами. Двухвинтовое судно способно самостоятельно выполнять требуемые в портовых водах маневры и с одним носовым ПРУ. Судно, имеющее две раздельно управляемые поворотные винтовые колонки (одну – в корме в качестве главного движительно-рулевого устройства, вторую – как носовое азимутальное ПРУ) является вполне управляемым.

До недавнего времени полная управляемость обеспечивалась плавсредствам, которым она была нужна по роду выполняемой

работы: буровым судам, прокладчикам силовых и информационных кабелей и т.д. Энерговооруженность транспортных морских судов для самостоятельного выполнения всех видов маневров на акваториях портов оставалась недостаточной. Глубокое осознание важности хорошей управляемости для обеспечения безопасности плавания в стесненных акваториях, а также появившиеся технические возможности привели к изменению этого положения. Полную управляемость начали обеспечивать пассажирским лайнерам и паромам, грузовым судам, деятельность которых связана с частыми швартовками (ро-ро, контейнеровозы, автомобилевозы), и судам, перевозящим опасные грузы. Некоторые из новых пассажирских судов имеют до восьми силовых органов. Например, вступивший в эксплуатацию в конце 1997 г. немецкий круизный лайнер «Меркурий» оснащен главной движительной установкой с двумя ВРШ, тремя носовыми и двумя кормовыми подруливающими устройствами, и двумя активными рулями.

При самостоятельном маневрировании на акваториях портов используются все силовые средства. Однако управлять судном с несколькими силовыми средствами затруднительно. Довольно сложно судоводителю без расчетов определить режимы работы каждого из них, чтобы обеспечивалось желаемое перемещение корпуса судна. Кроме того, необходимость оперирования многими рукоятками управления в сложной ситуации чревата большой вероятностью ошибки. Поэтому на полностью управляемых судах стали популярными *джойстиковые системы*, значительно упрощающие маневрирование в стесненных акваториях. Оно сводится к управлению плоскопараллельным перемещением судна **джойстиком** и к управлению его ориентацией по курсу с помощью штурвала либо круглой поворотной рукоятки – **кноба**. Выбор соответствующих режимов работы силовых средств по командам джойстика и кноба выполняет компьютер. Переход к такому управлению позволяет минимизировать количество органов для ручного управления маневрами судна.

**Задачи динамического позиционирования.** Управление продольным, боковым, вращательным движениями корпуса на предельно малых скоростях относится к динамическому позиционированию [15], в котором выделяют задачи:

- простого позиционирования (**DP** – Dynamic Positioning);
- изменения позиции (**DA** – Dynamic Position's Alteration);
- удержания на траектории (**DT** – Dynamic Tracking).

### Задача простого динамического позиционирования

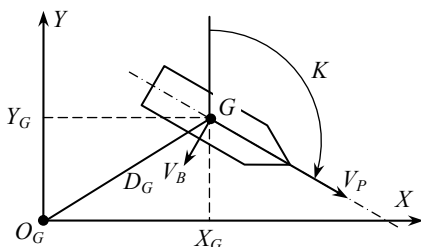


Рис. 10.1. Динамическое позиционирование

заключается в совмещении той или иной точки корпуса судна с заданной точкой акватории  $O_G$  с помощью судовых средств управления. Это место  $O_G$  называется **точкой** или **центром позиционирования**. Точка корпуса судна, которая должна быть совмещена с центром позиционирования, называется **базовой точкой**.

Чаще всего ей является центр массы судна  $G$  (Рис. 10.1).

Динамическое позиционирование может выполняться с неизменной ориентацией диаметральной плоскости судна ( $K_U = const$ ) либо с изменением курса в соответствии с задающей функцией  $K_U(t)$ . Цель **DP** – минимизация отклонений базовой точки судна от точки позиционирования при определенных требованиях к ориентации по курсу

$$X_G = \min ; \quad Y_G = \min .$$

**Задача динамического изменения позиции (DA)** состоит в перемещении базовой точки объекта с определенной малой скоростью (с сохранением или с заданным изменением его ориентации по курсу) из одной точки динамического позиционирования в другую. В этом случае простое позиционирование осуществляется относительно точки  $O_G$ , перемещающейся по прямой линии из места  $O_{G1}$  в положение  $O_{G2}$  с заданной скоростью. К задаче **DA** сводится, в конечном счете, подход судна к причалу в порту и отход от него. При отходе от причала приходится решать эту задачу, пока судно не окажется там, где достаточно места для развития хода, необходимого для управления рулем, и маневрирования с помощью главных средств управления.

**Задача динамического удержания на траектории (DT)** заключается в осуществлении простого позиционирования относительно точки  $O_G$ , которая перемещается по заданному маршруту с установленной малой скоростью. Ориентация по курсу в этом случае может быть либо постоянной, либо изменяться требуемым образом. Задача **DA** может рассматриваться как частный случай **DT**.

### Особенности решения задачи позиционирования.

Динамическое позиционирование существенно отличается от традиционных задач управления движением судна. Объект здесь перемещается с предельно малой скоростью. Поэтому гидродинамические силы на руле и на корпусе, вызванные собственным движением судна, малы. Они не оказывают заметного влияния на динамику процессов управления. Кроме того, при выполнении позиционирования, как правило, используется работа главных двигателей в режимах малого хода. При работе двигателя на передний ход возникающая на отклоненном руле боковая сила от струи винта мала. Ее может быть недостаточно для преодоления внешних возмущений. Определяющими при позиционировании являются силы активных средств управления, ветроволновые воздействия, течение.

При управлении позиционированием судна необходимо сначала найти силы и моменты, обеспечивающие решение этой задачи, а затем определить требуемые для создания таких управляющих воздействий режимы совместной работы средств управления. В современных системах эта задача возлагается на компьютер.

Задача позиционирования обычно разделяется на две самостоятельные задачи: **поступательного перемещения** и **вращения**. При выполнении позиционирования эти элементарные задачи могут решаться последовательно (сначала перемещение потом вращение, либо наоборот) или одновременно.

Автоматизация процессов позиционирования требует наличия:

- точной информации о положении базовой точки и курсе судна;
- непрерывного отображение процесса перемещения выраженного в масштабе корпуса судна на электронной карте;
- возможности простого задания точек позиционирования, маршрута перемещения, а также функции, определяющей изменение ориентации корпуса;
- алгоритмов и программ управления позиционированием.

Решения этих вопросов стало возможным с появлением DGPS и ECDIS. ECDIS предоставляет возможность простого задания новой позиции, планирования траектории судна и отображения процесса позиционирования на карте. DGPS обеспечивает прецизионные определения места судна. Достаточно точную информацию о курсе судна дает гироскопас.

**Режимы позиционирования.** Для судов, полная управляемость которым нужна по роду их работы, задача автоматизации процессов позиционирования выполнена в полном объеме [37]. Современные **DP/**

**DT**-системы (Dynamic Positioning and Dynamic Tracking Systems) надежно выполняют свои функции. Они могут иметь режимы:

- ручного дистанционного управления движением корпуса с помощью джойстика и кноба;
- ручного управления плоскопараллельным движением с помощью джойстика с автоматической стабилизацией курса;
- автоматического динамического позиционирования с ручным управлением ориентацией по курсу;
- автоматического **DP** и стабилизации курса;
- автоматического **DP** с автоматической оптимизацией ориентации по курсу по критерию минимума расходуемых энергоресурсов;
- автоматической динамической проводки по маршруту с ручным управлением путевой скоростью и ориентацией по курсу;
- автоматической **DT** с автоматической стабилизацией путевой скорости и с ручным управлением ориентацией по курсу;
- автоматической **DT** с ручным управлением путевой скоростью и с автоматической стабилизацией курса параллельно линии маршрута либо под заданным углом к ней;
- автоматической **DT** с автоматической стабилизацией путевой скорости и с автоматической стабилизацией курса параллельно линии маршрута либо под заданным углом к ней.

**Разработка, исследование и доводка алгоритмов управления** позиционированием для судов с различными пропульсивными комплексами проводится в настоящее время с помощью математического моделирования процессов позиционирования, без использования для этой цели дорогостоящих натуральных испытаний. Современные методы математического моделирования движения судов с различными средствами управления удовлетворяют по точности требованиям синтеза алгоритмов **DP/DT**-систем и значительно ускоряют процесс ввода судов с этими системами в эксплуатацию.

**Отображение управляемого процесса.** Современные **DP/DT**-системы являются компьютерно управляемыми. Значения кинематических параметров судна, данных работы средств управления и возмущающих факторов отображаются в этих системах на дисплее параметров управления (Conning display) [39]. Пульт управления судном с органами управления **DP/DT**-системы фирмы IHC SYSTEMS (Голландия) представлен на рис. 10.2.

Справа на пульте расположен джойстик вместе с другими органами **DP/DT**-системы и Conning display. В центре помещены штатные органы дистанционного управления главными двигателями



судна, его подруливающими устройствами и рулем. Слева находится экран ECDIS и клавиатура для управления этой системой.



Рис. 10.2. Пульт управления *DP/DT*-системы.

**Электронные маневровые системы.** На транспортных полностью управляемых на малых скоростях судах применяются в основном электронные системы с ограниченной автоматизацией процессов позиционирования. Они называются *системами дистанционного автоматического управления позиционированием (ДАУП)*, либо *электронными маневровыми системами* или *джойстиковыми дистанционными системами управления судном*. Эти системы устанавливаются на пассажирских лайнерах и паромов, ро-ро судах, буксирах спасателях, танкерах, газовозах и других судах, деятельность которых связана с частыми маневрами при малых скоростях движения или с необходимостью обеспечения повышенной безопасности.

Системы ДАУП упрощают выполнение маневров, задаваемых судоводителем параметрами поступательного и вращательного движения корпуса. По этим параметрам система ДАУП автоматически определяет режимы работы главных и вспомогательных средств управления, при которых обеспечивается желаемое перемещение корпуса судна, и управляет этими средствами. Современные джойстиковые маневровые системы являются компьютеризованными. Они имеют режимы:

- ручного управления движением корпуса с помощью джойстика и кноба;
- ручного управления плоскопараллельным движением с помощью джойстика с автоматической стабилизацией курса.

Разрабатываются системы ДАУП обычно в нескольких модификациях, чтобы быть пригодными для судов с различными пропульсивными схемами и характеристиками корпуса.

## 10.2. Конфигурация маневровой системы

В настоящее время на судах эксплуатируются разные виды систем ДАУП. Они отличаются по конструкции, режимам управления и другими элементами. Ниже рассматривается одна из систем фирмы **Kamewa** (часть корпорации Rolls-Royce), базовая конфигурация которой включает два модуля: пульт управления и блок команд. Эта система может иметь выносные посты управления.

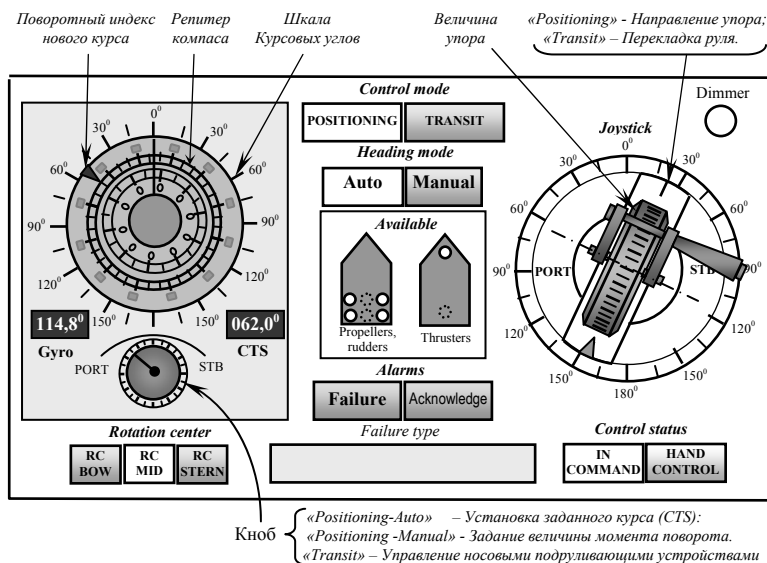


Рис. 10.3. Пульт управления системы ДАУП

**Пульт управления системой.** Пульт рассматриваемой системы содержит переключатели и рукоятки для задания команд управления движением, устройства индикации и сигнализации (рис.10.3.), а также Conning display, который на рисунке не показан. Переключатели режимов управления и видов работы системы состоят из зависимых кнопок с подсветкой, подтверждающих их активацию.

На пульте управления системы расположены:

- включатель системы в работу (*Control status*) с кнопками для включения (**IN COMMAND**) и отключения (**HAND CONTROL**);
- цифровой указатель гирокомпасного курса (**Gyro**);
- цифровой указатель задаваемого курса (**CTS - course to steer**), используемый в режиме «**AUTO**»;
- репитер ГК;
- круглая рукоятка (*Knob*) для управления курсом;
- переключатель (*Rotation center*) трех видов вращения корпуса судна с центром поворота в носу (**RC BOW**), на мидельшпангоуте (**RC MID**), в корме (**RC STERN**);
- переключатель (*Control mode*) режимов позиционирования (**POSITIONING**) и переходного (**TRANSIT**);
- переключатель (*Heading mode*) двух видов управления курсом: автоматического (**AUTO**) и ручного (**MANUAL**);
- индикатор (*Available*) подключенных к системе силовых органов;
- световой сигнализатор неисправности системы (**Failure**);
- кнопка подтверждения принятия сигнала о неисправности (*Acknowledge*);
- индикатор вида неисправности (*Failure type*);
- регулятор освещения пульта (**DIMMER**);
- рукоятку (*Joystick*) для управления плоскопараллельным движением судна.

**Блок команд** является вычислительным устройством, которое в зависимости от вида команды вырабатывает сигналы управления силовыми органами, обеспечивающие выполнение поданной команды.

### 10.3. Режимы управления

Рассматриваемая система ДАУП имеет два режима управления: основной – «**POSITIONING**» (Позиционирование) и дополнительный – «**TRANSIT**» (Транзитный). В других системах ДАУП дополнительный режим может отсутствовать.

**Основной режим управления** (**POSITIONING**) реализует полные возможности системы в управлении перемещением корпуса путем использования всех силовых средств. Этот режим применяется при маневрировании на предельно малых скоростях хода.

Величина и направление упора для поступательного перемещения корпуса судна задается джойстиком. Для установки параметров вращательного движения служит knob. **Джойстик** является линейным бесступенчатым управляющим средством. *Поворот джойстика* в плоскости пульта задает направление результирующей силы упора,

которая должна быть приложена к центру массы судна. Диапазон поворота джойстика в плоскости пульта составляет  $\pm 90^0$  от нуля. Отсчет угла поворота производится по горизонтальной шкале. *Наклон джойстика* определяет модуль результирующей силы упора. Величина наклона джойстика контролируется по специальной шкале.

В основном режиме могут быть использованы два вида ориентации по курсу: автоматический (AUTO) и ручной (MANUAL).

**В режиме ручного управления** курс изменяется судоводителем с помощью **кноба**, который служит для задания параметров прикладываемого к корпусу судна вращающего момента. *Сторона, в которую поворачивается кноб*, определяет направление изменения курса. *Угол отворота кноба от нулевого положения* задает величину управляющих сил, обеспечивающих поворот корпуса судна относительно выбранного центра вращения. Стабилизацию курса в ручном режиме, если требуется, выполняет рулевой, устраняя с помощью манипулирования кнобом отклонения от заданного курса.

**В режиме AUTO-ориентации** система автоматически удерживает ДП судна вдоль заданного курса. При включении режима «AUTO» курс судна автоматически начинает стабилизироваться на его значении, которое было в момент включения режима. В процессе маневрирования задаваемый для стабилизации курс может быть изменен на новый.

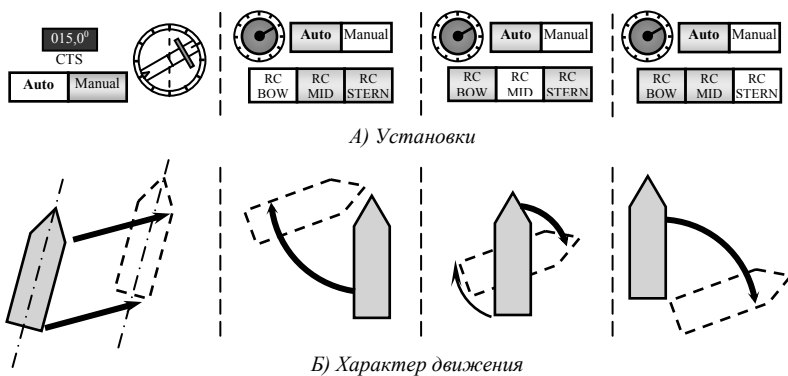


Рис. 10.4. Маневры судна в режиме «Позиционирование»

Значение нового курса устанавливается с помощью кноба и перемещаемого им индекса по грубой шкале репитера ГК. Сторона, в которую поворачивается кноб, задает направление изменения курса. По шкале курсовых углов при установке кнобом индекса на значении нового курса можно определить величину угла поворота. Значение

задаваемого кнобом нового курса отображается на цифровом индикаторе CTS.

После установки нового курса маневровая система автоматически приводит к нему судно, поворачивая корпус относительно выбранного центра вращения. В процессе поворота судна синхронно с грубой шкалой репитера разворачивается и индекс нового курса, приходя, в конечном счете, на курсовую черту. После выхода на новый курс осуществляется его стабилизация, как при выполнении плоскопараллельных перемещений судна, так и без них.

На рис. 10.4. приведена характеристика работы системы в режиме позиционирования при определенных установках задающих органов.

**Дополнительный режим управления** (TRANSIT) применяется при достаточной для управления рулем скорости хода судна. Он по существу является режимом авторулевого.

**В режиме ручной ориентации** (MANUAL) джойстиком устанавливается режим хода и перекладка руля (рулей). Угол поворота джойстика в плоскости пульта задает перекладку руля. Наклон джойстика определяет режим работы главного двигателя.

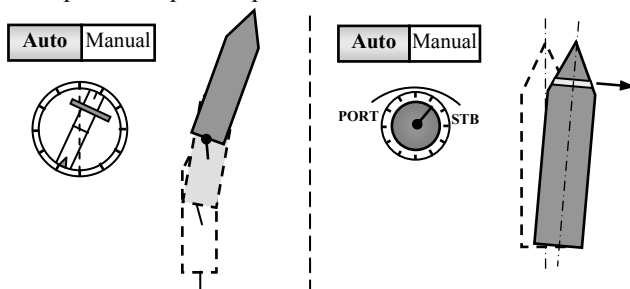


Рис. 10.5. Маневры судна в режиме «Transit»

Кноб в режиме «MANUAL» служит для управления носовыми подруливающими устройствами.

**В режиме AUTO-ориентации** система ДАУП, управляя рулем, автоматически удерживает судно на заданном курсе. Он устанавливается кнобом. После такой установки система приводит судно на новый курс. Таким образом выполняются повороты судна. Джойстик при AUTO-ориентации используется только для задания путем его наклона режима работы главного двигателя. Направление наклона джойстика в этом режиме всегда равно нулю. Подруливающими устройствами при AUTO-ориентации система не управляет.

Характеристика работы системы в режиме TRANSIT при определенных установках задающих органов приведена на рис. 10.5.

## 10.4. Программное обеспечение системы

Программное обеспечение системы представляет собой комплекс программ для управления процессом позиционирования и обеспечения целостности системы. Программы работы маневровой системы помещаются в ее командном блоке.

**Характеристика программ управления.** Алгоритм управления судном, реализуемый в системе ДАУП, выбирается в зависимости от пропульсивной схемы судна и особенностей его динамики. Для доводки алгоритма используется математическое моделирование маневров судов или проводятся специальные натурные испытания.

При позиционировании сила упора и момент, определяющие движение судна, создаются системой из трех компонентов (рис. 10.6): поперечных сил упора  $P_{BH}$ ,  $P_{BK}$  в носу и в корме, продольной силы упора  $P_L$  (переднего или заднего хода). На рисунке обозначено:  $P$ ,  $\alpha$ ,  $P_B$ ,  $P_L$  – результирующая сила упора, ее курсовой угол, боковая и продольная компоненты;  $M$  – момент вращения корпуса;  $L_H$ ,  $L_K$  – расстояние от центра массы судна до точек приложения поперечных сил в носу и в корме судна. Необходимо отметить, что значение  $L_H$  считается положительным, а  $L_K$  – отрицательным. Кроме того, значениям поперечных сил, направленных в сторону правого борта, присваивается знак «+», а в сторону левого борта – «-».

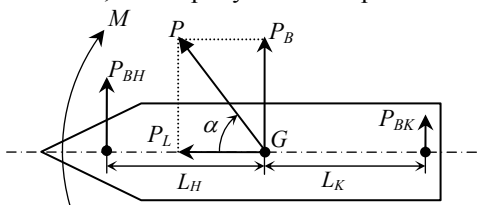


Рис. 10.6. Схема сил на корпусе

Вектор суммы  $P_L$  и  $P_B$  дает результирующую силу упора  $P$  и ее направление  $\alpha$ :

$$P_B = P_{BH} + P_{BK}; \quad P = \sqrt{P_L^2 + P_B^2}; \quad \alpha = \arctan \frac{P_B}{P_L}.$$

Разворачивающий судно момент находится по формуле:

$$M = P_{BH} L_H + P_{BK} L_K.$$

**Принцип расчета сил для поступательного перемещения корпуса.** При управлении судном с помощью маневровой системы величина силы упора и курсовой угол для поступательного перемещения корпуса задаются джойстиком. Обозначим задаваемые джойстиком значения этих параметров как  $P_D$ ,  $\alpha_D$ . По значениям  $P_D$ ,  $\alpha_D$  в блоке команд находятся значения продольного упора  $P_L$  и поперечной силы  $P_B$  в ЦМ судна:

$$P_L = P_D \cos \alpha_D; \quad P_B = P_D \sin \alpha_D.$$

Затем определяются боковые усилия, которые необходимо создать в носу и в корме судна

$$P_{BH} = \frac{P_B}{1 + L_H/L_K}, \quad P_{BK} = \frac{L_H}{L_K} P_{BH}.$$

По рассчитанным значениям  $P_L$ ,  $P_{BH}$ ,  $P_{BK}$  находятся режимы работы средств управления судном.

**Принцип расчета сил для вращения корпуса.** Вид вращения корпуса задается переключателем «*Rotation center*». **В режиме ручного управления курсом** направление поворота корпуса судна и величина момента для его вращения задаются knobом. По этой информации в блоке команд находятся значения поперечных сил в носу  $P_{BH}$  и в корме  $P_{BK}$  судна.

Определение режимов работы средств управления зависит от пропульсивной схемы судна. Если судно *одновинтовое* с туннельными носовыми и кормовыми подруливающими устройствами, то поворот корпуса относительно заданного центра вращения в основном обеспечивается:

- носовыми ПРУ, когда центр вращения задан в корме (RC STERN);
- кормовыми ПРУ, когда RC BOW;
- работой обоих ПРУ в одном режиме, но в сторону разных бортов, когда RC MID.

Во всех этих случаях угол отворота knobа от нулевого положения практически задает величину упора подруливающих устройств.

На *двухвинтовых* судах с носовыми туннельными ПРУ для улучшения управляемости обычно устанавливают два руля в струе

гребных винтов, и используют винты, вращающиеся на переднем ходу в наружную от корпуса сторону. Вращение винтов в противоположные стороны улучшает устойчивость на курсе и обеспечивает симметричную поворотливость при работе винтов в одном режиме.

При работе гребных винтов «враздрай» ими создается разворачивающий судно момент, одна составляющая которого определяется расположением винтов по разные стороны от ДП, т.е. наличием плеча. Вторая большая составляющая момента, ускоряющая поворот, создается боковой силой от наброса в «кормовую раковину» струи винта, работающего на задний ход. Поворот при работе гребных винтов «враздрай» также ускоряется, если рули переложить в сторону борта поворота судна. В этом случае на руле, находящимся за работающим на передний ход винтом, создается боковая сила от струи винта. Увеличение разворачивающего судна момента при работе винтов «враздрай» происходит также за счет разности давлений воды у бортов кормового подзора, создаваемой противоположно направленными струями от винтов.

Программа управления джойстиковой системы двухвинтовых судов обеспечивает различные виды поворотов корпуса, определяя режим работы носовых ПРУ, режимы работы гребных винтов «враздрай», и величину перекладки рулей.

Если двухвинтовое судно имеет носовые и кормовые туннельные подруливающие устройства, то алгоритм управления его позиционированием упрощается. Более широкие возможности для осуществления позиционирования по сравнению с поперечными подруливающими устройствами предоставляют азимутальные ПРУ. В общем случае алгоритмы управления позиционированием полностью определяется составом и особенностями судовых средств управления и особенностями динамики корпуса.

**В режиме АУТО-ориентации** для выработки сигналов управления курсом служит специальный программный модуль, который вырабатывает значения поперечных сил в носу  $P_{ВН}$  и в корме  $P_{БК}$  судна в зависимости от вида вращения и отклонения текущего курса от заданного. После того, как боковые силы вычислены, по ним находят требуемые режимы работы силовых органов.

**Программы контроля целостности** системы служат для обнаружения неполадок в ее работе, диагностики этих неполадок и управления сигнализацией. Обнаружение неполадок производится как программным, так и аппаратным способом.

При обнаружении неполадки на пульте системы начинает светиться индикатор «FAILURE» и подается звуковой сигнал. На



табло «*Failure type*» появляется надпись, характеризующая вид неполадки. Это может быть:

- отсутствие питания (Power failure);
- неисправность компьютера (Computer failure);
- обрыв кабеля (Transmitter cable break);
- отключение одного из средств управления (Bow trusters reduced);
- отклонение в режиме **AUTO**-ориентации от курса на величину, большую заданной (Heading deviation alarm) и другие.

При отключении от системы ДАУП какого-либо средства управления на индикаторе «*Available*» гаснет соответствующая этому средству лампочка.

В случае сигнализации о неполадке при нажатии клавиши «*Acknowledge*» звуковой сигнал исчезает, а индикатор «**FAILURE**» продолжает гореть, пока не будет устранена причина неисправности.

## **Список литературы**

1. Александров В.Л., Матлах А.П., Нечаев Ю.И., Поляков В.И., Ростовцев Д.М. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях/ Под ред. Ю.И.Нечаева. СПб: Изд. центр СПбГМТУ, 2001. – 395 с.
2. Бавин В.Ф. Зайков В.И., Павленко В.Г., Сандлер Л.Б. Ходкость и управляемость судов /Под ред. В.Г.Павленко. – М.: Транспорт, 1991. – 397 с.
3. Басин А.М. Теория устойчивости на курсе и поворотливость судна. - М.: Гостехиздат, 1949. – 228 с.
4. Березин С.Я., Тетюев Б.А. Системы автоматического управления движением судна по курсу. – Л.: Судостроение, 1990. – 256 с.
5. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.
6. Вагушенко Л.Л., Кошовий А.А. Автоматизовані комплекси судноводіння. Підручник для морських академій – Видавництво «КВЦ», Київ, 2000 р. – 292 с.
7. Васильев А.В. Управляемость судов. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
8. Веллер В. Автоматизация судов. Пер. с нем. – Л.: Судостроение, 1975. – 280 с.
9. Гофман А.Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна. – Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.
10. Демин С.И. Торможение судна. – М.: Транспорт, 1975. – 81 с.
11. Демин С.И. Вопросы управления морскими судами. – М.: Рекламбюро ММФ, 1975. – 75 с.
12. Золотов В.В., Фрейдзон И.Р. Управляющие комплексы сложных корабельных систем. - Л.: Судостроение, 1986. – 232 с.
13. Кацман Ф.М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. – М.: Транспорт, 1987. – 223 с.
14. Корнилов Э.В., Бойко П.В. Системы дистанционного автоматизированного управления судовыми двигателями. – Одесса, Фенікс, 2006. – 260 с.
15. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. Учебник. – СПб.: «Элмор», 2002. – 360 с.
16. Макаров С.О. Рассуждения по вопросам морской тактики. – М.: Военмориздат, 1943.
17. Мальцев А.С. Управление движением судна. – Одесса: Весть, 1995 – 232 с.

18. Мамиконов А.Г. Принятие решений и информация. М.: Наука, 1983 – 184 с.
19. Мاستушкин Ю.М. Управляемость промысловых судов. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 232 с.
20. Орлов В.А. Автоматизация промыслового судовождения. – М.: Агропромиздат, 1989. – 256 с.
21. Першиц Р.Н. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983. – 272 с.
22. Самсонов В.И., Худов Н.И. Двигатели внутреннего сгорания морских судов. Учебник для высш. учеб. заведений. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1990. – 368 с.
23. Сизов В.Г. Теория корабля. – Одесса, Феникс, 2003. – 284 с.
24. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. – Л.: Судостроение, 1976. – 476 с.
25. Справочник по теории корабля / В.Ф.Дробленков, А.И.Ермолаев, Н.П.Муру и др. – М.: Воениздат, 1984. – 589 с.
26. Справочник по теории корабля. Том 3. /Под ред. Я.И.Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.
27. Справочник судового механика по рулевым приводам / В.Н.Васильев, А.А.Горин, И.С.Мирошниченко. – Одесса: Маяк, 1982. – 199 с.
28. Ткаченко А.Н. Судовые системы автоматического управления и регулирования. – Л.: Судостроение, 1984. – 288 с.
29. Третьяк А.Г., Козырь Л.А. Практика управления морским судном. – М.: Транспорт, 1988. – 112 с.
30. Управление крупнотоннажными судами / В.И.Удалов, И.Ф.Массанюк, В.Г.Матевосян, С.Б.Ольшамовский. – М.: Транспорт, 1986. – 229 с.
31. Управление судами и составами / Н.Ф.Соларев, В.И.Белоглазов, В.А.Тронин и др.: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 296 с.
32. Управление судном /С.И.Демин, Е.И.Жуков, Н.А.Кубачев и др.: Под ред. В.И.Снопкова.: Учебник для вузов. – М.: Транспорт. 1991. – 359 с.
33. Федяевский К.К., Соболев Г.В. Управляемость корабля. – М.: Судпромгиз, 1963. – 376 с.
34. Харин В.М. Судовые гидравлические рулевые машины: Учеб. пособ. – Одесса: Феникс, 2005. – 280 с.
35. Eda H, Crane, C.L. Jr. 'Steering Characteristics of Ships in Calm Water and Waves'. Trans. SNAME, 1965, pp. 135-177.

36. Euan W. McGookin, David J. Murray-Smith, Yun Li, and Thor I. Fossen. Parameter optimisation of a non-linear tanker control system using genetic algorithms. In *Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, 1997.
37. First fully integrated navigation bridge on DEME hopper suction dredger. Offshore Visie – Aug/Sept 1999.
38. Jasmin Velagic, Zoran Vukic, and Edin Omerdic. Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping. In *Manoeuvring and Control of Marine Craft*, 2000. Proceedings of the 5th IFAC Conference.
39. Koolhaas, C.P., Design of Man-Machine interface for Dynamic Tracking/ Dynamic Positioning Systems of a Trailing Hopper Dredger. M.Sc. thesis Univ. of Tech. Delft (Dec. 1998).
40. McCallum, I.R. 'A ship steering mathematical model for all manoeuvring regimes'. AVIMAR, 1985.- 21 p.
41. Morten Breivik and Thor I. Fossen. Path following for marine surface vessels. In *Oceans*, 2004.
42. Nomoto, K. 'Response Analysis of Manoeuvrability and its Application to Ship Design'. 60 Anniv. Series. Vol. 11, Soc. Nav. Archs. Japan.
43. Pettersen K. Y. and Lefeber E. Way-point tracking control of ships. In *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 2001.
44. Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons Ltd., 1994.

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ.</b>	<b>3</b>
<b>Основные обозначения</b>	<b>5</b>
<b>1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УПРАВЛЕНИИ</b>	<b>9</b>
1.1. Система управления .....	9
1.2. Информация – основа управления .....	13
1.3. Основные виды управления .....	15
1.4. Условия осуществимости управления .....	21
1.5. Эффективность систем управления .....	24
1.6. Этапы и методы принятия решений .....	26
1.7. Автоматизация систем управления .....	29
1.8. Классификация систем автоматического регулирования и их характеристики .....	34
1.9. Интегрированные системы управления .....	37
1.10. Обеспечения качества интегрированных систем .....	43
<b>2. УПРАВЛЯЕМОСТЬ СУДОВ</b>	<b>48</b>
2.1. Общие сведения о судне как объекте управления движением .....	48
2.2. Управляемость судна, ее виды и особенности .....	52
2.3. Управляемость по курсу, обеспечиваемая рулем .....	54
2.4. Управляемость по скорости, обеспечиваемая ГДУ .....	60
2.5. Особенности управляемости двухвинтовых судов .....	64
2.6. Оценка управляемости и ее критерии .....	68
2.7. Понятие о влиянии различных факторов на управляемость судна .....	74
2.8. Некоторые сведения из теории крыла .....	82
<b>3. КОРПУС СУДНА КАК ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ</b>	<b>87</b>
3.1. Геометрические характеристики корпуса и их влияние на управляемость судна .....	87
3.2. Основные системы координат, кинематические параметры судна .....	91
3.3. Инерционные силы и моменты .....	93
3.4. Гидродинамические характеристики корпуса .....	94
3.5. Аэродинамические силы на корпусе судна .....	97
3.6. Силы и моменты от действия волн .....	99
3.7. Влияние дифферента на динамические характеристики корпуса .....	102
3.8. Влияние мелководья на гидродинамические характеристики корпуса .....	103

<b>4. ГЛАВНЫЕ ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА</b>	<b>105</b>
4.1. Назначение и состав ГДУ.....	105
4.2. Общие сведения о судовых дизелях .....	109
4.3. Основные характеристики двигателя как объекта управления .....	118
4.4. Механизм поворота лопастей ВРШ .....	123
4.5. Гребные винты и их геометрические характери .....	126
4.6. Кинематические и гидродинамические характеристики гребных винтов .....	129
4.7. Поворотные пропульсивные системы .....	135
<b>5. РУЛЕВЫЕ УСТРОЙСТВА</b>	<b>141</b>
5.1. Общие сведения о рулевом устройстве .....	141
5.2. Рулевой привод и предъявляемые к нему требования ...	142
5.3. Характеристики рулевого привода .....	146
5.4. Рули, их классификация и геометрические характеристики .....	148
5.5. Кинематические характеристики рулей .....	152
5.6. Гидродинамические характеристики рулей .....	156
5.7. Подруливающие устройства.....	158
<b>6. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДНА</b>	<b>165</b>
6.1. Математическая модель движения надводного судна ...	165
6.2. Частные математические модели судна .....	171
6.2.1. Модели судна как объекта управления курсом .....	172
6.2.2. Модель системы «АР-судно» как ОУ боковым смещением .....	174
6.2.3. Модель судна как объекта управления скоростью хода .....	175
6.3. Статические и переходные характеристики судна .....	176
6.4. Статические характеристики управляемого рулем судна .....	176
6.5. Показатели поворотливости судна при ветре .....	181
6.6. Переходные функции судна, управляемого рулем .....	184
6.7. Частотная характеристика поворотливости судна .....	190
6.8. Статические характеристики судна, управляемого гребным винтом.....	192
6.9. Переходные характеристики управляемого гребным винтом судна .....	194
<b>7. УПРАВЛЯЮЩАЯ КУРСОМ СУДНА СИСТЕМА</b>	<b>199</b>
7.1. Общие сведения .....	199
7.2. Требования к управляющей курсом системе.....	201
7.3. Режимы управления курсом .....	204
7.4. Функции авторулевых.....	205
7.5. Формальная постановка задачи управления курсом и	

схемы ее решения .....	210
7.6. Стабилизация курса .....	213
7.6.1. Принцип решения задачи стабилизации курса .....	213
7.6.2. Назначение составляющих ПИД-алгоритма .....	215
7.6.3. Анализ эффективности алгоритма управления .....	218
7.7. Выполнение поворотов .....	221
7.8. Фильтрация волнового рыскания .....	227
7.9. Настройка авторулевых .....	233
7.10. Адаптивные авторулевые .....	237
7.11. Авторулевые с элементами искусственного интеллекта .....	242
<b>8. СИСТЕМА ВОЖДЕНИЯ СУДНА ПО МАРШРУТУ</b> .....	<b>251</b>
8.1. Назначение и режимы СВМ .....	251
8.2. Требования к СВМ .....	253
8.3. Структура системы .....	255
8.4. Алгоритмы вождения по маршруту .....	257
8.4.1. Режим вождения «по линии маршрута» .....	257
8.4.2. Режим вождения «от WP к WP» .....	262
8.5. Оперативное изменение маршрута для расхождения с судами и препятствиями .....	264
<b>9. ЭЛЕКТРОННЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ СКОРОСТЬЮ СУДНА СИСТЕМЫ</b> .....	<b>270</b>
9.1. Понятие о системе управления скоростью хода .....	270
9.2. Требования к системе дистанционного управления главным двигателем .....	274
9.3. Назначение и классификация систем, управляющих скоростью судна .....	277
9.4. Структура одной из управляющих скоростью судна систем .....	279
9.5. Основные функции системы .....	282
9.6. Программное обеспечение СДАУ <sub>ГД</sub> .....	292
9.7. Интеграция системы управления скоростью судна с системой ее планирования .....	296
<b>10. СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СУДНА</b> .....	<b>307</b>
10.1. Назначение систем динамического позиционирования .....	307
10.2. Конфигурация маневровой системы .....	313
10.3. Режимы управления .....	314
10.4. Программное обеспечение системы .....	317
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>321</b>





Вагущенко Леонід Леонідович, Цимбал Миколай Миколайович

## **Системи автоматичного управління рухом судна**

**Вагущенко Л.Л., Цимбал М.М.**

**Системи автоматичного управління рухом судна.** – 3-е вид., перероб. і доп. – Одеса: Фенікс, 2007. – 328 с.

Рос. мовою.

ISBN

**Видається за авторською редакцією з готового оригіналу-макету**

Підписано до друку \_\_\_\_\_. Формат 60х84/16.

Обл. -вид. арк. \_\_\_\_\_. Ум.-друк. арк. \_\_\_\_\_. Зам. № \_\_\_\_\_

---

Видавник і виготовлювач ПП „Фенікс”

(свідотство ДК № 1044 від 17.09.2002)

65009, м.Одеса, вул. Зоопаркові, 25, тел. (0482) 7777-591

Для листів: 65059, м.Одеса, а/с 424