

Оснoвы автоматики и автоматизаци и СЭУ

Г.Б. Горелик

Введение

Широкое внедрение автоматизации судовых энергетических установок на морском и речном транспорте ставит перед инженерно-техническим персоналом, эксплуатирующим судовую технику, новые задачи и предъявляет высокие требования к квалификации работников.

Научно-технический прогресс на водном транспорте проявляется в создании новых комплексно-автоматизированных судов. Это обстоятельство требует более высокой подготовленности судовых механиков, способных не просто эксплуатировать автоматизированные объекты, но и повышать технико-экономическую эффективность работы судовых энергетических установок путем применения практических и теоретических методов оптимизации процессов регулирования и управления сложными объектами.

Меняются функциональные обязанности судовых механиков. Больше внимание приходится уделять вопросам наладки и оптимизации работы средств судовой автоматики. Практически состоялся процесс вывода машинной команды из машинно-котельного отделения судов за счет широкого внедрения средств дистанционного автоматизированного управления энергетическими объектами, централизованных систем контроля и комплексных систем управления. Это позволило существенно улучшить условия труда и быта моряков, сократить численность экипажей при увеличении ресурса и надежности работы механизмов, что повышает безопасность мореплавания.

Требования к средствам автоматизации судовых энергетических установок регламентируются Правилами Регистра России и правилами иностранных классификационных обществ, которые исходят из условия обеспечения безопасности плавания судов.

Увеличение степени и объема автоматизации судов вызывает необходимость подготовки высококвалифицированных

специалистов, способных освоить и эксплуатировать современные автоматизированные силовые установки, обеспечивая их экономичную и надежную работу.

Автор приносит искреннюю благодарность ассистенту кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» ХГТУ В. П. Смирнову и студенту А. Ю. Чистякову за техническую помощь, оказанную при подготовке рукописи учебного пособия.

Глава 1. Основные понятия, терминология и задачи судовой автоматики

Считается, что первым автоматическим регулятором был регулятор уровня воды в котле паровой машины, изобретенный и изготовленный И.И. Ползуновым в 1765 г. В этой системе поплавков (измерительное устройство) непосредственно перемещает задвижку на входе жидкости в бак [8]. Уровень является здесь регулируемым параметром, задвижка - регулирующим органом, поплавков с приводом к задвижке – регулятором, а котел – объектом регулирования. Если увеличивается отвод жидкости из котла, то поплавков, опускаясь, открывает задвижку, увеличивает подвод жидкости в котел и уровень воды автоматически восстанавливается.

В 1784 г. Джеймс Уатт снабдил свою паровую машину центробежным регулятором частоты вращения вала машины. Регулятор [8] представлял собой вертикальный валик, приводимый во вращение от вала паровой машины, на свободном конце валика были шарнирно закреплены рычаги с большими шаровыми грузами. При вращении валика центробежные силы грузов перемещали рычаги и через соединительные элементы передавали воздействие на задвижку в паропроводе. В результате, если обороты машины возрастали по отношению к заданному скоростному режиму, то задвижка, опускаясь, уменьшала подвод пара к цилиндру, и, наоборот, при уменьшении оборотов вала задвижка увеличивала подвод пара, соответственно увеличивалась частота вращения. В результате поддерживалась частота вращения в определенном диапазоне (в пределах статической ошибки регулирования) независимо от изменения нагрузки на валу машины. Здесь паровая машина является объектом регулирования, частота вращения – регулируемый параметр, валик с центробежными грузами и соединительными элементами – регулятор, а задвижка – регулирующий орган. В настоящее время центробежные регуляторы применяются во всех энергетических установках.

В современных судовых энергетических установках обеспечивается автоматическое регулирование таких параметров, как частота вращения, уровень в емкостях, давление и температура воды и масла, мощность и др.

Система автоматического регулирования, как минимум, состоит из объекта, регулирующего органа и автоматического регулятора, т.е. представляет собой замкнутую систему, обеспечивающую поддержание регулируемого параметра в заданном диапазоне.

Система автоматического регулирования выполняет связанные между собой функции:

1. При неизменном режиме работы объекта система поддерживает заданное значение регулируемой величины, этот вопрос рассматривается в разделе «С т а т и к а р е г у л и р о в а н и я».
2. Управление переходными процессами, связанными с переходом объекта с одного режима работы на другой, этот вопрос рассматривается в разделе «Д и н а м и к а р е г у л и р о в а н и я».
3. Обеспечение устойчивости работы системы при изменении режима или при внешнем воздействии на объект возмущающих сил, этот вопрос рассматривается в разделе «У с т о й ч и в о с т ь р е г у л и р о в а н и я».

Р е г у л и р о в а н и е м называется процесс поддержания в заданных пределах какой-либо величины (регулируемого параметра) в двигателях, агрегатах или установках.

Процесс регулирования, осуществляемый без участия человека, но при помощи регулятора, называется а в т о м а т и ч е с к и м р е г у л и р о в а н и е м.

Изменяющиеся внешние условия, влияющие на режим работы, называются в н е ш н и м и в о з м у щ е н и я м и.

Процесс регулирования направлен на компенсацию регулятором влияния внешних воздействий путем у п р а в л я ю щ е г о в о з д е й с т в и я.

Регулируемый объект и регулятор, соединенные между собой, образуют замкнутую цепь, называемую контуром регулирования.

Система регулирования с одной регулируемой величиной, состоящая из элементов со своими связями, которые образуют только один контур, называется одноконтурной [2].

§ 1.1. Общие вопросы судовой автоматики, терминология

Автоматизация судовых энергетических установок (СЭУ) – важнейшее направление технического прогресса в мировом судостроении. При этом решается вопрос вывода машинной команды из машинно-котельного отделения (МКО) судна, решаются вопросы перехода к безвахтенному обслуживанию судовых технических средств (СТС) и сокращению общей численности технического персонала при передаче функций маневрирования СЭУ непосредственно в руки судоводителя, обеспечиваются постоянный контроль за работой СТС, сигнализация и защита судовых объектов.

В зависимости от объема средств автоматизации Морской Регистр РФ присваивает судну знак автоматизации A_1 или A_2 , что отражается в квалификационном свидетельстве судна.

Знак A_2 присваивается, если объем автоматизации СЭУ достаточен для ее безопасной работы при отсутствии постоянной вахты в МКО, но при наличии вахты на центральном посту управления (ЦПУ).

При этом должны быть обеспечены возможности дистанционного запуска (останова) главных и вспомогательных двигателей (ГД и ВД), изменение режима работы всех механизмов МКО. Суда со знаком A_2 в символе класса должны быть оборудованы системами автоматизации (СА) в объеме, позволяющем проводить дистанционное автоматическое управление (ДАУ) с мостика, ходовой рубки главными механизмами и двигателями. Главное, безопасность эксплуатации судна должна быть не меньшей, чем на судах с вахтой в МКО.

Знак автоматизации A_1 предполагает нормальную работу всех механизмов МКО без местного обслуживания и дистанционного контроля из ЦПУ, ходовой рубки и других мест с применением контроля только по обобщенной сигнализации (ОС). Суды, оснащенные средствами автоматизации, но не удовлетворяющие вышеизложенным требованиям, соответствуют знаку A_3 .

ДАУ – управление, с помощью которого можно задавать желаемый режим работы механизма, воздействуя на элемент управления так, что в дальнейшем механизм самостоятельно выполняет все промежуточные действия по заложенному в системе алгоритму, обеспечивая заданный режим.

АПС (аварийно-предупредительная сигнализация) обеспечивает сигнализацию о достижении контролируемыми параметрами установленных предельных значений и об изменении нормального функционирования. Сигнализация может быть звуковой (ревун, колокол громкого боя, звонок) и световой.

Система индикации (СИ) обеспечивает получение информации о величинах, определенных физических параметров или об изменении определенных состояний механизмов.

Система автоматизации (СА) – это совокупность элементов и устройств, предназначенная для создания конструктивного и функционального целого и для выполнения определенных функций в области управления, контроля и защиты судовых технических средств (СТС). Например, система ДАУ, включает в себя элементы передачи сигнала задания на дистанцию, автоматический регулятор частоты и сам управляемый механизм с системой АПС.

Устройство автоматизации (УА) – часть СА, составленная из элементов, соединенных в одно конструктивное и функциональное целое. Например, автоматический регулятор частоты.

Элемент СА – это самостоятельный в конструктивном отношении прибор (устройство), используемый в СА, например, реле (комбинированное реле давления или температуры), дат-

чик, сигнализатор, усилитель, исполнительный механизм (ИМ).

Автоматизированными объектами (АО) могут быть: двигатель, компрессор, котел, судовая система или другие механизмы, оборудованные системами автоматического регулирования, управления, контроля и защиты.

Регулятор – это устройство, воспринимающее отклонение регулируемого параметра от заданного значения и воздействующее на процесс в сторону его восстановления.

Регулируемый параметр представляет собой показатель, характеризующий состояние происходящего в объекте регулирования процесса, например, частота вращения, температура воды (масла), давление пара, уровень в барабане котла и т.д.

Датчик – источник информации, выходной сигнал которого соответствует текущему значению контролируемого параметра объекта. Датчик обеспечивает аналоговый непрерывный характер сигнала.

Сигнализатор – это источник информации, выходной сигнал которого дискретно (прерывисто) изменяется при достижении контролируемым параметром заданного значения.

§ 1.2. Структура и виды задач судовой автоматики

Система автоматического регулирования (САР) обеспечивает работу механизма (агрегата) по заданному режиму с сохранением необходимых значений параметров, характеризующих этот режим. Сам агрегат является при этом регулируемым объектом (О). САР состоит как минимум из объекта и регулирующего устройства (автоматического регулятора (Р)). Воздействие на объект Р оказывает через регулирующий орган (РО), который изменяет подвод или отвод энергии (q_n, q_{om}) к О. Например, РО изменяет подачу топлива, подвод пара, проходное сечение и т.п.

Параметр, который поддерживается САР в заданных пределах, называется регулируемым параметром. При этом регулируемый параметр конкретизирует назначение САР, например, САР_ч – система автоматического регулирования частоты, САР_т – температуры, САР_д – давления.

Причина, заставляющая О выйти из заданного режима, называется возмущением. Характерными видами возмущения могут быть «толчок», «скачок», гармонические колебания и т.п. На рис.1 представлена структурная схема классической САР. Под структурной схемой понимается простейшее представление элементов СА в виде прямоугольников, окружностей, стрелок и других обозначений, в том числе буквенных.

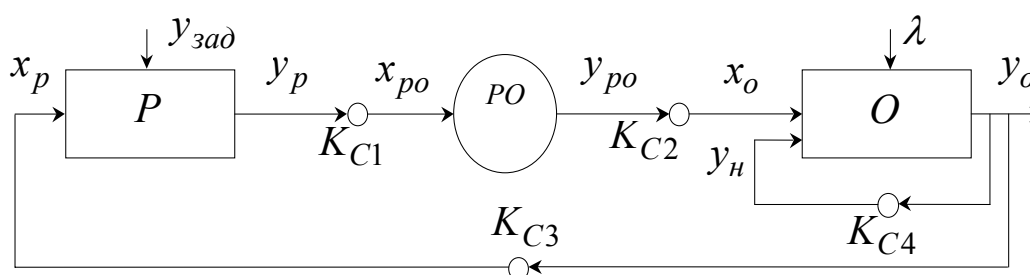


Рис. 1. Структурная схема САР

Функциональная схема – это упрощенное изображение САР или ее элементов на уровне эскиза или чертежа [2, 9, 10].

Стрелки на структурной схеме указывают направление возмущения и обработки элементами САР на эти возмущения. В САР имеются обратные связи. Но обратная связь, проходящая через регулятор, называется главной обратной связью. Так, на рис.1 главная обратная связь проходит от выходной координаты объекта y_o , через кинематическую пару с коэффициентом статической передачи K_{C3} , через регулятор P , кинематиче-

скую пару с Kc_1 , регулирующий орган РО и кинематическую пару с Kc_2 на входную координату объекта x_0 .

Дополнительная обратная связь проходит от выходной координаты О через кинематическую пару Kc_4 на координату входа в объект y_n .

Из структурной схемы САР следует, что она является замкнутой системой звеньев направленного (детектирующего) действия. На структурной схеме показаны входные и выходные координаты звеньев или в абсолютном (размерном), или в относительном (безразмерном) выражении. Желательно вводить безразмерные выражения, которые обозначаются прописными буквами.

Объект имеет координаты входа (x_0) и нагрузки (λ), координату выхода (x_p) и ($y_{зад}$), а координата выхода (y_p). Координата λ указывает, что объект работает на потребитель. У регулятора координату $y_{зад}$ называют координатой настройки регулятора, определяющей выбор его статической характеристики и, следовательно, диапазон работы.

Кинематические пары (маленькие окружности) могут быть различного типа, например, шестеренная передача с коэффициентом статической передачи $Kc_3 = \frac{x_p}{y_0}$, рычажная передача

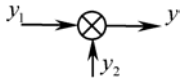
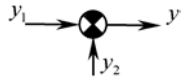
$Kc_1 = \frac{x_{p0}}{y_p}$ и т.п. В любом случае коэффициент статической

передачи – это отношение выходной координаты к входной.

Каждое звено САР имеет свой коэффициент статической передачи. Например, для регулятора $K_p = \frac{y_p}{x_p}$. Если размерно-

сти входной и выходной координаты различны, то выражение приводят к безразмерному виду. Так, y_p имеет размерность

[м], x_p - [с⁻¹] и $K_p = \frac{y_p}{x_p} \cdot \frac{x_{p \text{ ном}}}{y_{p \text{ ном}}}$. В выражение вводят номинальные паспортные параметры элемента, определяющие весь диапазон его изменения.

Кинематические пары могут иметь иной физический смысл, например,  читается как $y = y_1 + y_2$,  - через y_2 проходит отрицательная связь $-y_2$ и результат получится как $y = y_1 - y_2$.

САР может находиться в состоянии равновесия или в состоянии переходного процесса (статика и динамика регулирования). Вследствие внесенного в САР возмущения происходит отработка всех звеньев системы на это возмущение. Структурная схема наглядно отражает участие и роль каждого звена и элемента в данном процессе. При изучении САР рассматривают отдельно свойства всех звеньев, образующих систему как в равновесных режимах (статика), так и на переходных режимах (динамика). Зная статику и динамику каждого звена САР, можно выполнять анализ (разложение на простейшие элементы) и синтез (структурирование и создание) сложных систем.

Следует особо выделить вопрос об устойчивости САР и ее элементов. Если после переходных процессов, вызванных внесенным в САР возмущением, наступает равновесный режим, то говорят, что САР устойчива. Если возникает расходящийся процесс, то САР определяют как неустойчивую. В случае вывода системы на режим незатухающих периодических колебаний считают, что САР является консервативной системой.

На практике реализуются три вида задач регулирования.

1. Статическое регулирование:

а) Статическое регулирование, т.е. регулирование с определенной ошибкой, которую называют степенью неравномерности регулирования δ или статизмом САР (рис. 2). В некото-

рых случаях ошибку регулирования называют наклоном статической характеристики.

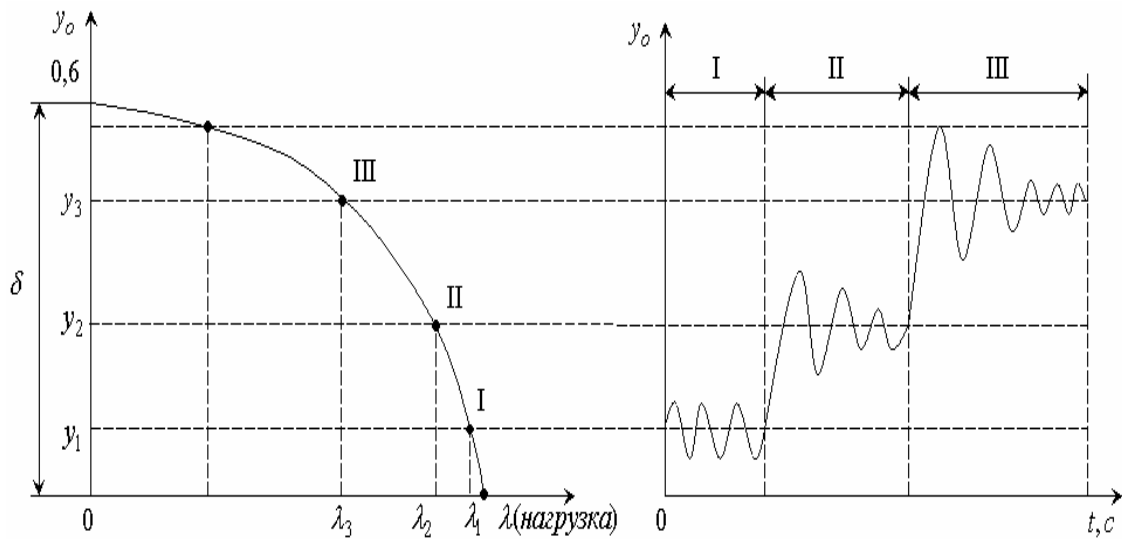


Рис. 2. Статическое регулирование

При этом зависимость $y_0 = f(\lambda)$, полученную для САР на рис.1, при работе объекта на регуляторе с фиксированной координатой задания ($y_{зад} = const$) называют статической характеристикой САР или регуляторной характеристикой. При изменении режима нагружения (в данном случае путем последовательного динамического наброса нагрузки от λ_1 до λ_3) после некоторого переходного процесса с динамическим забросом параметра y_0 устанавливается равновесный режим при y_1 , y_2 и y_3 соответственно. Регулируемый параметр при изменении нагрузки не восстанавливается, имеет место ошибка регулирования. В данном случае при статическом или динамическом переходе от нулевой нагрузки до полной ($\lambda = 1$) y_0 изменится на величину 0,6 (или на 60%). Степень неравномерности статической характеристики САР (или ее статизм, или ее наклон к оси регулируемого параметра, или остаточная ошибка регулирования) будет равна $\delta = 60\%$.

б) Астатическое регулирование, т.е. ошибка регулирования равна нулю при любом изменении нагрузки (рис. 3).

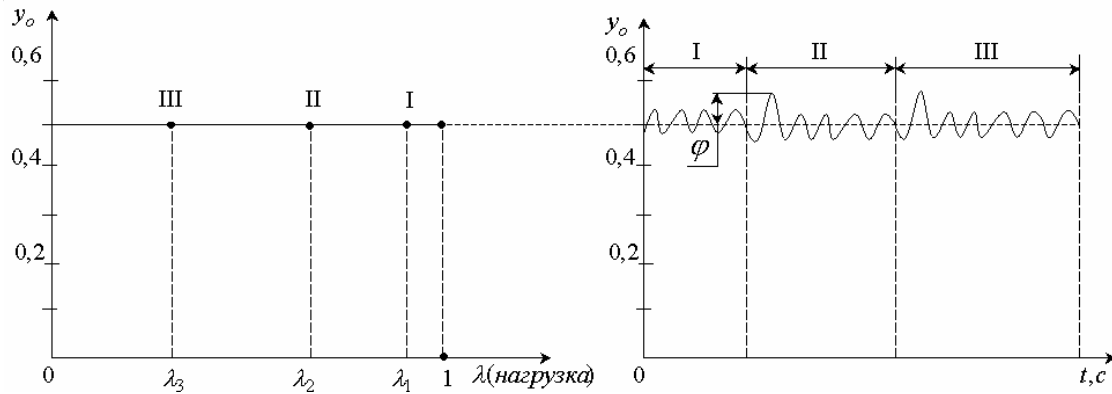


Рис. 3. Астатическое регулирование

Наклон статической характеристики САР, выраженный величиной ее проекции на ось y_0 , равен нулю. По сути это частный случай статического регулирования. Это точное регулирование при степени неравномерности характеристики $\delta = 0\%$. При переходе с одного режима нагружения на другой имеет место переходный процесс с динамическим забросом регулируемого параметра φ .

2. Программное регулирование (рис. 4).

Программа	
Нагрузка	Значение y_o
I (λ_1)	y_1
II (λ_2)	y_2
III (λ_3)	y_3
---	---
---	---
X (λ_{10})	y_{10}

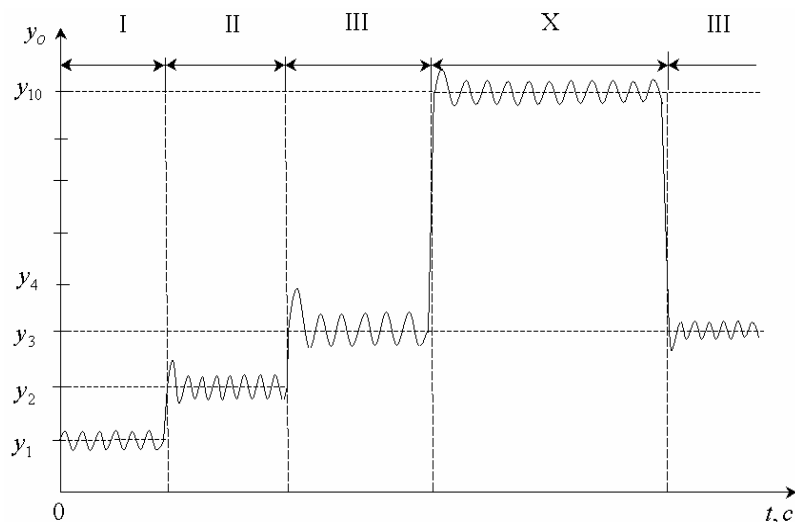


Рис. 4. Программное регулирование

Программа задается функцией или таблично. Реализуется на базе микропроцессорных комплектов (МПК) в современных системах автоматизации.

3. Системы позиционного (релейного) регулирования (рис. 5).

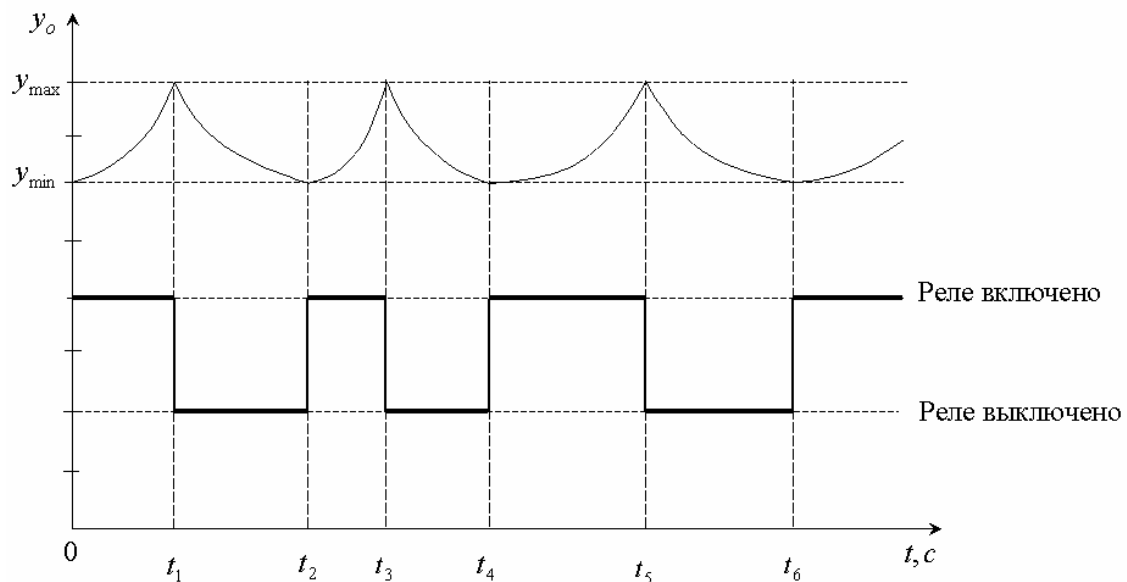


Рис. 5. Система позиционного регулирования

Например, в САРД (системе автоматического регулирования давления пара во вспомогательном котле с электрическим подогревом) регулируемый параметр давление пара y_0 поддерживается в рабочем диапазоне $\Delta y_0 = y_{\max} - y_{\min}$ путем включения – выключения электрического нагревателя. Темп возрастания – падения давления определяется величиной потребления пара (нагрузкой λ), в результате чего скважность подачи тока $0-t_1$, t_2-t_3 и t_4-t_5 различна во времени. САР обеспечивает поддержание давления пара в пределах заданной степени неравномерности статической характеристики САРД

$$\delta = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{y_{0 \text{ ном}}} \cdot 100\%,$$

где $y_{0 \text{ ном}}$ - номинальное (паспортное) давление пара.

Если ось ординат имеет безразмерный вид, то

$$\delta = y_{\max} - y_{\min}, \text{ о.е.}, \text{ или } \delta = (y_{\max} - y_{\min}) \cdot 100\%.$$

В целом вопросы автоматизации связаны с осуществлением функций управления, контроля и защиты СТС, что в обобщенном виде наглядно представлено на рис. 6.

В отличие от САР, представленной на рис.1, система автоматизированного управления (САУ) предполагает внедрение интеллектуального интерфейса между пользователем, программным устройством и САР (рис. 7).

Система автоматического управления предполагает, в отличие от автоматизированного управления, введение многочисленных обратных связей от объекта к программному устройству с исключением роли вахтенного с его воздействием на координату режима $y_{\text{реж}}$ программного устройства (рис. 8).

Системы автоматизации СЭУ должны удовлетворять следующим основным требованиям Регистра РФ:

1. Повышение технической и эксплуатационной эффективности использования судов, безопасности плавания при улучшении условий труда и быта экипажа.
2. Повышение количественных показателей надежности СТС, связанных с возрастанием отрыва судов от береговых баз:
 - срок службы систем автоматизации без регулировок и разборки не менее 7000 ч, а общий ресурс работы должен быть равен ресурсу объекта;
 - СА должны нормально функционировать при крене до 20° (при длительном крене - 15°) и дифференте до 10° .
 - СА должны нормально функционировать в условиях вибрации с $f = 20 \text{ Гц}$ при амплитуде 0,5 мм и выдерживать удары с ускорением до 70 м/с^2 при $t_{\text{МКО}}$ до 60°C и влажности воздуха до 95%;
 - СА должны соответствовать Правилам приемки Регистра РФ, наблюдения и освидетельствования;

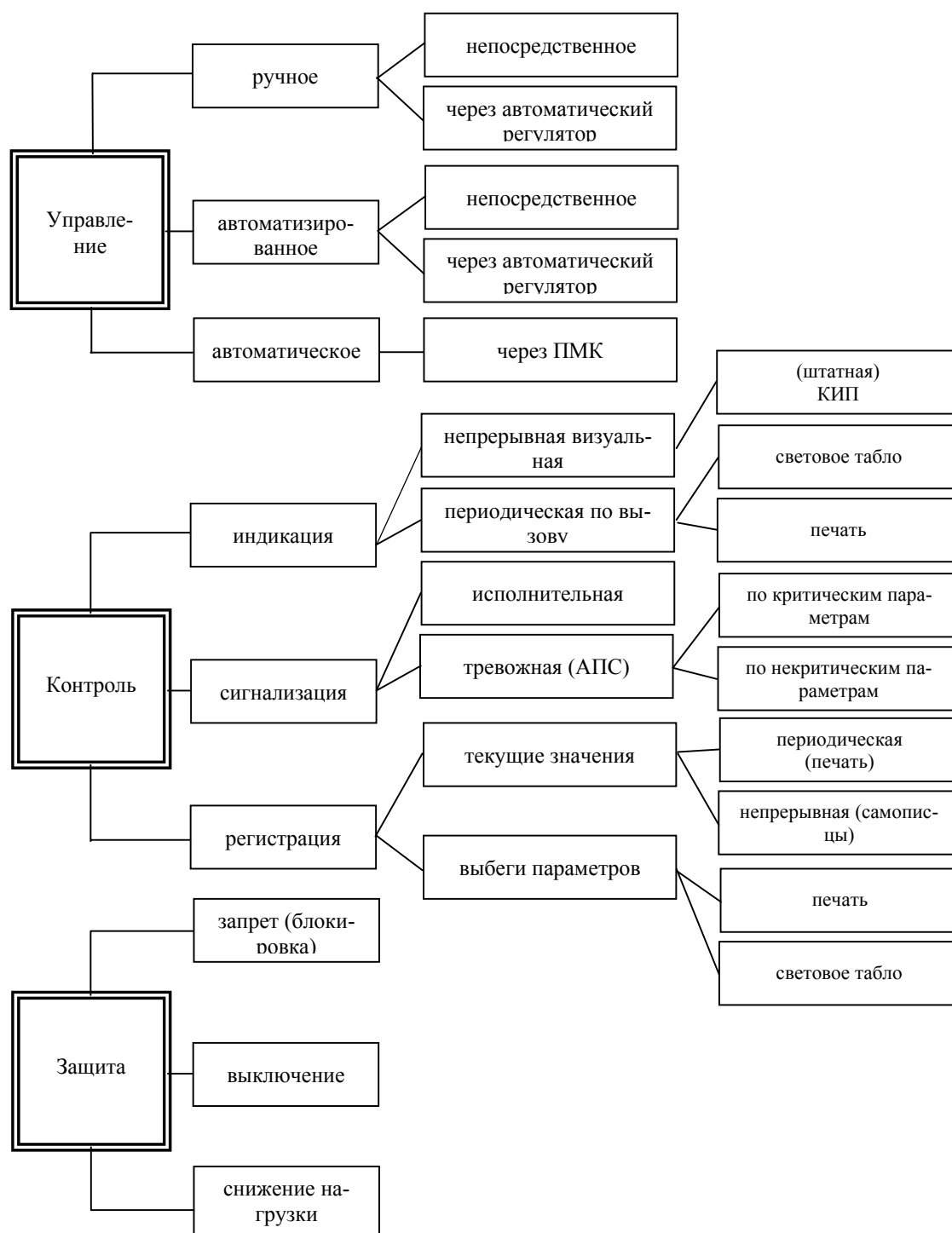


Рис. 6. Структура и виды управления, контроля и защиты

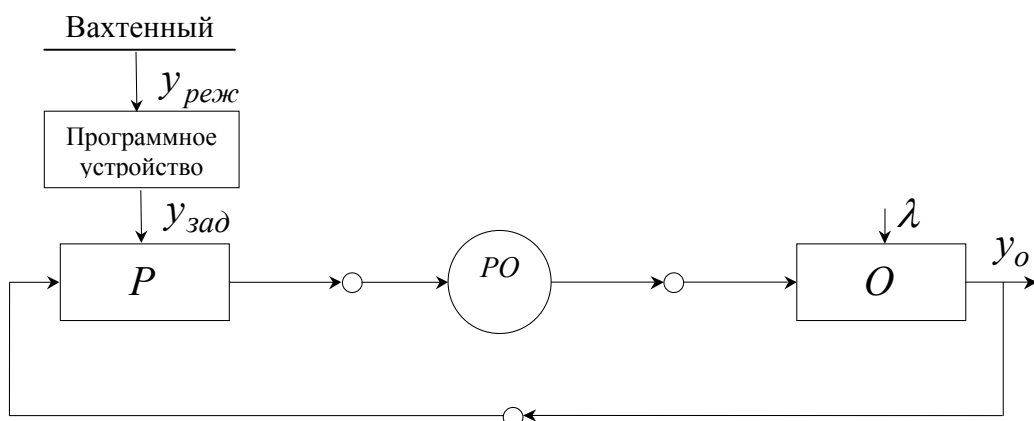


Рис. 7. Структурная схема автоматизированного управления

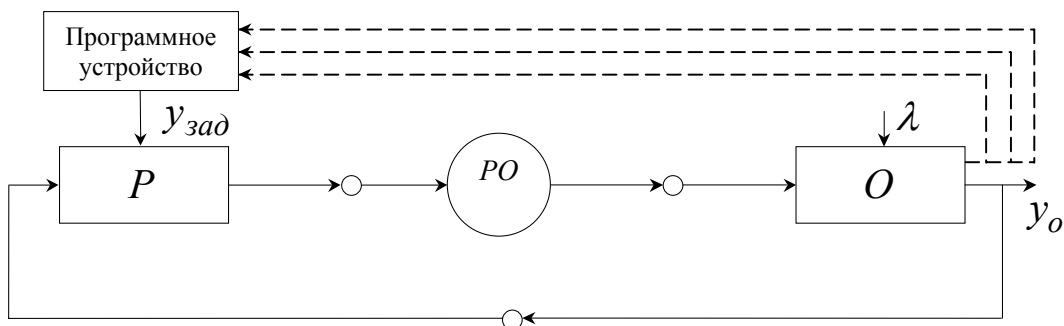


Рис. 8. Структурная схема автоматического управления

- исполнение должно быть искро- и взрывобезопасным и защищенным от влаги, паров масла и топлива;
- в СА должна предусматриваться возможность ручного вмешательства в процесс управления;
- для питания СА должен предусматриваться резервный источник, включаемый в работу автоматически за $t \leq 10$ с;
- усилия на задающих органах СА до 30...50 Н;

- технические требования к характеристикам и показателям СА индивидуальны для каждой системы и объекта, исходя из характера и условий работы согласно государственным стандартам или ведомственной нормативной документации;
- СА должны обеспечивать алгоритм управления согласно с инструкциями, т.е. должны обеспечивать технически правильный алгоритм функционирования (с исключением опасных перегрузок и аварийных состояний);
- для СА должны быть оговорены требования по точности задаваемого режима, времени отработки задания и т.д.

Если САР (САУ) сама определяет наивыгоднейшее для данных условий эксплуатационное значение координаты $y_{зад}$ и способна перенастраиваться, то ее называют самонастраивающейся (адаптивной) и оптимизирующей системой. Применение микропроцессорных САУ в этом плане является перспективным.

Следует особо остановиться на способах регулирования процессов в судовой автоматике [3, 8, 9, 13, 14, 15].

И з в е с т н ы следующие способы регулирования:

- 1) регулирование по отклонению регулируемого параметра от заданной величины, в теории регулирования этот способ известен как принцип И. Ползунова – Д. Уатта;
- 2) регулирование по скорости изменения регулируемого параметра (способ братьев Сименс);
- 3) регулирование по ускорению регулируемого параметра;
- 4) регулирование по изменению нагрузки (способ Понселе).

На практике реализуется принцип Ползунова – Уатта, реже в совокупности с 3-им и 4-ым способами. Самостоятельно 2, 3 и 4-й способы не применяются.

Глава 2. Статика САР

Раздел определяет и устанавливает свойства и статические характеристики элементов и звеньев системы, выделяет типовые звенья САР и правила анализа и синтеза сложных систем, позволяет существенно упростить объемные структурные схемы и определить геометрические размеры элементов САР и их характеристики.

§ 2.1. Объект регулирования и его статическая характеристика

Объект регулирования, например, двигатель, компрессор, котел и другие являются главным звеном системы автоматического регулирования, поэтому становится очевидным важность знания характеристик и свойств О. Как правило, О представляют в виде структурной схемы (см. рис. 9, а) с входными координатами подвода и отвода энергии и выходной координатой в виде регулируемого параметра [11, 12]. Соответственно выделяют канал регуляторной проводимости с коэффициентом статической передачи K_{ox} и канал нагрузочной проводимости с коэффициентом статической передачи $K_{o\lambda}$.

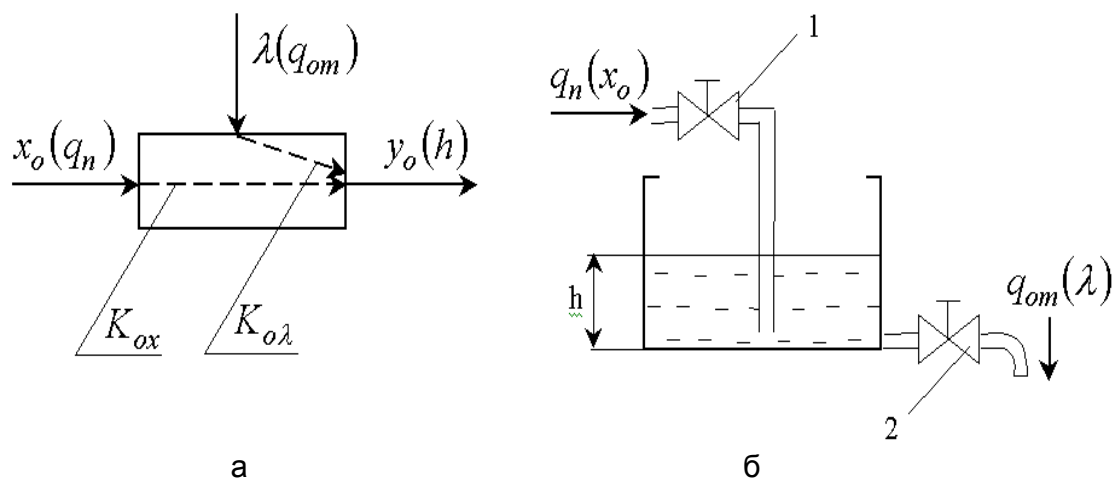


Рис. 9. Структурная и функциональная схемы объекта

В данном случае в качестве объекта (рис. 9, а) выбрана емкость, в которую поступает жидкость через регулируемый вентиль 1 с текущим проходным сечением f_n (подвод энергии q_n , где q_n – расход жидкости), из емкости уходит определенное количество жидкости через вентиль 2 с проходным сечением f_{om} (отвод энергии q_{om}). В зависимости от q_n и q_{om} в емкости будет меняться уровень жидкости h (регулируемый параметр или выходная координата объекта). Например, для судового двигателя под q_n понимается эффективный крутящий момент на коленчатом вале, под q_{om} – момент сопротивления винта, а в зависимости от их соотношения установится значение частоты вращения (выходная координата y_o).

Через первый канал осуществляется подвод энергии (подача топлива). Это канал регуляторной проводимости, именно по нему регулятор, изменяя подачу топлива, обеспечивает подвод энергии.

Отвод энергии (ее потребление) осуществляется винтом. Это канал нагрузочной проводимости, он обеспечивает отвод энергии.

Оба канала, как правило, работают независимо друг от друга. Поэтому возможно конечный эффект по изменению выходной координаты оценивать как сумму работы обоих каналов (принцип суперпозиции).

$$\text{Таким образом, } K_{ox} = \frac{\Delta y_o}{\Delta x_o} \quad \text{при } \lambda = const$$

$$\text{и } K_{o\lambda} = \frac{\Delta y_o}{\Delta \lambda} \quad \text{при } x_o = const.$$

Рассмотрим подробнее работу объекта (рис. 9, б).

На базе уравнения Бернулли построим семейство расходных характеристик для q_n при постоянном напоре с противодавлением h (здесь под q_n имеем расход жидкости через

вентиль с f_n) – при фиксированном положении вентиля f_{om} (рис. 10, а).

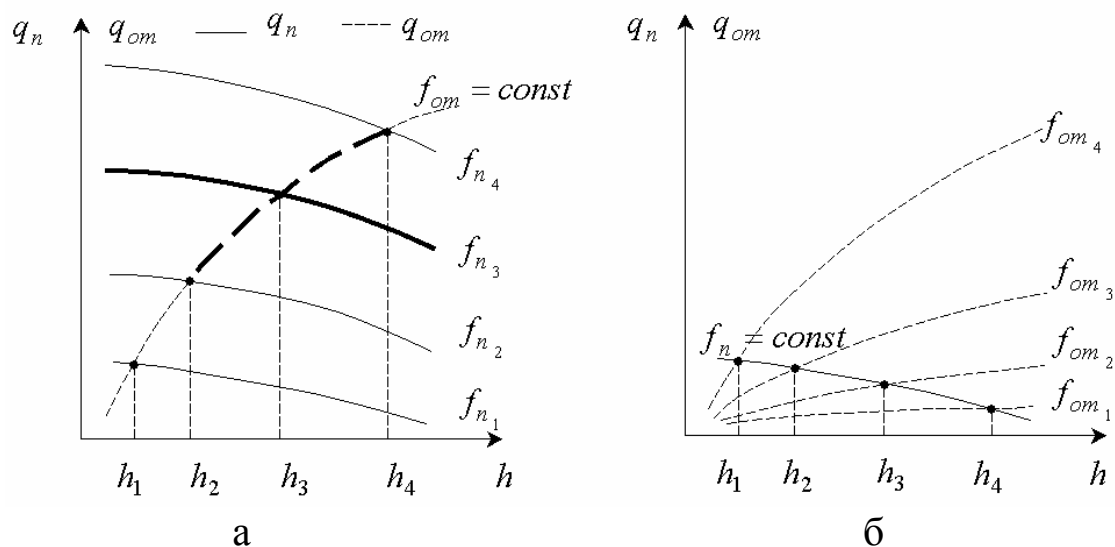


Рис. 10. Характеристики подвода и отвода энергии объекта

Перестроим графики исходя из того, что точки пересечения определяют равновесные режимы (рис. 11, а). Например, для рис. 10, а точка пересечения характеристики подвода энергии при f_{n_3} с характеристикой отвода энергии определится уравнением

$$q_n - q_{om} = 0.$$

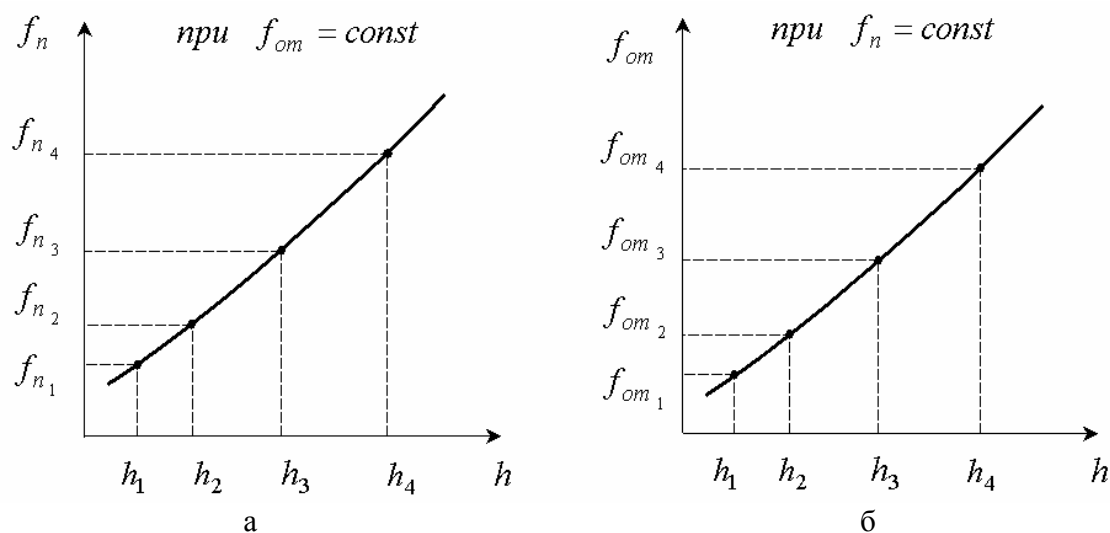


Рис. 11. Статические характеристики каналов передачи объекта

Это выражение называется уравнением статики объекта, а регулируемый параметр определится как $y_o = h_3$.

Запишем уравнение статики для канала регуляторной характеристики (рис. 11, а), предполагая линейность кривой, состоящей из равновесных точек

$$h = K_{ox} \cdot f_n \text{ или } y_o = K_{ox} \cdot x_o \text{ при } f_{om} = const.$$

Аналогично представим уравнение статики для канала нагрузочной проводимости (рис. 11, б)

$$h = K_{o\lambda} \cdot f_{om} \text{ или } y_o = K_{o\lambda} \cdot \lambda \text{ при } f_n = const.$$

При совместной работе каналов, используя принцип суперпозиции, получим уравнение статики объекта

$$y_o = K_{o\lambda} \cdot \lambda + K_{ox} \cdot x_o. \quad (1)$$

Знаки членов правой части уравнения (1) определяются направленностью воздействия каждого канала на выходную координату. Тогда

$$K_{o\lambda} = \left| \frac{\partial y_o}{\partial \lambda} \right| \text{ и } K_{ox} = \left| \frac{\partial y_o}{\partial x_o} \right|.$$

Например, для двигателя уравнение запишется как

$$y_o = - \left| \frac{\partial y_o}{\partial \lambda} \right| \cdot \lambda + \left| \frac{\partial y_o}{\partial x_o} \right| \cdot x_o. \quad (2)$$

Таким образом, целесообразно введение понятия, определяющего поведение любого элемента САР, – статической характеристики. Статическая характеристика – это зависимость регулируемого параметра от входной координаты того или иного канала проводимости при фиксированном (выключенном) третьем канале проводимости, определенная во всем диапазоне регулирования. Например, для регулятора (см. рис. 1) это $y_p = f(x_p)$ при $y_{зад} = const$.

Для оценки устойчивости объекта и регулятора в статике вводится параметр фактор устойчивости, обозначаемый бук-

вой F с соответствующим индексом (рис. 12).

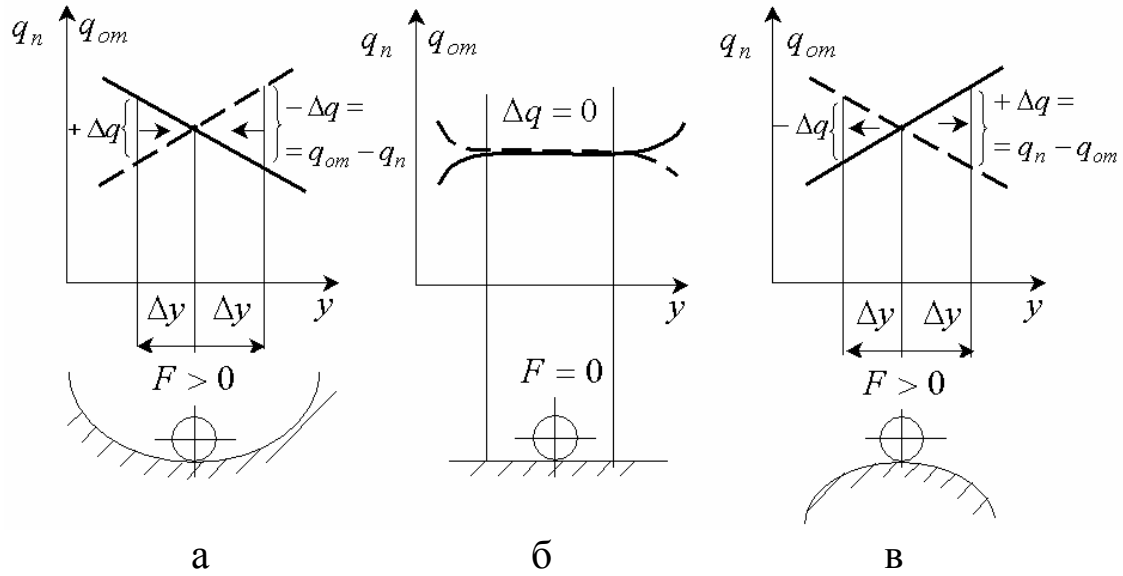


Рис. 12. Геометрическая интерпретация устойчивости элемента САР (— q_{om} ; ---- q_n)

Пересечение кривых q_n и q_{om} в соответствии с уравнением статики определит равновесный режим. При внесении возмущения Δy в ту или иную сторону в случае (рис. 12, а) приведет к нарушению баланса подвода и отвода энергии и соответствующему восстановлению исходного режима. Говорят, элемент обладает положительным самовыравниванием (фактор устойчивости $F > 0$). Положение шарика на выпуклой поверхности (геометрическая интерпретация ситуации, рис. 12, в) неустойчиво. Фактор устойчивости $F < 0$. Случай (рис. 12, б) определяет $F = 0$ или безразличный режим, когда возмущение переводит шарик в другое положение.

Предложено оценивать статическую устойчивость элемента САР соотношением [8]

$$F = \frac{\Delta q}{\Delta y} = \frac{\partial q_{om} - \partial q_n}{\partial y} = \frac{\partial q_{om}}{\partial y} - \frac{\partial q_n}{\partial y}.$$

Так как $\partial q_{om} = \frac{\partial y}{K_{o\lambda}}$, $\partial q_n = \frac{\partial y}{K_{ox}}$ и $\Delta q < 0$, получим

$$F = \frac{1}{K_{ox}} - \frac{1}{K_{o\lambda}}. \quad (3)$$

§ 2. 2. Статические характеристики наиболее часто применяемых элементов

Статический элемент с сухим трением. Применяется в качестве основной части комбинированных реле давления и температуры, контрольно-измерительных приборов, регуляторов температуры и т.п. (рис. 13).

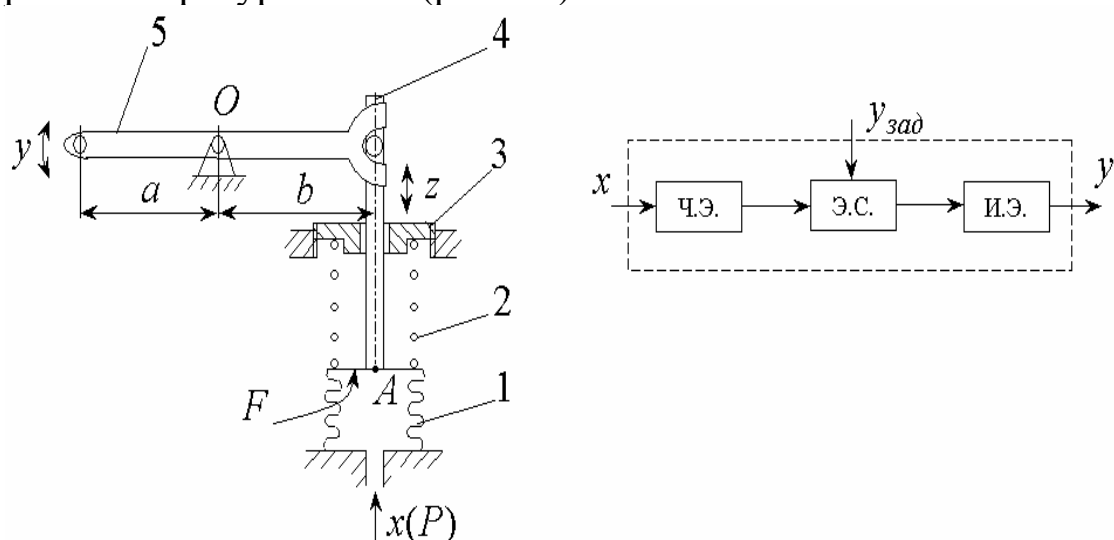


Рис. 13. Измеритель давления и его структурная схема

Уравнение статического равновесия без учета сил сухого трения

$$\Delta p \cdot F = c/z_{np.з.} + \Delta z, \quad (4)$$

где здесь и далее знаком Δ обозначается приращение параметра;

c – жесткость пружины;

z – перемещение т. А (в дальнейшем, перемещение муфты).

Сильфон 1 является чувствительным элементом (ч.э.) для измерения давления, элемент сравнения (э.с.) в данном случае вырожден, сведен к т. А, в которой происходит сравнение координаты задания $y_{зад}$ с координатой входного сигнала. Как правило, координата задания (уставка) определяется величиной предварительной затяжки главной пружины $z_{пр.з}$.

Связь выходной координаты y с э.с. определится выражением $y = \frac{b}{a} \cdot z$ в исполнительном элементе (и.э.).

Для приведения к относительным единицам в уравнение (4) введем $x = \frac{\Delta p}{p_{ном}}$ и $z = \frac{\Delta z}{z_{ном}}$,

где $p_{ном}$ и $z_{ном}$ - паспортные значения для номинального режима.

Тогда для частного случая $z_{пр.з} = 0$ получим

$$y = \frac{p_n \cdot F \cdot b}{c \cdot z_n \cdot a} x$$

или

$$y = Kx, \quad (5)$$

где $K = \frac{p_n \cdot F \cdot b}{z_n \cdot c \cdot a}$ – коэффициент статической передачи

измерителя давления, определяемый соотношением параметров, характеризующих данный статический элемент.

Семейство статических характеристик измерителя давления представлено на рис. 14.

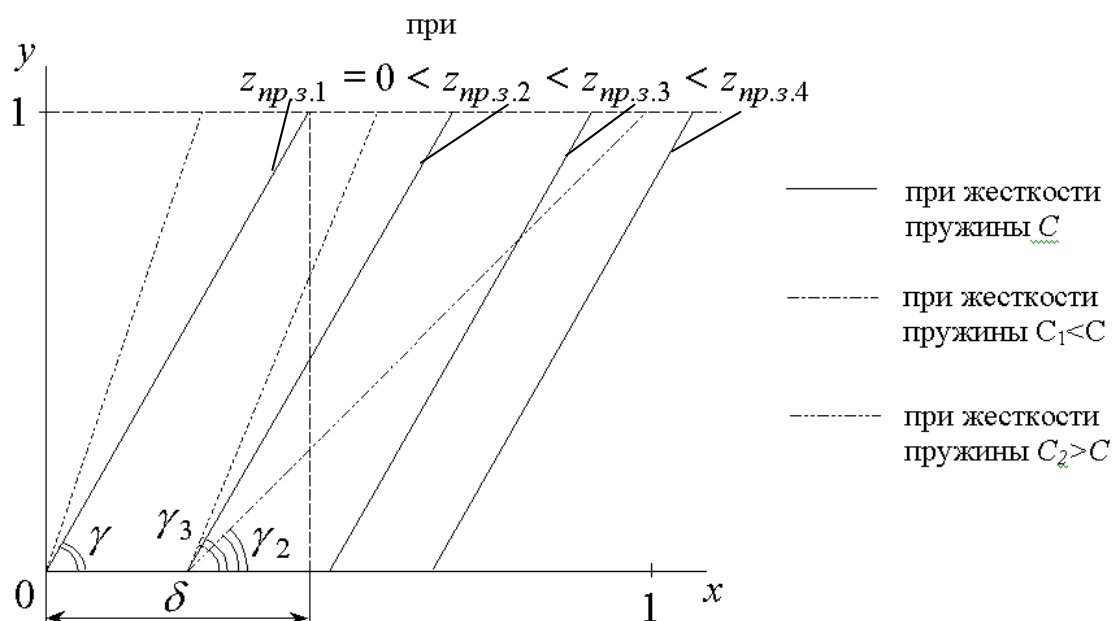


Рис. 14. Семейство статических характеристик измерителя давления

Изменение величины предварительной затяжки пружины обеспечивает эквидистантный перенос статической характеристики, таким образом, обеспечивается «всережимность» прибора. Наклон статической характеристики определится величиной ее проекции на ось абсцисс, равной δ .

Другое определение δ – степень неравномерности статической характеристики, или статизм, или «остаточная ошибка регулирования».

Наклон статической характеристики определяется величиной угла γ :

$$\operatorname{tg} \gamma = K \text{ или } \gamma = \arctg \left(\frac{p_n \cdot F \cdot b}{z_n \cdot c \cdot a} \right).$$

На практике это достигается путем введения устройства, позволяющего изменять угол наклона (см. рис. 14) дополнительной пружины и соответственно регулировать величину

приведенной к муфте жесткости суммарной пружины (главной и дополнительной).

Силы трения в механизме измерителя давления в шарнирах рычага 5 на практике вносят изменение в статическую характеристику (рис. 15, *a*).

Заштрихованная область – зона нечувствительности измерителя давления. При медленном (статическом) увеличении координаты x (давление) от т.1 на участке 1-2 никакого перемещения координаты y не произойдет, так как с учетом сил сухого трения в уравнении (4) в правой части добавится член $\pm f$, где f – сила сухого трения, она всегда направлена противоположно направлению движения (следует помнить, что силы трения покоя несколько больше сил трения при движении).

Далее, при увеличении входного сигнала начинается перемещение y до т. 3. При дальнейшем уменьшении x (от т. 3 до т. 4) $y = 0$ и, далее, y будет уменьшаться до т. 5. Зона нечувствительности прибора

$$\Delta x \geq \frac{f}{F \cdot p_{ном}}$$

называется степенью нечувствительности ε .

На рис.15, *б* представлены реальные статические характеристики измерителя давления с зоной нечувствительности, полученной путем многократного определения $y = f(x)$ при медленном увеличении и затем уменьшении координаты x .

Степень нечувствительности статической характеристики определяется как [8, 13, 14, 15]

$$\varepsilon = \Delta x_{\max}, \text{ о.е.}$$

или

$$\varepsilon = \frac{\Delta p_{\max}}{p_{ном}} \cdot 100\%.$$

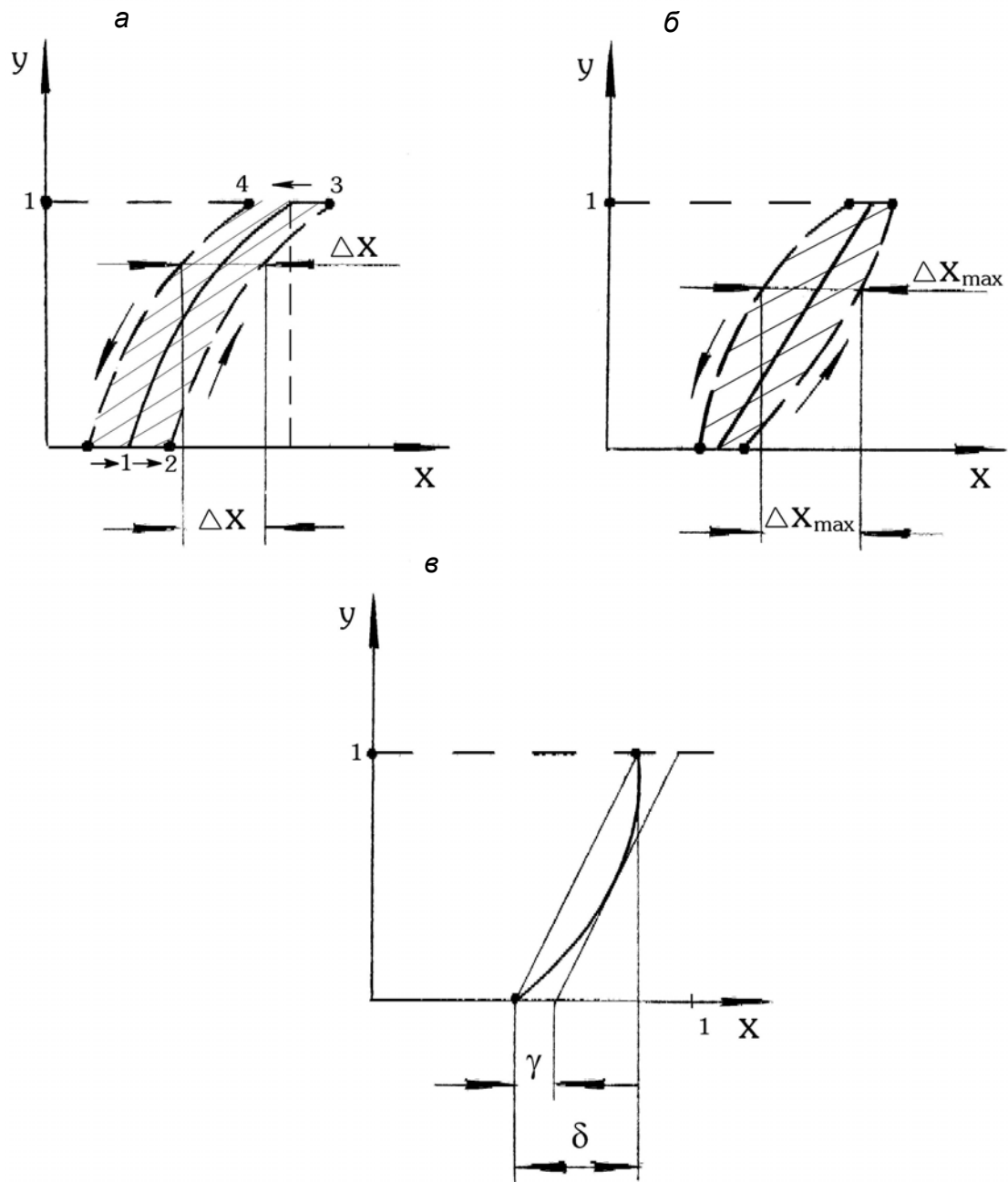


Рис. 15. Статическая характеристика измерителя давления с учетом сил сухого трения:

а – теоретическая; б – реальная;
в – параметры статической характеристики

Для большинства статических элементов зависимость выходной координаты от входной (при фиксированном другом

канале проводимости в общем случае) прямолинейна. Наибольшее ее отклонение от прямолинейной зависимости называется степенью непрямолинейности γ статической характеристики (см. рис. 15, в).

Для определения γ соединяют хордой начало и конец характеристики, проводят касательную к характеристике, параллельную хорде.

Для определения ε необходимо многократно отснять статическую характеристику. Изображенная на рис. 15, в кривая будет являться среднестатистической линией эксперимента, а наибольшее значение полученной зоны нечувствительности определит величина $\varepsilon = \Delta x_{\max}$.

Статический элемент с гистерезисом. В любом реальном статическом элементе при его нагружении и разгрузке энергия деформации диссипирует (рассеивается) в окружающую среду в виде тепла. Это приводит к появлению зоны нечувствительности элемента.

Эффект (внешний) аналогичен влиянию сил сухого трения на степень нечувствительности. В частности, сильфон вследствие релаксационных явлений материала вносит дополнительно к силам сухого трения зону нечувствительности (поле гистерезиса), рис. 16, а.

Эта зона, как правило, невелика, но вместе с силами сухого трения она определяет степень нечувствительности прибора, например, комбинированного реле давления.

Статический элемент с зазором. Люфты и зазоры характерны для большинства элементов судовой автоматики, например, зазор в подшипнике рычага 5 и в кулисном сопряжении штока 4 и рычага 5 (см. рис. 13).

Влияние зазоров и люфтов на статическую характеристику элемента (см. рис. 16, б) аналогично влиянию сил сухого трения.

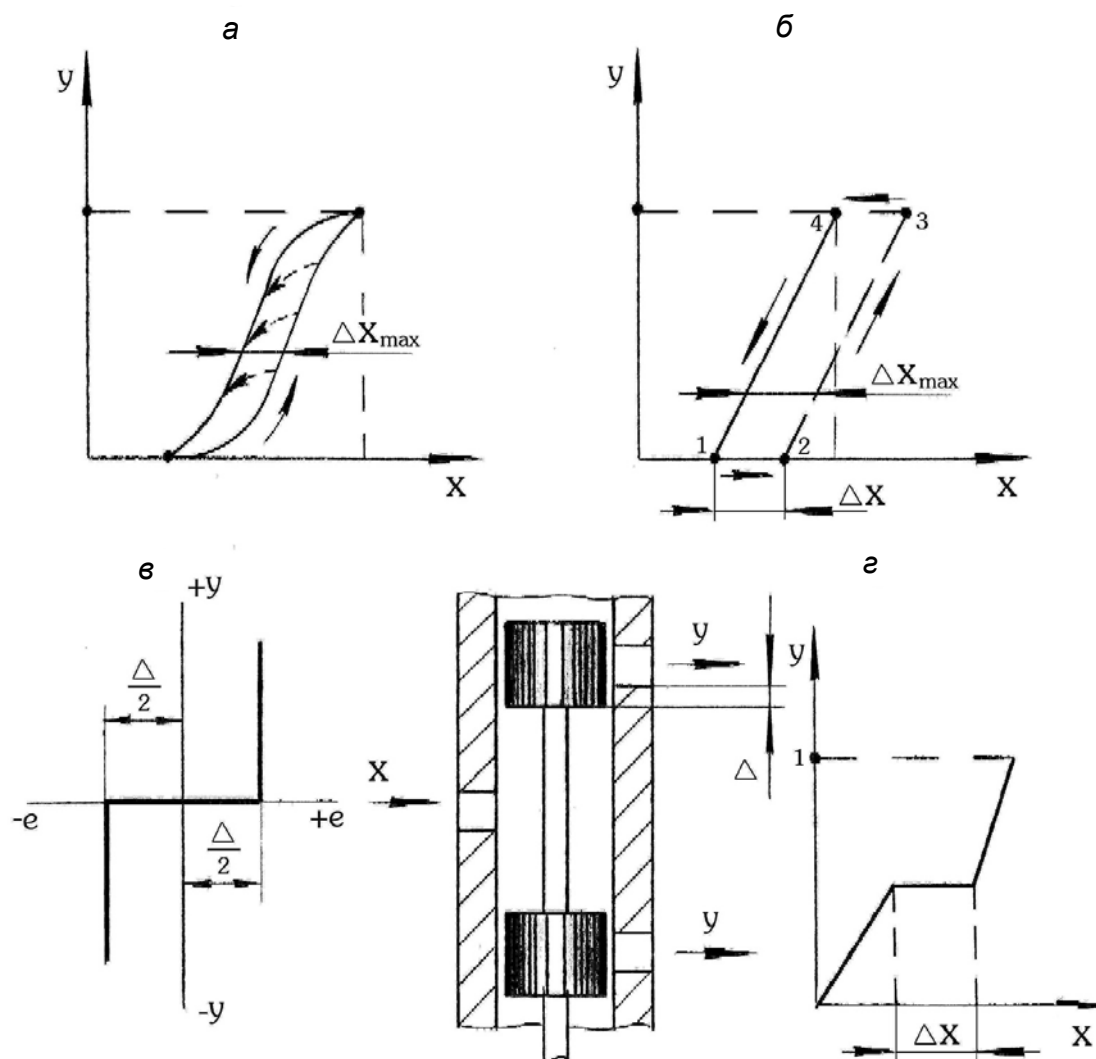


Рис. 16. Статические характеристики:

а – элемент с гистерезисом; б – элемент с зазором; в – астати-
ческий элемент с перекрышей; г – статический элемент с
«пассивной» зоной

Должно произойти изменение входной координаты от т. 1
до т. 2 для выборки всех люфтов и зазоров, прежде чем нач-
нется изменение выходной координаты

$$\Delta x \geq \frac{c \cdot S_{ном}}{F \cdot p_{ном}} \cdot \Delta s,$$

где Δs – суммарное значение зазоров и люфтов, о.е.;
 $s_{ном}$ – (паспортное) суммарное значение люфтов и зазоров в элементе, м.

Астатический элемент с перекрышей. Примером является золотниковый элемент управляющего устройства усилителя мощности (гидравлический или пневматический, см. рис. 16, в). Входная координата (перемещение золотника) при $e \geq \frac{\Delta}{2}$, где Δ – перекрыша элемента, вызовет соответствующее практически мгновенное изменение выходной координаты в том или ином направлении. Чувствительность элемента определяется величиной перекрытия золотника и зависит от точности выполнения и качества изготовления деталей. Такие астатические элементы ($\delta = 0$) представляют собой прецизионную сборочную единицу.

Статический элемент с пассивной зоной (см. рис. 16, г).

На участке статической характеристики (Δx) выходная координата не изменяется ($y = const$).

Например, для измерителя давления это может быть достигнуто путем применения двух пружин различной жесткости при соответствующих предварительных затяжках пружин. Используют «пассивную» зону для целей регулирования объекта (двухрежимные регуляторы).

При этом первая зона статической характеристики обеспечивает управление минимальным режимом, вторая – максимальным.

Вышеприведенные статические элементы получили в эксплуатации широкое применение (это датчики и сигнализаторы, чувствительные элементы давления и температуры, измерители частоты вращения, регуляторы температуры, давления и уровня и т.д.).

§ 2. 3. Статическая характеристика системы автоматического регулирования

Составим уравнение статики для всех элементов наиболее распространенной линейной САР (рис. 17, а).

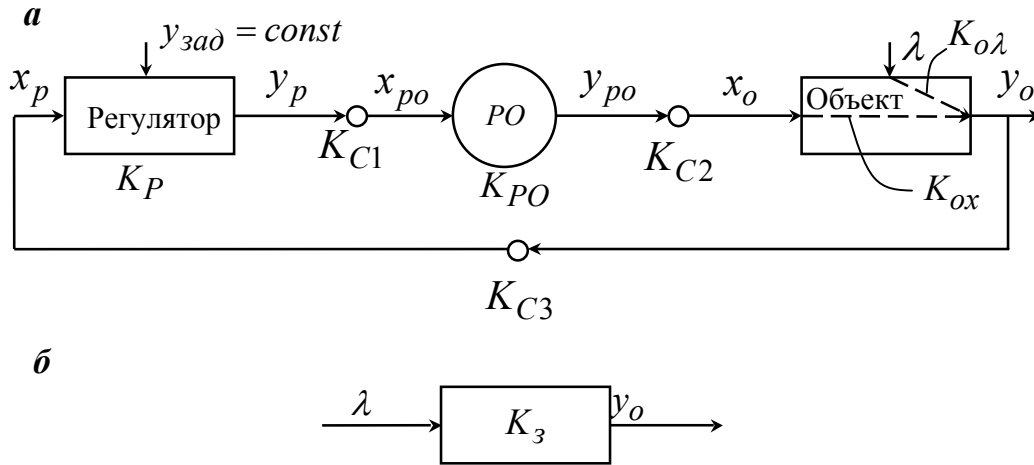


Рис. 17. Структурная схема типовой линейной САР:
а – развернутая схема; б – упрощенная схема

САР, статика элементов которой описывается уравнением вида $y = Kx$, называется линейной.

Составим систему уравнений, описывающих статику всех звеньев линейной САР.

$$\begin{cases} \Delta y_o = -K_{o\lambda} \cdot \Delta \lambda + K_{ox} \cdot \Delta x_o & \text{(уравнение статики объекта О)} \\ \Delta x_p = K_{C_3} \cdot \Delta y_o & \text{(уравнение связи регулятора с О)} \\ \Delta y_p = K_p \cdot \Delta x_p & \text{(уравнение статики регулятора)} \\ \Delta x_{po} = K_{C_1} \cdot \Delta y_p & \text{(уравнение связи регулятора с РО)} \\ \Delta y_{po} = K_{po} \cdot \Delta x_{po} & \text{(уравнение статики РО)} \\ \Delta x_o = -K_{C_2} \cdot y_{po} & \text{(уравнение связи РО с О, знак} \end{cases} \quad (6)$$

свидетельствует о наличии отрицательной обратной связи).

Подставив в первое уравнение Δx_o из последнего и далее вместо Δy_{po} его значение из предпоследнего и т.д., получим выражение

$$\Delta y_o = -K_{o\lambda} \cdot \Delta \lambda - K_{ox} \cdot K_{C_2} \cdot K_{po} \cdot K_{C_1} \cdot K_p \cdot K_{C_3} \cdot \Delta y_o,$$

или

$$\Delta y_o = - \frac{K_{o\lambda}}{1 + K_{ox} \cdot K_{C_2} \cdot K_{po} \cdot K_{C_1} \cdot K_p \cdot K_{C_3}} \cdot \Delta \lambda.$$

САР является замкнутой системой, составленной из конечного числа звеньев, при этом главная обратная связь проходит от выходной координаты объекта через регулятор на входную координату и является отрицательной. Обозначим через K произведение коэффициентов статической передачи последовательно расположенных элементов (как бы для разомкнутой цепочки звеньев):

$$K = K_{ox} \cdot K_{C_2} \cdot K_{po} \cdot K_{C_1} \cdot K_p \cdot K_{C_3},$$

где K – коэффициент статической передачи разомкнутой САР.

Тогда вместо системы уравнений получим выражение

$$\Delta y = - \frac{K_{o\lambda}}{1 + K} \cdot \Delta \lambda$$

или

$$y = - \frac{K_{o\lambda}}{1 + K} \cdot \lambda.$$

Введя коэффициент K_3 для замкнутой системы элементов $K_3 = \frac{K_{o\lambda}}{1 + K}$, получим вместо системы уравнений (6) уравнение статики САР

$$y = -K_3 \lambda, \quad (7)$$

а структурная схема САР упростится (см. рис. 17, б).

Полученное выражение справедливо для САР с любым количеством звеньев. При астатическом регуляторе $K_p \rightarrow \infty$ и тогда $K_3 = 0$, т.е. тогда отсутствует зависимость выходной координаты O от нагрузки, $\delta = 0$ (точное регулирование). Если

через регулятор будет проходить положительная обратная связь, то K будет противоположного знака и

$$K_3 = \frac{K_{o\lambda}}{1 - K}.$$

§ 2. 4. Анализ статики систем автоматического регулирования и синтез САР

САР могут быть представлены в виде разветвленных цепочек из звеньев, взаимодействующих между собой в соответствии с общей структурой.

Если известны статические характеристики каждого звена и всех кинематических элементов и их коэффициенты статической передачи (коэффициенты усиления), то возможно существенное упрощение структурной схемы [11] при переходе на ее эквивалентный аналог с K_3 (см. рис. 17, б).

Последовательное соединение звеньев направленного (детектирующего) действия на рис. 18, а.

Такое соединение заменяется эквивалентом в виде элемента с коэффициентом статической передачи $K = \prod_{i=1}^i K_i$, где $\prod$ – произведение, i – количество элементов цепочки.

Параллельное соединение звеньев представлено на рис. 18, б). Такое соединение заменяется эквивалентом в виде элемента с коэффициентом статической передачи $K = \sum_{i=1}^i K_i$.

Замкнутая система (САР) с отрицательной обратной связью, проходящей через регулятор, представлена на рис. 18, в. Данная САР заменяется эквивалентом с коэффициентом статической передачи замкнутой системы K_3 . Уравнение статики САР запишется как

$$y = K_3 \lambda = \frac{K_{o\lambda}}{1 + K_p \cdot K_{ox}} \cdot \lambda.$$

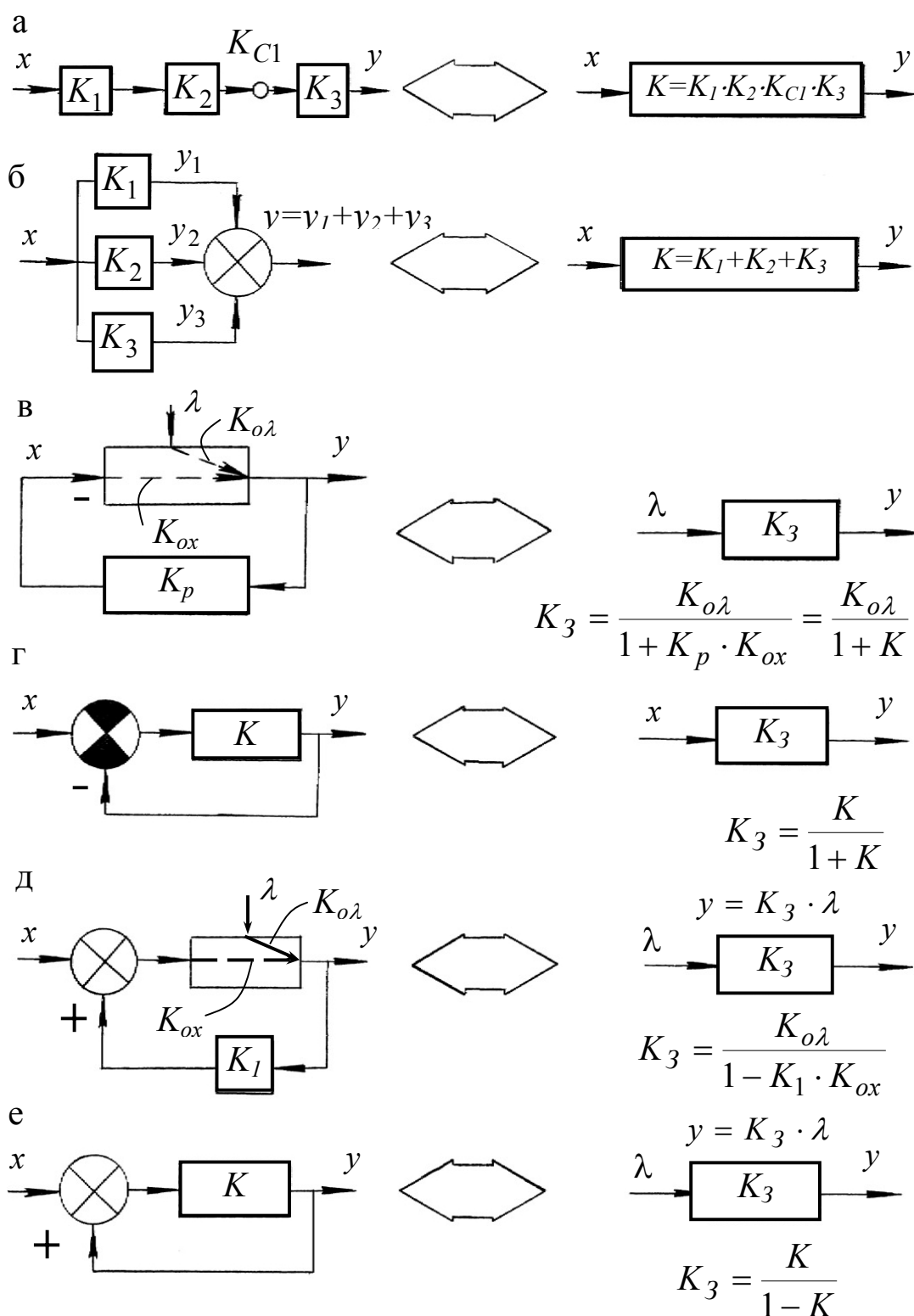


Рис. 18. Варианты эквивалентной замены звеньев и структур

- а – последовательное соединение элементов;
- б – параллельное соединение элементов;
- в – замкнутый контур САР с отрицательной обратной связью;
- г – звено, охваченное отрицательной обратной связью;
- д – замкнутый контур САР с положительной обратной связью;
- е – звено, охваченное положительной обратной связью

Звено, охваченное отрицательной обратной связью
(рис. 18, з) имеет эквивалент, описываемый уравнением

$$y = K_3 x = \frac{K}{1 + K} \cdot x.$$

Замкнутая система (САР) с положительной обратной связью
(рис. 18, д) заменяется эквивалентом

$$y = K_3 \lambda = \frac{K_{o\lambda}}{1 - K_i \cdot K_{ox}} \cdot \lambda.$$

Звено, охваченное положительной обратной связью
(рис. 18, е) заменяется эквивалентом

$$y = K_3 \lambda = \frac{K}{1 - K} \cdot \lambda.$$

Таким образом, в результате анализа возможно упрощение сложных структур автоматического регулирования и управления, получение уравнения САР, исследование статических характеристик и выработка практических рекомендаций, направленных на повышение качества регулирования.

При наличии нелинейных статических характеристик отдельных элементов САР (например, объекта или регулятора, это характерно для элементов автоматики) анализ производится с использованием метода кусочной аппроксимации, т.е. реальную характеристику заменяют на участках прямолинейной статической характеристикой.

Противоположными действиями на основании известных статических характеристик элементов САР возможно структурирование сложных систем автоматического регулирования. Этот подход называют синтезом структурных схем. На рис. 19 в простейшем виде показан механизм создания САР из эле-

ментов автоматики с известными свойствами и характеристиками.

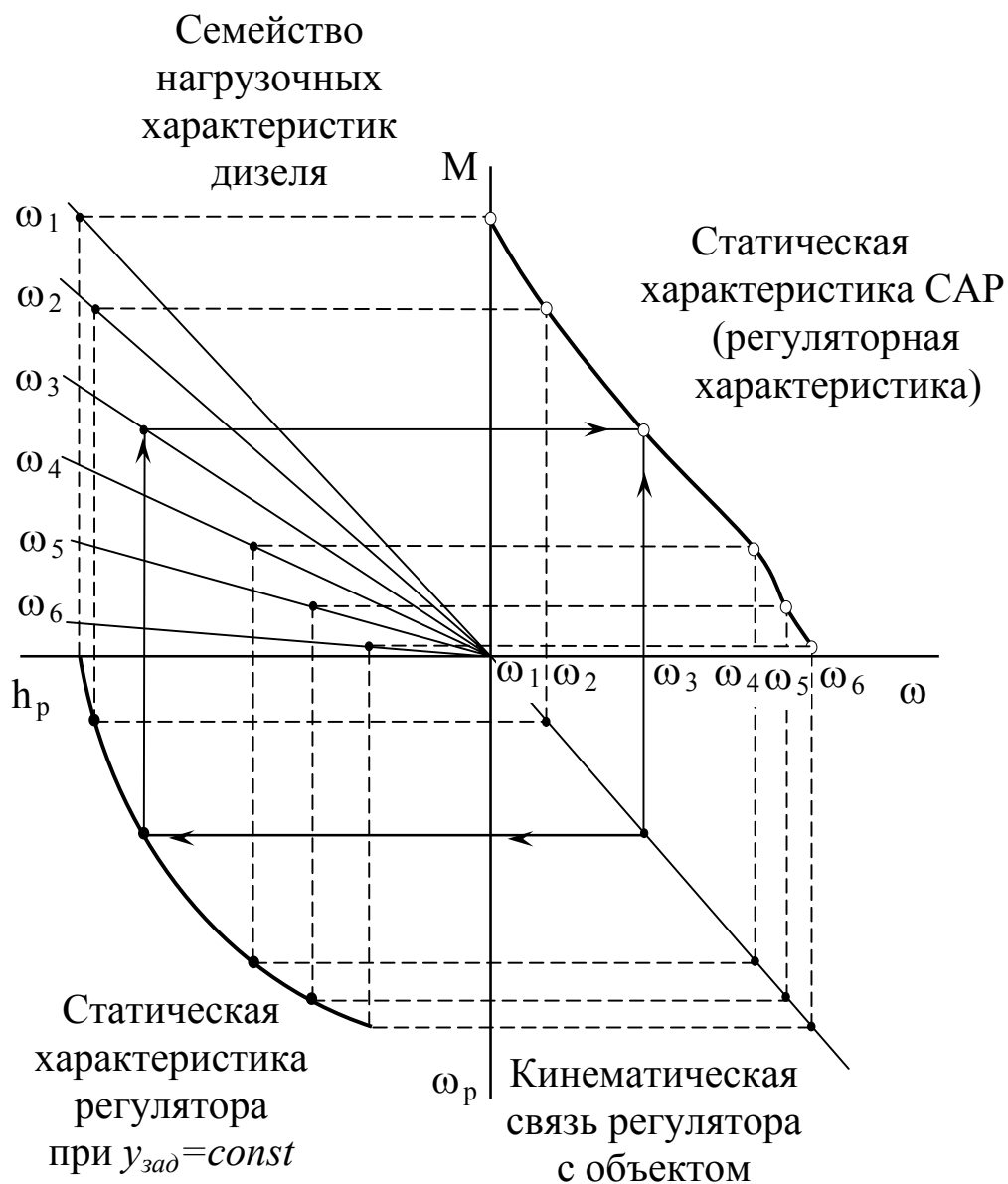


Рис. 19. Синтез статической характеристики САР

Исходя из известных статических характеристик элементов простейшей САР (для объекта – это семейство нагрузочных характеристик, для регулятора – статическая характеристика

$$\text{при } y_{\text{зад}} = \text{const} \text{ и } K_{C_1} = \frac{h_p}{z} = 1),$$

получаем статическую характеристику САР.

Это зависимость момента двигателя как функция частоты вращения коленчатого вала

$$M = f(\omega),$$

полученная для всего диапазона регулирования при работе двигателя на регуляторе при фиксированном значении координаты задания $y_{\text{зад}} = \text{const}$.

Эту зависимость также называют регуляторной характеристикой двигателя.

Как следует из рис.19, параметры регуляторной характеристики (ε, γ) определяются частными характеристиками составляющих САР элементов.

Следовательно, при синтезе возможен целенаправленный выбор и корректирование характеристик элементов с целью оптимизации параметров проектируемой (модернизируемой) САР.

Наклон же статической характеристики регулятора определяет степень неравномерности регуляторной характеристики.

Глава 3. Измерительные устройства в судовой автоматике

Обязательной составной частью САР, систем автоматизированного управления (САУ), систем контроля и защиты являются измерительные устройства, отражающие информацию о значениях различных параметров или их отклонениях от заданных значений (рис. 20).

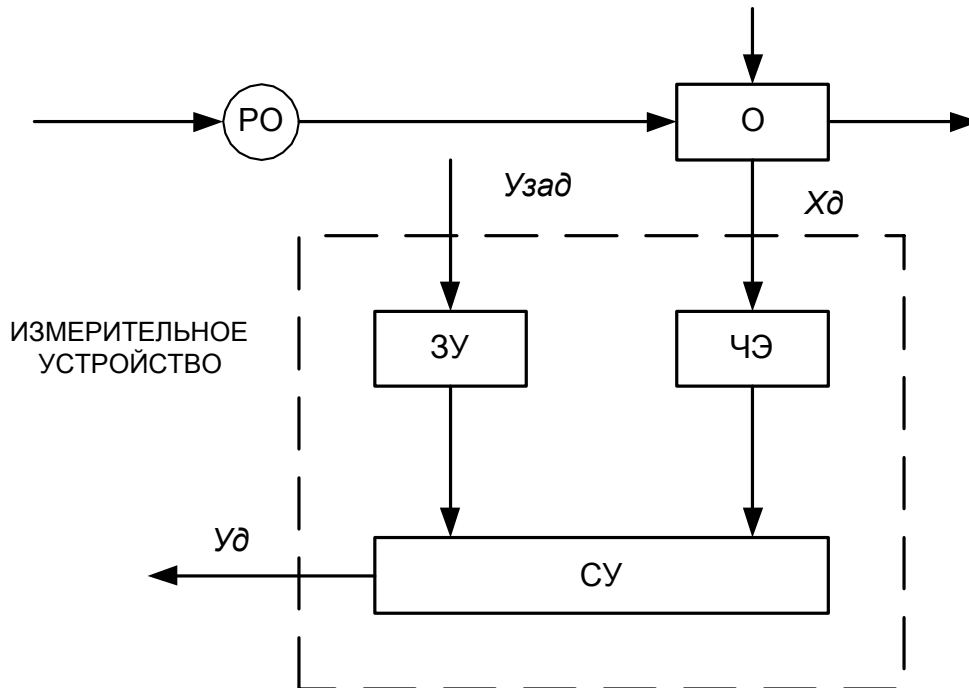


Рис. 20. Структурная схема измерительного устройства

Измерительное устройство состоит в общем виде [7, 13] из чувствительного элемента (ЧЭ), задающего устройства (ЗУ) с координатой задания $y_{зад}$ и сравнивающего устройства (СУ).

ЧЭ преобразует измеряемый параметр x_d в сигнал, удобный для сравнения. Аналогичный сигнал формируется в ЗУ со значением, определяемым установкой $y_{зад}$. Сигналы ЧЭ и ЗУ в виде усилия, перемещения, электрического тока или другого параметра поступают на вход СУ, и в случае рассогласования входных сигналов на выходе СУ появляется

сигнал y_d (Δy_d). Индекс «d» относится к измерительным устройствам, являющимися датчиками (аналоговый сигнал). При дискретном выходном сигнале прибор называется сигнализатором и вводится индекс «с» с координатой (x_c, y_c).

§ 3. 1. Измерение давления

Как правило, ЧЭ (датчик) представляет собой плоскую эластичную или жесткую мембрану (для малых давлений). Сильфонные датчики применяют для средних давлений, трубчатые - для высоких давлений. Эластичные мембраны изготавливают из аэростатной ткани или дюритовой резины (рис. 21, а). Жесткие мембраны изготавливают из нержавеющей стали или бериллиевой бронзы.

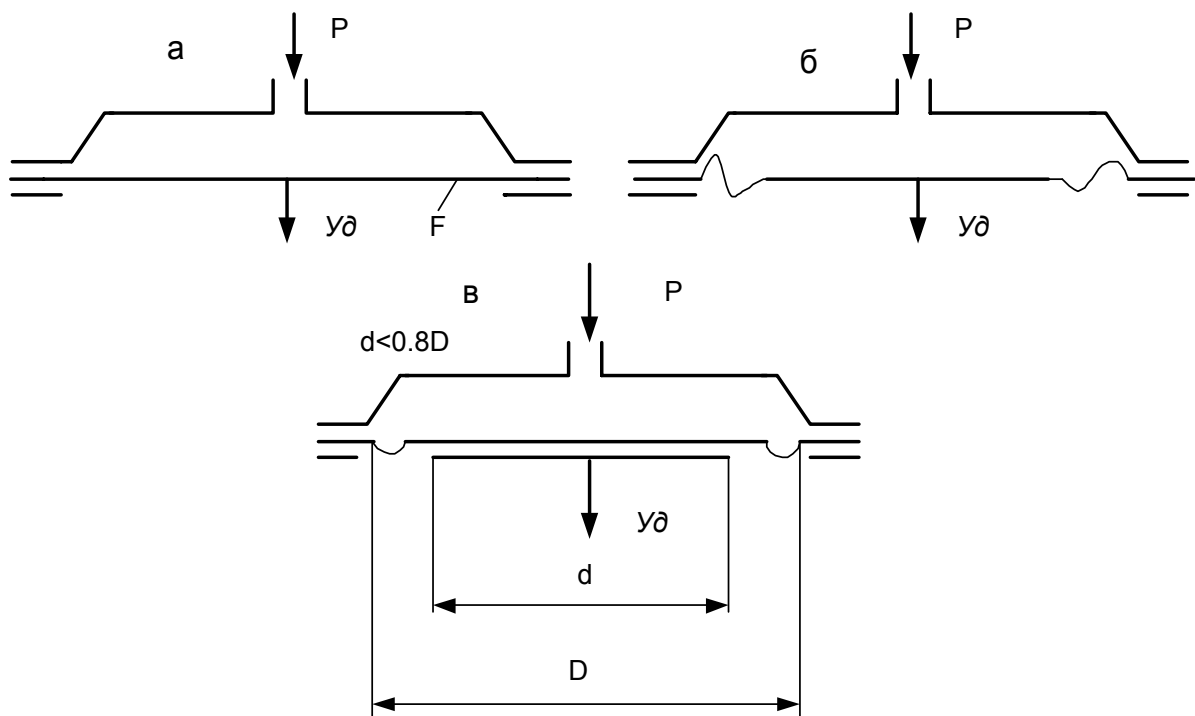


Рис. 21. Функциональные схемы ЧЭ давления

Сила давления, как правило, уравнивается силой действия пружины, имеющей предварительную затяжку ($y_{зад}$), а сравнивающее устройство (вырожденное) обеспе-

чивает выходную координату y_{∂} , пропорциональную входному сигналу p в соответствии со схемой на рис. 20

$$y_{\partial} = \frac{F}{c} \cdot p - y_{\text{зад}}.$$

Применение гофрированных мембран расширяет рабочий диапазон датчиков (рис. 21, б), часто применяют мембраны с жестким центром (рис. 21, в).

Широкое применение получили измерители давления на базе статических элементов с трением (см. рис. 13).

Изготавливают сильфоны из тампака, бериллиевой бронзы и нержавеющей стали.

Уравнение статики этих элементов $y = k \cdot x$ (при малом влиянии сил трения и гистерезиса на статическую характеристику). Эти приборы имеют высокую прямолинейность статической характеристики, просты по конструкции, надежны и имеют невысокую стоимость, что и определяет масштаб их применения. Для измерения высоких давлений применяют трубчатые датчики давления (манометрическая трубка или трубка Бурдона и геликоидальная пружина), представленные соответственно на рис. 22.

Трубка Бурдона представляет собой упругую металлическую трубку эллиптического или прямоугольного сечения, согнутую по радиусу. При повышении давления трубка расширяется, а при понижении – сгибается. В данном устройстве вырождены и совмещены ЧЭ, ЗУ и СУ. Выходной сигнал y_{∂} пропорционален изменению давления. Трубка Бурдона широко используется в контрольно-измерительных приборах и устройствах автоматики. Металлические мембраны и трубки Бурдона в рабочей зоне обладают свойствами пружин и не имеют остаточной деформации. Превышение предельных значений давлений вызывает остаточную деформацию, что недопустимо в эксплуатации. В области давлений до 10 МПа трубчатые пружины изготавливают из латуни или бронзы, для более высоких давлений – из стали.

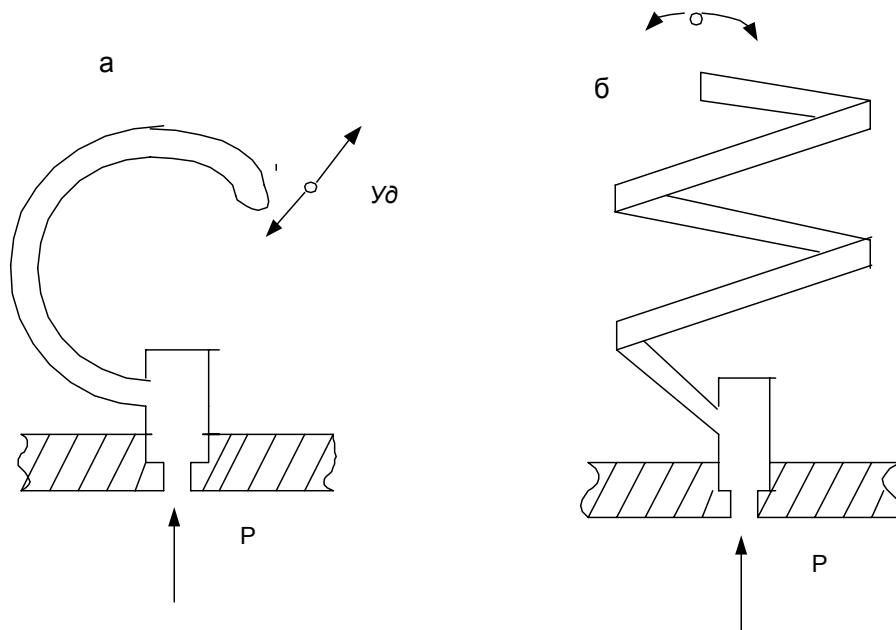


Рис. 22. Функциональная схема трубчатых датчиков давления:

а - трубка Бурдона; б - геликоидальная пружина

Геликоидальная пружина представляет собой упругую металлическую трубку эллиптического сечения, закругленную по спирали. Принцип работы аналогичен.

Перепад давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ измеряют, например, для определения расхода жидкости или газа, а также сопротивления участка трубопровода. Для измерения малых перепадов давления (от 10 до 1600 Па) используют мембранный датчик из эластичной аэростатной ткани, дюритовой резины или фольги (рис. 23, а). Измеряемые давления p_1 и p_2 подводятся к полости датчика с обеих сторон мембраны, на жестком центре которой создается усилие F_r , пропорциональное их разности и направленное в сторону меньшего давления. Выходной шток уплотняется в корпусе сальником или сильфоном. Во втором случае активная площадь мембраны со стороны штока будет меньше на размер активной площади уплотнительного сильфона.

Сильфонный датчик перепада давлений (рис. 23, б) применяется для измерения значительно больших перепадов давления, чем в первом случае. Датчик имеет ЧЭ и ЗУ в

виде дополнительной пружины с устройством изменения предварительной затяжки пружины и СУ, выполненное в виде суммирующего рычага.

Эти датчики обладают высокой чувствительностью из-за отсутствия сил сухого трения в уплотнениях, прямолинейностью статических характеристик, просты и надежны в эксплуатации.

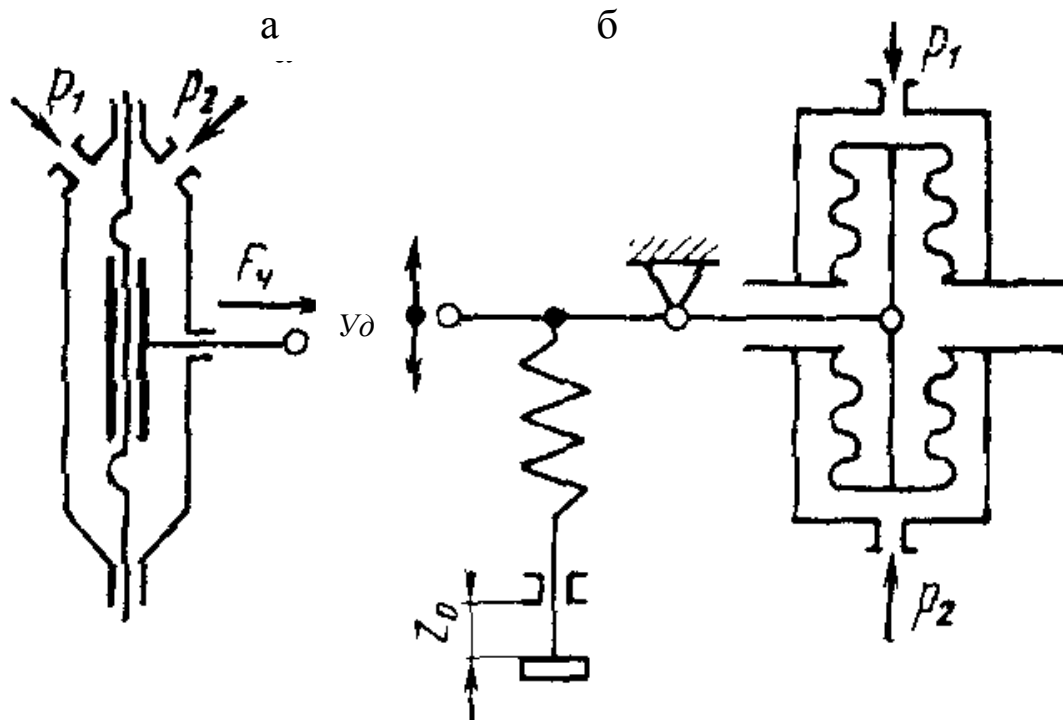


Рис. 23. Функциональная схема датчиков перепада давления

Измерение и контроль давления.

В СЭУ широкое применение получили комбинированные реле давления КРД (рис. 24). При превышении давления заданной величины (установка координаты задания с помощью устройства изменения предварительной затяжки пружины 6) угловой рычаг 3 вызывает срабатывание микровыключателя 8. Соответствующий электрический сигнал через шаговый разъем 9 поступает в систему автоматики, обеспечивая заданный алгоритм функционирования, например, срабатывание АПС, выполнение функции защиты или управления системой. Установка микровыключателя (юстировка) обеспечивается подвижной платой 7 и фиксируется

соответствующим винтом. КРД являются унифицированным элементом в системах автоматики с конкретным целевым назначением.

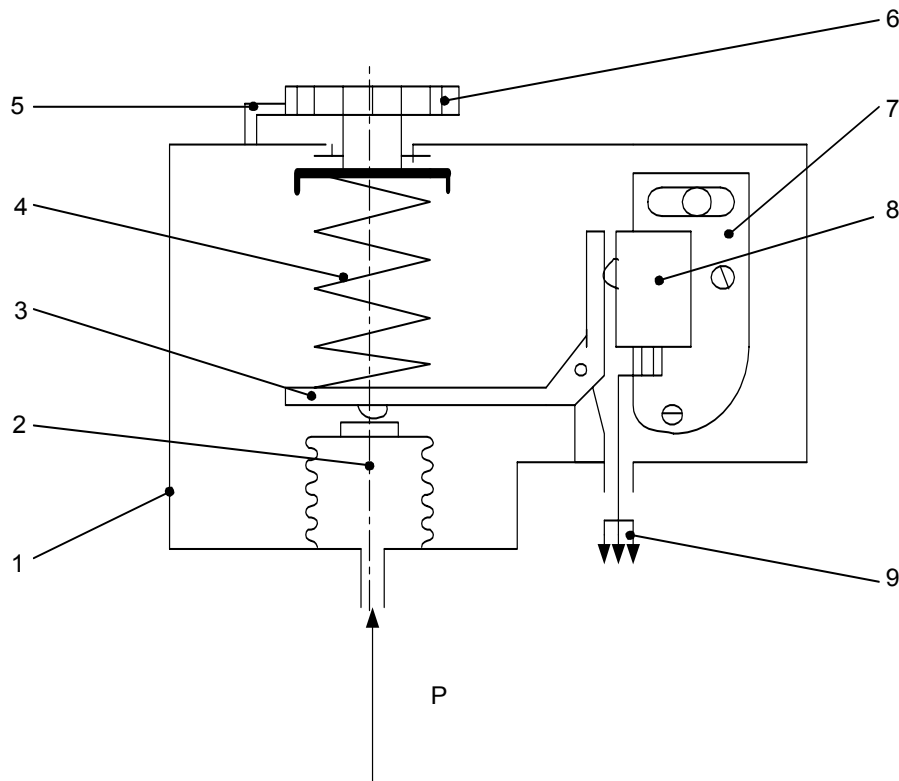


Рис. 24. Функциональная схема КРД:

1-корпус; 2-сильфон; 3-угловой рычаг; 4-пружина; 5-стопор; 6-устройство изменения предварительной затяжки пружины; 7-юстировочная плата; 8-микровыключатель; 9-электрический разъем типа ШР

§ 3. 2. Измерение температур

Для измерения температур применяются приборы (датчики) механического и электрического типа. Механические датчики основаны на тепловом расширении рабочего тела. Приборы, входящие в тепловой контакт с контролируемой средой и по показаниям которых определяют ее температуру, называют термометрами.

Устройства, предназначенные для регулирования температуры, называются терморегуляторами, а обеспечивающие работу АПС и систем контроля – термосигнализаторами.

Механические датчики. Это датчики, действие которых основано на тепловом расширении жидких или твердых тел или на изменении давления газов или паров жидкости в замкнутых системах. Выходными сигналами таких датчиков являются перемещения или усилия, однозначно определяемые изменением температуры.

Жидкостные термометры работают по принципу различного расширения оболочки и находящейся в ней жидкости. Стекланный термометр состоит из баллончика с припаянной к нему прозрачной капиллярной трубкой и шкалы. Баллончик заполнен жидкостью, коэффициент теплового расширения которой в 15 – 30 раз больше, чем оболочки. Оболочку выполняют из стекла (кварца), в качестве наполнителя применяют жидкость (спирт, толуол) или текучий металл (ртуть, галлий).

Жидкостный датчик температуры состоит из ЧЭ в виде металлического термобаллона 1 (рис. 25, а) и сильфона 3, связанных между собой металлическим (медным) капилляром 2, защищенным от внешних воздействий оболочкой. Внутренняя полость заполнена ксилолом, глицерином или ртутью. Термобаллон помещается в контролируемую среду. Выходной сигнал y_d (перемещение штока 5 с возвратной пружиной 4) пропорционален изменению температуры. Жидкостные датчики имеют большие перестановочные усилия и могут использоваться не только для измерения температуры, но и для целей управления (терморегуляторы), в качестве первичных приборов в АПС и защиты (термосигнализаторы).

Часто применяют приборы, аналогичные КРД и отличающиеся тем, что давление в сильфоне создается термобаллоном с легкоиспаряющейся жидкостью, помещенным в измеряемую среду и связанным с сильфоном при помощи капиллярной трубки. В данном случае прибор называется комбинированным реле температуры КРТ.

Датчик с твердым наполнителем термометрической системы имеет аналогичный принцип действия и свойства. Выполнен датчик (рис. 25, б)

в виде жестко закрепленного сильфона 6, внутренняя полость которого заполнена воском с медными опилками. Датчик располагают в среде, температуру которой регулируют путем открытия (закрытия) проходного сечения подвода энергии, например, холодной жидкости или путем ее перепуска. Датчик вместе с регулирующим органом является простейшим терморегулятором.

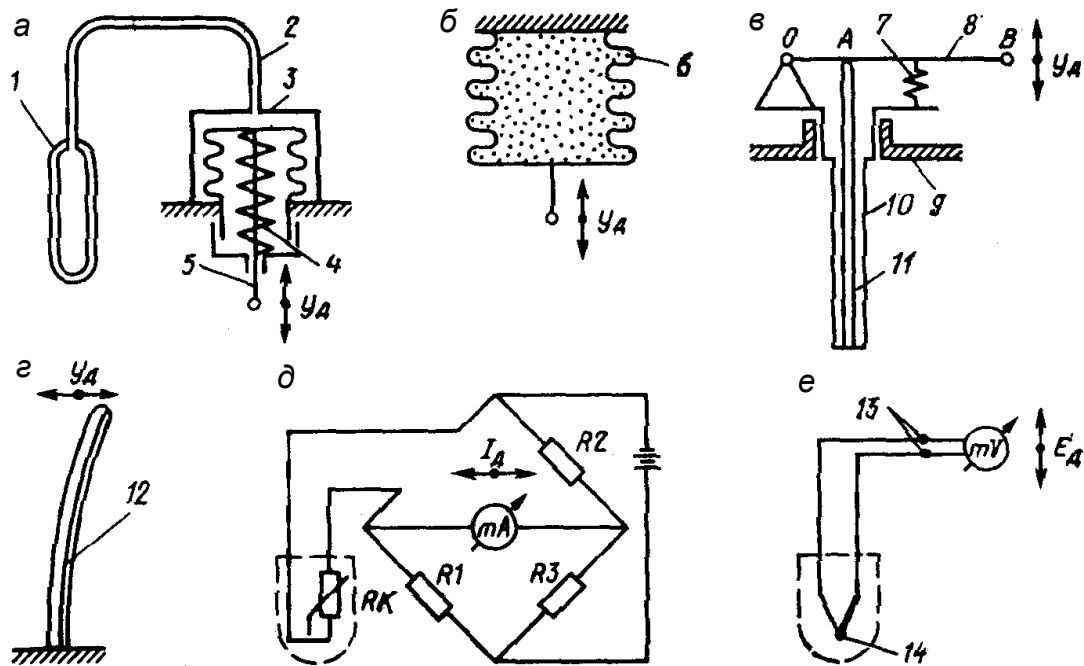


Рис. 25. Функциональные схемы датчиков температуры

Д и л а т о м е т р и ч е с к и й д а т ч и к (рис. 25, в) состоит из трубки 10, нижний конец которой связан со стержнем 11, выполненным из материала с нулевым коэффициентом теплового расширения (сплав инвар, кварцевый стержень). Верхний конец трубки впаян в резьбовой штуцер, на фланце которого закреплен рычаг 8, прижимаемый к стержню 11 пружиной 7. Датчик устанавливают на трубопроводе или теплообменнике 9, а трубка 10 погружена в контролируемую среду. Трубку изготавливают из меди, латуни или стали. Изменение температуры среды приводит к пропорциональному перемещению рычага 8. Уравнение статики дилатометрического датчика

$$y = k \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot l_0 \cdot t^0,$$

где α_1 и α_2 – соответственно коэффициенты линейного расширения материалов трубки и стержня;

l_0 – активная длина дилатометра;

t^0 – температура среды;

k – коэффициент статической передачи рычага,

$$k = \frac{OB}{OA}.$$

Недостатки прибора – малое перемещение, инерционность и невысокая точность измерения. Зато датчик обладает большим перестановочным усилием, что позволяет его использовать в качестве терморегулятора или термосигнализатора.

Биметаллический датчик (рис. 25, *з*) состоит из плоской или спиральной биметаллической пружины 12, которая спаяна из двух пластин разнородных металлов. При изменении температуры пластины удлиняются неодинаково, вызывая изгиб плоской или скручивание спиральной пружины. Недостаток – невысокая точность измерения, достоинство – малая стоимость, простота и надежность.

Термометрические датчики по конструкции аналогичны жидкостным (см. рис. 25, *а*). Так, в парожидкостном датчике термопатрон заполняют на 2/3 объема жидкостью с температурой кипения ниже измеряемой, остальной объем занимают пары. Для диапазона измеряемых температур от -20°C до $+100^\circ \text{C}$ применяют хлорметил. От 0°C до $+125^\circ \text{C}$ – хлорэтиловую жидкость, от 0°C до $+150^\circ \text{C}$ – этиловый эфир или ацетон, от 0°C до $+200^\circ \text{C}$ – бензол. Давление паров по капиллярной трубке с внутренним диаметром 0,3 мм передается на дистанцию от 1,5...2 м до 9 м к датчику давления (манометру), шкала которого проградуирована в градусах Цельсия.

Общими недостатками этих датчиков являются большая тепловая инерционность, трудности ремонта в судовых условиях, ограниченность расстояния передачи входного сигнала.

Электрические датчики (рис. 25, д) с терморезисторами работают по принципу изменения активного сопротивления проводников и полупроводников при изменении их температуры.

К одной диагонали измерительного мостика Уитсона подведено постоянное напряжение, в другую – включен прибор для измерения тока, миллиамперметр. В три плеча мостика включены постоянные сопротивления R_1 , R_2 , R_3 в четвертое – терморезистор R_k , который размещен в зоне измеряемой температуры. Сопротивления подбирают так, чтобы при $t = 0^\circ\text{C}$ ток в цепи отсутствовал (мостик уравновешен). При изменении температуры ток I_∂ пропорционален температуре $I_\partial = k \cdot t$ или $y = k \cdot x$ (уравнение статики). Диапазон измерений от -50 до $+600^\circ\text{C}$. Датчик смонтирован в защитном герметизированном корпусе.

Терморезистор представляет собой каркас с намотанной на нем проволокой (платиновой, медной или никелевой).

Полупроводниковый терморезистор представляет собой смесь из порошкообразных окислов MnO_2 , CuO , Fe_2O_3 , NiO , спрессованную и спеченную при высокой температуре. По сравнению с проволочными полупроводниковые датчики обладают большим температурным коэффициентом электрического сопротивления при выраженной нелинейности и стабильностью сопротивления во времени.

Обозначение терморезисторов: платиновых – ТСП, медных – ТСМ, полупроводниковых – ММТ, КМТ и т.д.

Термометрические датчики (пирометры) применяют для измерения высоких температур в СЭУ. На рис. 25, е представлен пирометр, состоящий из термопары (два изолированных проводника из разнородных металлов, спаянных между собой и помещенных в защитный металлический термостойкий корпус). Этот спай называется «горячим», к свободным концам («холодным» спаям) присоединен милливольтметр. При разности температур между горячим и холодными спаями возникает термоэлектродвижущая сила (термоЭДС), измеряемая милливольтметром и

являющаяся выходным сигналом датчика. Применяемые приборы (пирометры) для измерения температур выпускных газов дизелей (типа ТКД - термометрический дизельный комплект) имеют дополнительное устройство для компенсации влияния температуры в месте установки измерительного устройства на выходной сигнал датчика. Обозначение термопар, например, платино-платинородиевых – ПП, хромель-копелевых – ХК, хромель-алюминиевых – ХА, медь-копелевые – МК и др.

Электрические датчики обладают высокой чувствительностью, широким диапазоном измеряемых температур, возможностью передачи сигнала на большие расстояния.

Они незаменимы при применении микропроцессорных комплектов в системах судовой автоматики.

§ 3. 3. Измерение уровня жидкости

П о п л а в к о в ы е д а т ч и к и у р о в н я получили широкое применение в СЭУ вследствие их простоты, линейности и малой стоимости при высокой надежности. Типичным представителем поплавковых датчиков является датчик фирмы «Мобрей». Датчик установлен в емкости на магнитопроницаемой вставке, перемещение рычага с поплавком вызывает перемещение магнита, который обеспечивает срабатывание герметизированных контактов (герконов), управляющих электрической цепью. В данном случае датчик использован в качестве сигнализатора уровня.

М е м б р а н н ы й д а т ч и к у р о в н я (рис. 26, а) широко применяется при автоматизации паровых котлов. Мембрана 5, разделяющая корпус датчика на две полости, является ЧЭ уровня воды в барабане котла 1. К жесткому центру мембраны подвешен груз 6. Нижняя полость корпуса через дроссельный клапан 7 соединена с конденсационным сосудом 2, уровень в котором поддерживается постоянным благодаря обратному сливу конденсата в котел через перепускную трубу. На мембрану снизу действует столб воды h_0 . Верхняя полость соединена с водяным простран-

ством барабана, и на мембрану действует столб воды h_1 . Сила, действующая на мембрану площадью F от перепада уровней $h = h_0 - h_1$, уравнивается суммой сил от веса груза G_2 и настроечной пружины 3. Уравнение статики датчика

$$h \cdot \rho \cdot g \cdot F = G_2 + a_1 \cdot c \cdot (z_0 + z) \quad \text{или} \quad y = k \cdot x,$$

где ρ – плотность воды;

g – ускорение свободного падения;

a_1 – передаточный коэффициент;

c – жесткость пружины;

z – текущая деформация пружины;

z_0 – предварительная затяжка пружины.

Грузом уравнивают $\approx 80\%$ силы от перепада уровней, а пружиной $\approx 20\%$.

Достоинство мембранных датчиков – высокая чувствительность и отсутствие тепловой инерционности. Давление в котле уравновешено. Влияние качки снижают путем настройки дроссельного клапана 7.

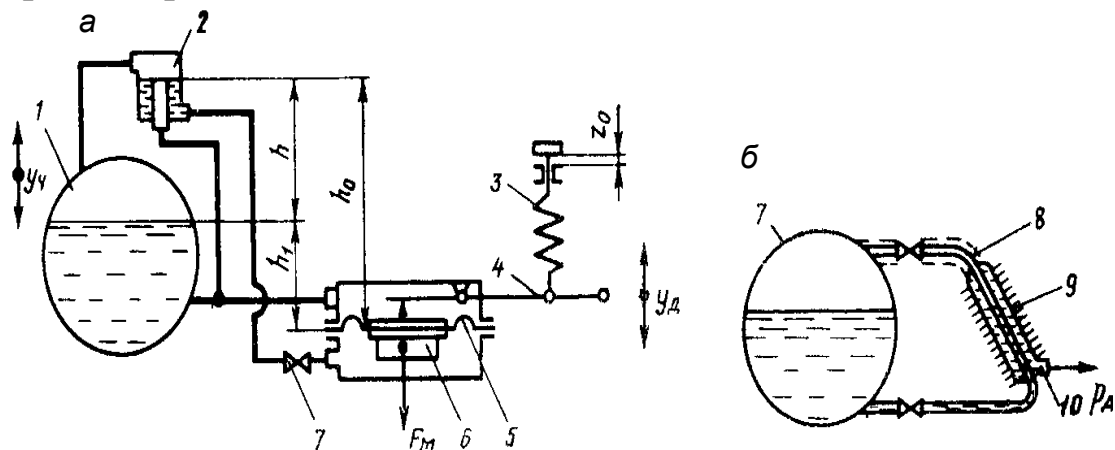


Рис. 26. Функциональные схемы датчиков уровня жидкости

Термогидравлический датчик уровня (см. рис. 26, б) применяется на паровых котлах. Он состоит из стальной трубки 8, закрепленной внутри кожуха 9 с ребрами. Верхний конец трубки соединен с паровым, а нижний – с водяным пространствами пароводяного барабана 1.

Поэтому, согласно свойству сообщающихся сосудов, уровень воды в них всегда одинаков.

Пространство между трубкой 8 и кожухом 9, заполненное конденсатом, соединяется трубкой 10 с сигнализатором давления или исполнительным механизмом усилителя, управляющим питательным клапаном (на рисунке не показаны). Устанавливают датчик так, чтобы угол наклона трубки 8 был примерно равен 30 градусам и ее середина соответствовала уровню воды в барабане котла.

При изменении уровня воды в барабане изменяется соотношение между площадями поверхностей трубки 8, омываемыми водой и паром. Теплоотдача пара выше, чем воды при одинаковой их температуре, поэтому количество теплоты, передаваемое водой и паром через трубку конденсату, заполняющему кольцевое пространство датчика, будет различным. При понижении уровня воды, например, изменение количества теплоты, подводимой к конденсату, вызовет его испарение и пропорциональное повышение давления p_d на выходе из датчика. Недостаток датчика – значительная тепловая инерционность. На выходной сигнал влияет температура окружающей среды.

Вследствие простоты и надежности эти датчики используются при автоматизации небольших котлов.

П о л у п р о в о д н и к о в ы е р е л е у р о в н я ПРУ-5М предназначены для контроля уровня жидкостей в аппаратах стационарных и судовых установок (вода, аммиак, хладон) при давлениях до 20 МПа. Реле уровня состоит из первичного (ПП) и вторичного передающего (ПРП) преобразователей (рис. 27).

ПП и ПРП должны устанавливаться вне взрывоопасных помещений и соответствовать требованиям Регистра РФ, предъявляемым к устройствам управления судном, сигнализации, измерения и контроля неэлектрических величин для судов неограниченного района плавания.

В ПП перемещение металлизированного поплавка в поплавковой камере преобразуется в сигнал переменного тока с помощью индуктивных катушек L_1 и L_2 , включенных в

схему выносного полумоста. Сигнал с ПП через разъем Ш1 поступает на дифференциальный полупроводниковый усилитель ПРП. В выходную цепь усилителя включено поляризованное электромагнитное реле, контакты которого и управляют исполнительным механизмом или каналом АПС.

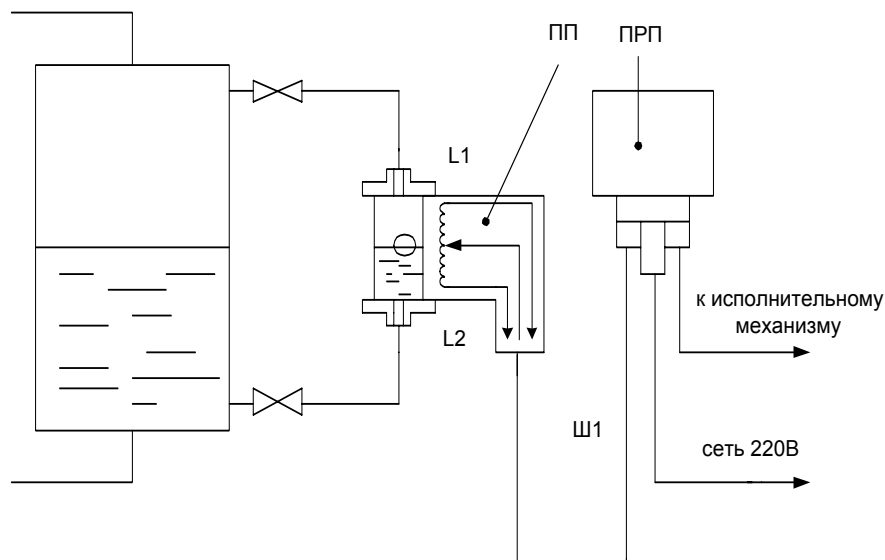


Рис. 27. Схема установки реле уровня ПРУ-5М на емкости

Сигнализатор уровня СУС-160М предназначен для контроля уровня жидких сред и уровня раздела жидкостей, например, нефтепродукты – вода, с резко отличающимися относительными диэлектрическими проницаемостями.

Сигнализатор состоит из первичного (ПП) и вторичного (ВРП) преобразователей.

ПП выполняются водопыленепроницаемыми с искробезопасными элементами взрывозащиты. Потребляемая мощность не превышает 15 В·А при электрической нагрузке на контакты реле не более 500 В·А. Удаление ВРП ограничено сопротивлением линии связи в пределах 10 Ом.

ВРП представляет собой полупроводниковый усилитель с емкостным входом и электромагнитным реле на выходе.

ПП состоит из двух концентрично расположенных трубок, закрепленных на фланце прибора. ПП – это по сути конденсатор, подключенный к ВРП. При перемещении уровня жидкости или границы раздела сред изменяется емкость ПП и ВРП соответственно реагирует на это. Погрешность срабатывания ± 10 мм по уровню и не более ± 15 мм для границы раздела.

§ 3. 4. Измерение частоты вращения

В СЭУ частоту вращения валов измеряют механическими, гидравлическими, электрическими и электронными измерительными приборами.

М е х а н и ч е с к и й д а т ч и к является самым распространенным прибором. Принцип работы - в преобразовании частоты вращения в центробежную силу грузиков ЧЭ скорости и сравнении ее с заданной силой действия пружины (рис. 28). Выходная координата датчика обеспечивает управление работой микровыключателя, который задействован в электрической цепи системы аварийной и предупредительной сигнализации.

Между входной и выходной координатами датчика имеется зависимость $y = k \cdot \omega$, которая является статической характеристикой датчика. Подобные приборы являются сигнализаторами. Например, в эксплуатации они широко применяются в виде центробежного реле скорости РЦ-3 (трехуровневое реле, с тремя микровыключателями, настроенными на различные частоты вращения). В первую очередь они используются для автоматизации дизель-генераторов.

Г и д р а в л и ч е с к и й д а т ч и к в качестве ЧЭ содержит шестеренчатый насос или центробежный насос (импеллер) с приводом от двигателя. С изменением частоты вращения вала меняются подача и давление масла на выходе из насоса. Таким образом, связывается частота вращения, например, с давлением насоса, при этом шкала манометра градуируется соответствующим образом.

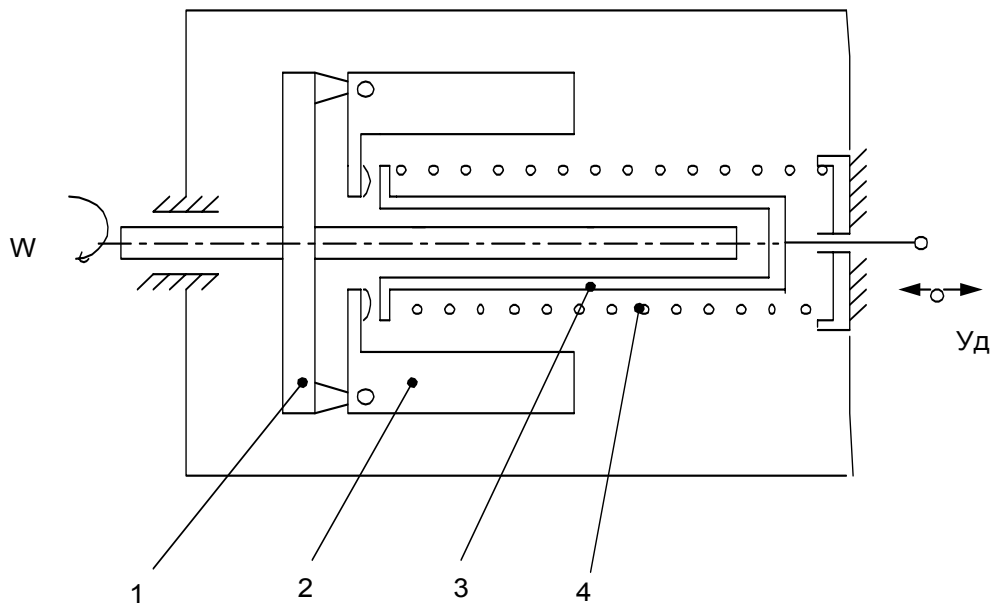


Рис. 28. Функциональная схема датчика частоты вращения:
1-диск (крестовина), 2-грузик, 3-муфта, 4-пружина

Недостаток датчика заключается в нелинейности статической характеристики и влиянии вязкости масла на результат измерений.

Электрический датчик представляет собой тахогенератор (первичный прибор) постоянного или переменного тока, связанный электрически с тахоуказателем (вторичный прибор). Тахоуказатель – это электродвигатель соответственно постоянного или переменного тока с заторможенным спиральной пружиной ротором. Чем выше частота вращения, тем больше напряжение на выходе генератора и крутящий момент на роторе тахоуказателя, тем на больший угол повернется стрелка прибора. Статическая характеристика этих датчиков линейна и практически не зависит от других факторов. Достоинство этих датчиков – возможность непосредственно использовать электрический сигнал в системах автоматизации.

Электронные устройства (рис. 29) состоят непосредственно из индукционного импульсного датчика 1, соединенного с безынерционным электронным счетным

блоком 2. Сам индукционный датчик представляет собой жестко закрепленный магнитный сердечник с катушкой индуктивности и подвижного якоря 3 из магнитомягкого материала, закрепленного на валу 4.

При вращении вала штифт 3, проходя мимо сердечника, создает пульсирующий магнитный поток, под действием которого в катушке 1 индуцируется ЭДС. Созданные импульсы поступают на вход частотного преобразователя 2 и затем преобразуются в выходной сигнал устройства y_d .

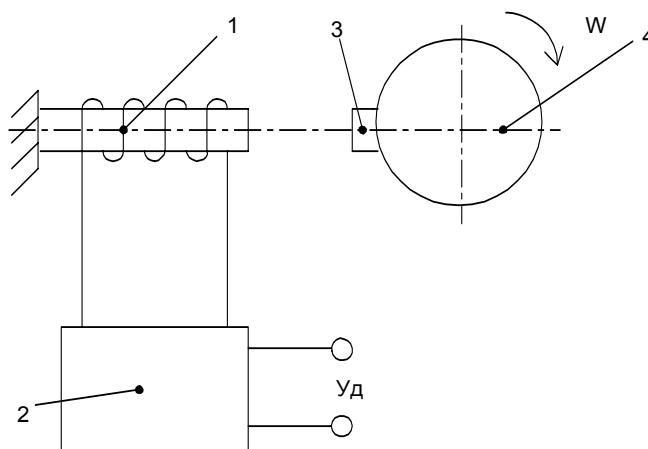


Рис. 29. Функциональная схема электронного устройства для измерения частоты вращения

Аналогично работают электронные устройства для измерения частоты вращения с фотоэлектрическим датчиком (здесь импульсы задаются прерыванием светового потока штифтом на коленчатом вале).

§ 3.5. Измерение перемещений

Потенциометрические датчики (рис. 30, а) представляют собой потенциометр, включенный в электрическую схему как делитель напряжения. Центральный контакт потенциометра связан механически с движущимся звеном. В зависимости от типа потенциометра происходит

преобразование движения (поворота) в электрическую величину.

Уравнение статики $U_{вых} = \frac{U_{вх}}{R} \cdot R_x$ или $y = k \cdot x$

Индуктивные датчики перемещения выполняют как по схеме реверсивного, так и цилиндрического датчика (рис 30, б и в). Достоинство этих датчиков в бесконтактном измерении перемещения, однако, диапазон измеряемого перемещения невелик.

Перемещение якоря 3 изменяет индуктивность обмотки 2, что позволяет регистрировать перемещение с помощью шлейфных или электрических осциллографов.

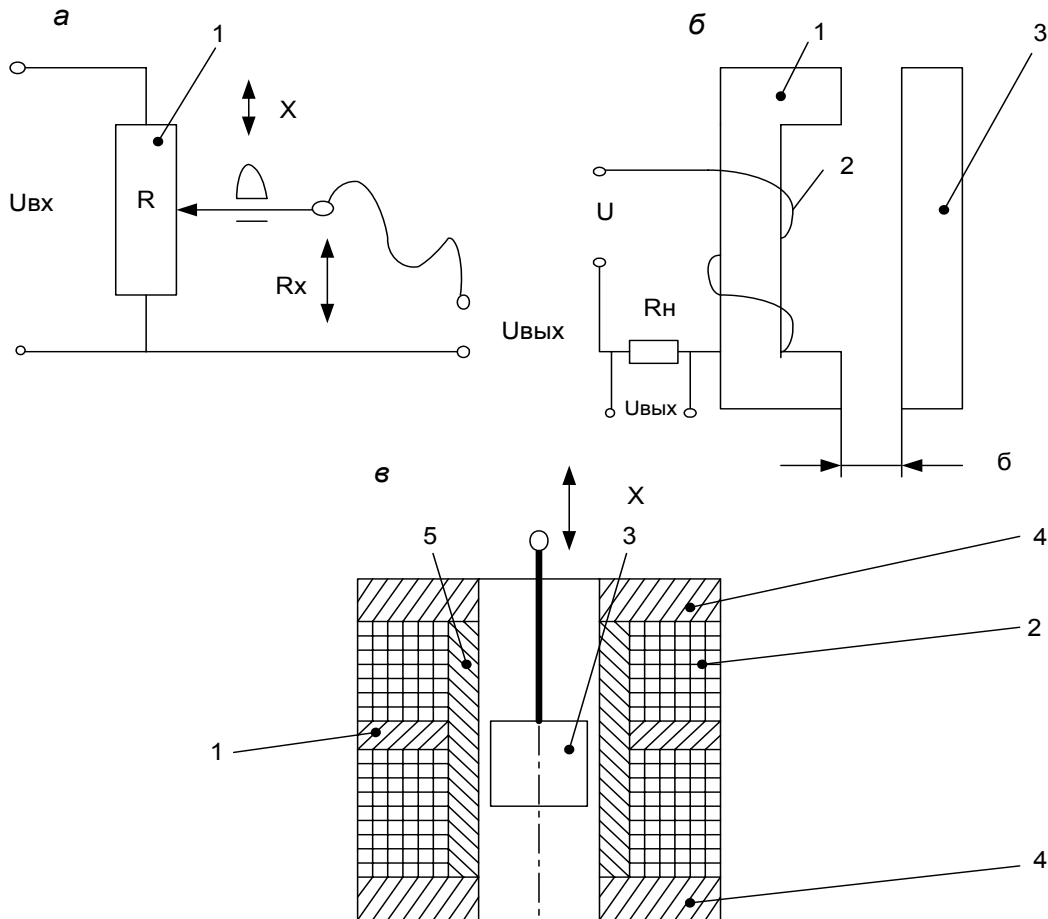


Рис. 30. Схемы датчиков перемещений:
а - потенциометрический; б - реверсивный;
в - цилиндрический

Глава 4. Усилительные и регулирующие органы

Выходной сигнал измерителя, как правило, недостаточен для непосредственного воздействия на регулирующий орган [13, 14]. Поэтому приходится повышать мощность этого сигнала в усилителях мощности.

§ 4. 1. Структурная схема усилительного органа

Усилитель мощности (УМ) – это устройство, в котором осуществляется увеличение мощности входного сигнала за счет вспомогательной энергии (W) постороннего источника (рис. 31).

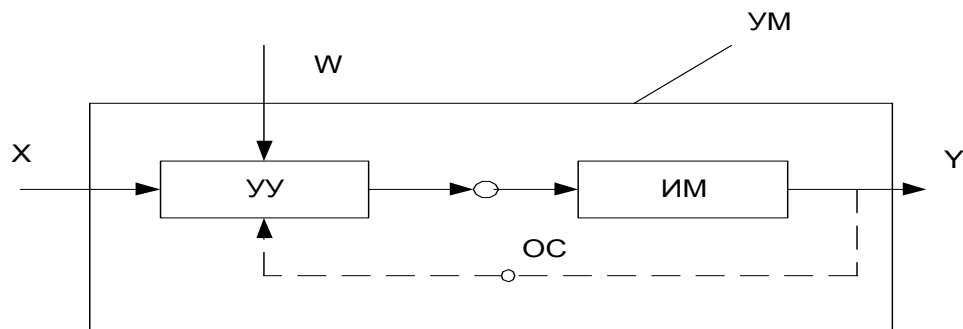


Рис. 31. Структурная схема усилителя мощности:
УУ – управляющее устройство; ИМ – исполнительный механизм; ОС – обратная связь

Применяются усилители (по виду вспомогательной энергии) механические (по принципу рычага), гидравлические, пневматические, электрические и комбинированные. Принцип действия усилителей одинаков, рабочая среда с энергией W подается к управляющему устройству (УУ) типа распределителя и с помощью сигнала X осуществляется дозированный подвод вспомогательной энергии к исполнительному механизму (ИМ). Здесь энергия W преобразуется в механическую работу по перемещению выходного звена УМ. В УМ возможно наличие обратной связи (ОС), повышающей устойчивость работы усилителя.

§ 4. 2. Гидравлические усилители

Гидравлические усилители с отсечным золотником и поршнем исполнительного механизма (ИМ) двустороннего действия представлены на рис. 32, а)

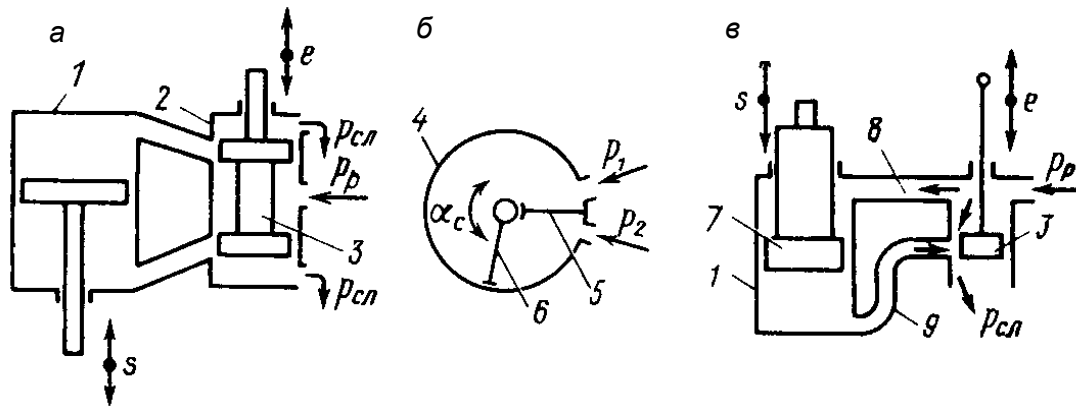


Рис. 32. Функциональные схемы гидравлических усилителей с ЖОС

Масло под давлением p_p подводится к золотнику 3 управляющего устройства, расположенному во втулке 2. При нейтральном положении золотника, когда окна каналов к полости исполнительного механизма 1 перекрыты (рис. 16, в), поршень ИМ неподвижен.

При смещении золотника Δe от среднего положения происходит сообщение одной полости ИМ с напорной магистралью, другой — со сливной. Под перепадом давления поршень ИМ перемещается на величину Δs .

Из условия неразрывности потока масла, поступающего через площадь проходного сечения F , открытую золотником УУ за время Δt и при пренебрежении силами сопротивления движения поршня, сжимаемостью масла и инерцией движущихся масс ИМ

$$f \cdot V \cdot \Delta t = F \cdot \Delta s,$$

где V — скорость потока масла в окне;

F — площадь поршня ИМ.

При прямоугольных окнах втулки шириной b

$$b \cdot \Delta e \cdot V \cdot \Delta t = F \cdot \Delta s, \quad \text{откуда} \quad \Delta e = \frac{F}{b \cdot V} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

При условии, что Δt (в течение которого происходит перемещение Δe) бесконечно мало, возможно записать уравнение движения УМ:

$$\Delta e = \frac{F}{b \cdot V} \cdot \frac{d(\Delta s)}{dt} \quad (8)$$

Введем относительные координаты в полученное уравнение:

$$\begin{aligned} \text{входная} \quad x &= \frac{\Delta e}{e_{\max}}, & \text{выходная} \quad y &= \frac{\Delta s}{s_{\max}}. \\ \text{Тогда} \quad x &= \frac{F}{b \cdot V} \cdot \frac{s_{\max}}{e_{\max}} \cdot \frac{dy}{dt}, & \text{или} \quad x &= T_c \cdot \frac{dy}{dt}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $T_c = \frac{F}{b \cdot V} \cdot \frac{s_{\max}}{e_{\max}}$ – время действия ИМ, определяемое

как время перемещения поршня из одного крайнего положения в другое при максимальном значении входной координаты $x = 1$;

$\frac{dy}{dt}$ – относительная скорость движения поршня.

Если выходной сигнал ИМ необходимо получить в виде поворота α_c (рис. 32, в), то вместо поршневого ИМ присоединяют к УУ лопастной исполнительный механизм двустороннего действия.

Гидравлический усилитель с дифференциальным поршневым исполнительным механизмом (рис. 32, в). Активная площадь нижнего основания поршня 7 значительно больше площади верхнего основания. Верхняя полость неуправляема, в нее по каналу 8 поступает масло под давлением p_p из напорной магистрали. При среднем положении золотник 3 закрывает канал 9 и поршень неподвижен. Смещение Δe золотника вверх приводит к сообщению нижней полости со сливом и поршень перемещается вниз. Смещение золотника вниз

приводит под действием перепада давлений к движению поршня вверх.

Если установить на магистрали, связывающей окно золотника с полостью поршня ИМ, дроссель, то появляется возможность регулировать время действия УМ T_c .

При автоматизации паровых котлов применяют гидравлические усилители со струйными УУ (рис. 33).

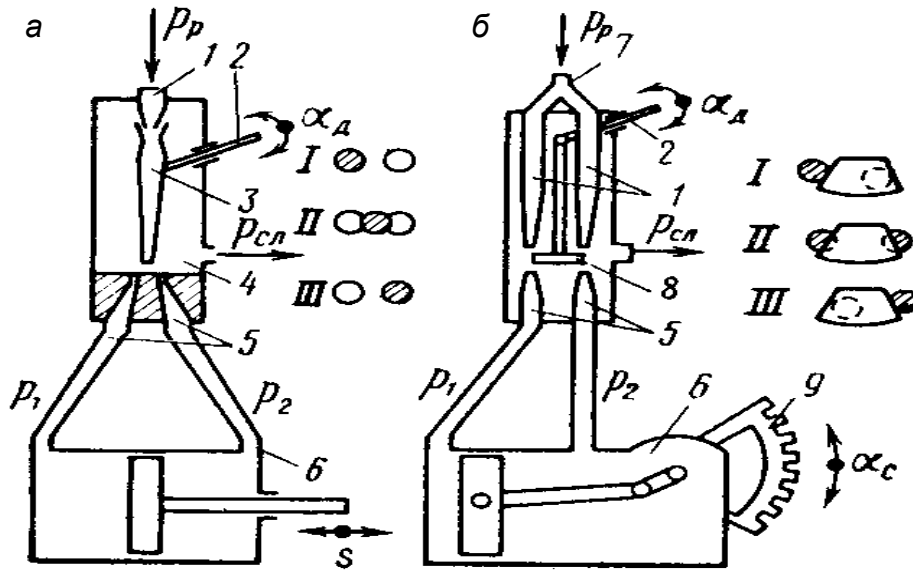


Рис. 33. Функциональные схемы струйных усилителей

В корпусе УУ установлены напорное сопло 1, качающаяся струйная трубка (сопло) 3 и два приемных сопла (диффузора) 5, которые трубопроводами сообщаются с полостями ИМ 6 двустороннего действия. Вода (реже масло или конденсат) под давлением $p_p = (4...8) \cdot 10^5$ Па подводится через напорное сопло в диффузор струйной трубки 3, закрепленной на оси 2. Ось совершает качательные движения под воздействием датчика. При выходе из сужающейся трубки 3 потенциальная энергия движения преобразуется в кинетическую, а в расширяющихся соплах 5 кинетическая энергия вновь превращается в потенциальную. Среднему положению II трубки относительно окон соответствует одинаковое давление в выходных соплах 5 ($p_1 = p_2$). При этом поршень ИМ неподвижен. Смещение сопла 3 приводит к соответ-

вующему перемещению поршня ИМ. Несколько иная конструкция струйного управляющего устройства представлена на рис. 33, б. Здесь подводом жидкости к ИМ управляет качающаяся заслонка 8, связанная с датчиком валом 2.

Рассмотренные усилители являются астатическими (рис. 16, в).

Гидравлический усилитель с жесткой обратной связью (ЖОС) представлен на рис. 34. Он отличается от усилителя (рис. 32, а) тем, что через рычаг жесткой обратной связи (кинематической) АОВ передается обратное воздействие от поршня 3 ИМ на подвижную втулку 1 УУ. Если золотник 2 смещается относительно втулки из среднего положения вверх на расстояние Δe_∂ , то верхняя полость ИМ сообщается с напорной магистралью, а нижняя – со сливной. Поршень 3 движется вниз и разворачивает рычаг АОВ в положение А'О'В', перемещая втулку вверх на расстояние $\Delta e_{жс}$ и тем самым перекрывая золотником окна. Движение поршня прекращается.

Такая обратная связь, принцип действия которой основан на компенсации перемещений, является кинематической жесткой обратной связью. Такая связь обеспечивает как бы слежение выходной координаты за входной. Это следящая ЖОС. Таким образом,

$$\Delta e = \Delta e_\partial - \Delta e_{жс}, \quad \text{где} \quad \Delta e_{жс} = \frac{AO}{OB} \cdot \Delta s.$$

После подстановки значения Δe в формулу (8) получим

$$\Delta e_\partial - \frac{AO}{OB} \cdot \Delta s = \frac{F}{b \cdot V} \cdot \frac{d(\Delta s)}{dt}.$$

После введения относительных координат $x = \frac{\Delta e_\partial}{e_{\max}}$ и

$$y = \frac{\Delta s}{s_{\max}} \quad \text{получаем выражение} \quad x = T_c \cdot \frac{dy}{dt} + k_{жос} \cdot y, \quad (10)$$

где $k_{жос}$ – коэффициент статической передачи ЖОС,

$$k_{жос} = \frac{AO}{OB} \cdot \frac{s_{\max}}{e_{\max}}.$$

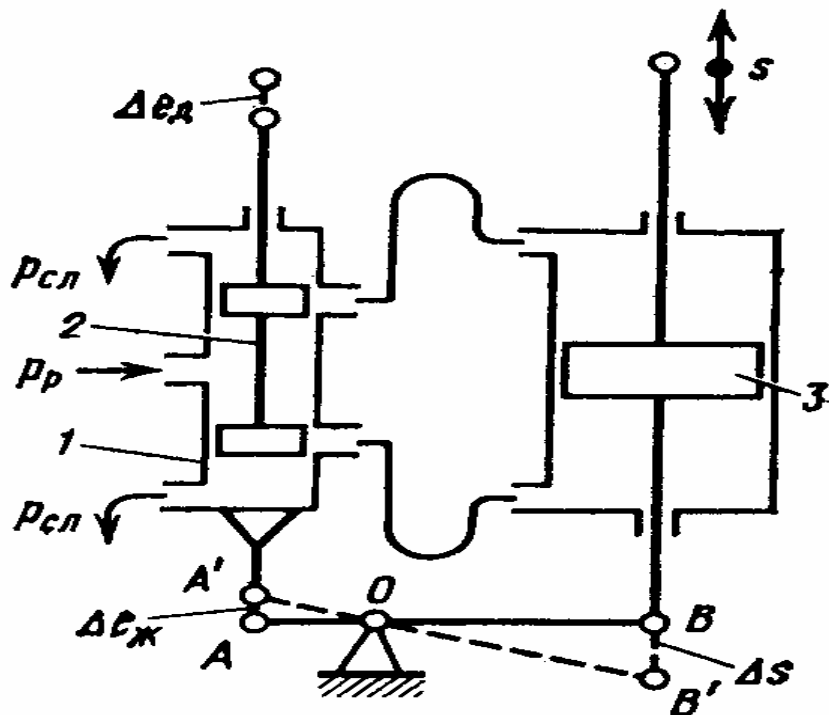


Рис. 34. Функциональная схема гидравлического усилителя с ЖОС

В эксплуатации встречаются и другие виды гидравлических усилителей, например, с УУ типа дроссель переменного сечения и ИМ одностороннего действия.

§ 4. 3. Пневматические усилители

Усилители с распределителем воздуха типа сопло – заслонка (рис. 35) работают по принципу дросселирования. УУ усилителя состоит из дросселя 1 постоянного сечения, к которому подводится рабочий воздух при постоянном давлении p_p , и дросселя переменного сечения в виде сопла 6 инжекционного типа с заслонкой 5, перемещаемой датчиком с помощью рычага 4. Последовательно расположенные дроссели образуют делитель давления воздуха. Выходное давление $P_{вых}$ в трубопроводе 3 и в полости ИМ 2 зависит от зазора между заслонкой 5 и соплом 6, через которое воздух стравливается в атмосферу.

Эти УМ называют расходными усилителями. Недостатком подобных УМ являются затраты энергии на работу компрессоров и очистку рабочего воздуха.

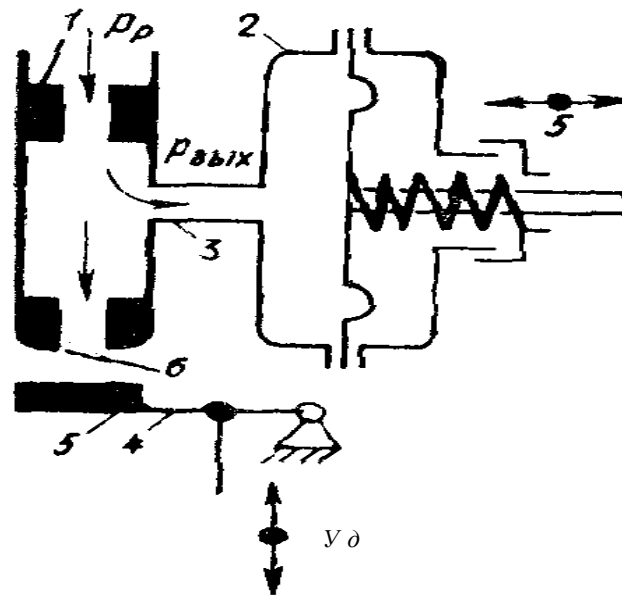


Рис. 35. Функциональная схема пневматического усилителя с соплом-заслонкой.

Пневматический безрасходный компенсационный усилитель (рис. 36, а) является однокаскадным усилителем.

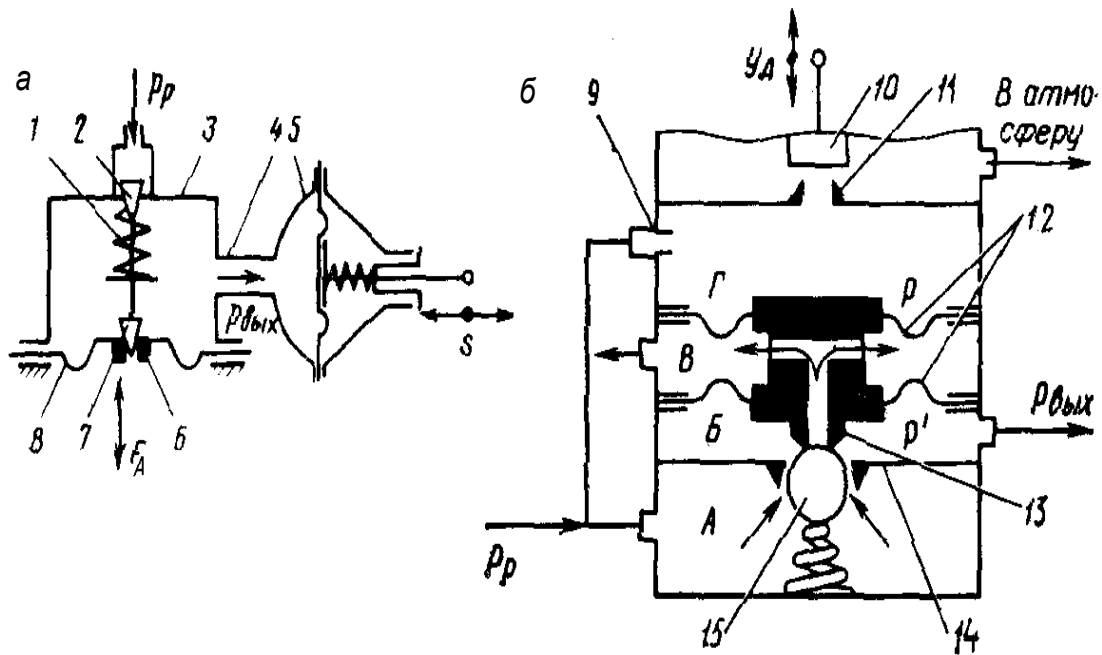


Рис. 36. Функциональные схемы безрасходных пневматических усилителей

Он представляет собой камеру 3, в которой расположен шток с клапанами. Верхний клапан 2 прижимается пружиной 1 к неподвижному седлу штуцера, к которому подводится воздух постоянного давления p_p . На нижний клапан 7 опирается подвижное седло 6, закрепленное на эластичной мембране 8.

Полость камеры 3 соединена трубопроводом 4 с мембранным ИМ 5 одностороннего действия.

Работа УМ основана на принципе компенсации усилий. Входным параметром является усилие F_∂ , действующее от датчика на седло мембраны.

При установившемся режиме оба клапана закрыты, а величина выходного сигнала $p_{вых}$ пропорциональна силе F_∂ . При изменении силы F_∂ открываются либо верхний, либо нижний клапан, что соответственно приводит к изменению давления $p_{вых}$ и пропорциональному перемещению штока ИМ. Усилитель является статическим.

При необходимости обеспечения высокого быстродействия при большой выходной мощности применяют двухкаскадные усилители с дроссельным УУ в первом каскаде и компенсационным УУ во втором (рис. 36, б).

Входным параметром усилителя является положение y_∂ заслонки 10 относительно сопла 11, которое однозначно определяет давление воздуха, поступающего через дроссель 9 в междроссельную камеру Г. Управляющее устройство второго каскада состоит из трех отдельных камер А, Б, В.

Рабочий воздух под давлением $p_p = 1.4 \cdot 10^5$ Па подводится в камеру А, которая через шариковый клапан 15 сообщается с камерой Б. В камере Б формируется выходной сигнал $p_{вых}$, идущий к мембранному ИМ одностороннего действия (на схеме не показан). Камера В постоянно сообщена с атмосферой и образована двумя мембранами 12 одинаковой активной площади с общим жестким центром, отделяющим камеру Б от Г.

При перемещении датчиком заслонки 10 вверх давление в полости Г уменьшится и жесткий центр с мембранами 12 переместится вверх, снижая давление $p_{вых}$ за счет перетекания воздуха из объема Б в объем В.

При движении y_d вниз давление в полости Г повысится, что обеспечит перемещение клапана 15 и увеличение давления $p_{вых}$. Давление в камере Б изменяется до тех пор, пока не сравняется с давлением в камере Г. Поэтому каждому значению y_d соответствует определенное значение выходного давления. УМ является статическим звеном. Данная схема получила широкое применение в судовой автоматике.

§ 4. 4. Регулирующие органы

Регулирующие органы (РО) служат для управления подводом (отводом) вещества или энергии в объекты регулирования с целью изменения регулируемого параметра.

По роду протекающего вещества или энергии РО делят на пневматические, гидравлические и электрические.

Пневматические и гидравлические по конструктивному исполнению делят на клапанные одно и двухседельные (рис. 37, а и б), поворотные заслонки (рис. 37, в), трехходовые клапана (рис. 37, г), клапанны-золотниковые (рис. 37, д) и золотниковые (рис. 37, е). Схема действия этих РО очевидна.

Входной координатой РО является перемещение штока или разворот золотника, выходной координатой – проходное сечение f или расход W рабочей среды под действием перепада давлений Δp .

Уравнение статики запишется в следующем виде:

$$W = kf \sqrt{\Delta p},$$

где расход рабочей среды определится перепадом давлений на участке РО

$$\Delta p = p_1 - p_2.$$

Электрическими РО являются контакты электромагнитных реле и пускателей, транзисторы, тиристоры, электромашинные преобразователи и т. п.

Уравнение статики линейно связывает входную и выходную координаты, если РО представляет собою электронный прибор, или дискретно, если РО представлен контактами электромагнитного реле.

Электрические регулирующие органы получили широкое применение в системах судовой автоматики.

При проектировании регулирующих органов и в эксплуатации стараются обеспечить линейную зависимость между входной и выходной координатами.

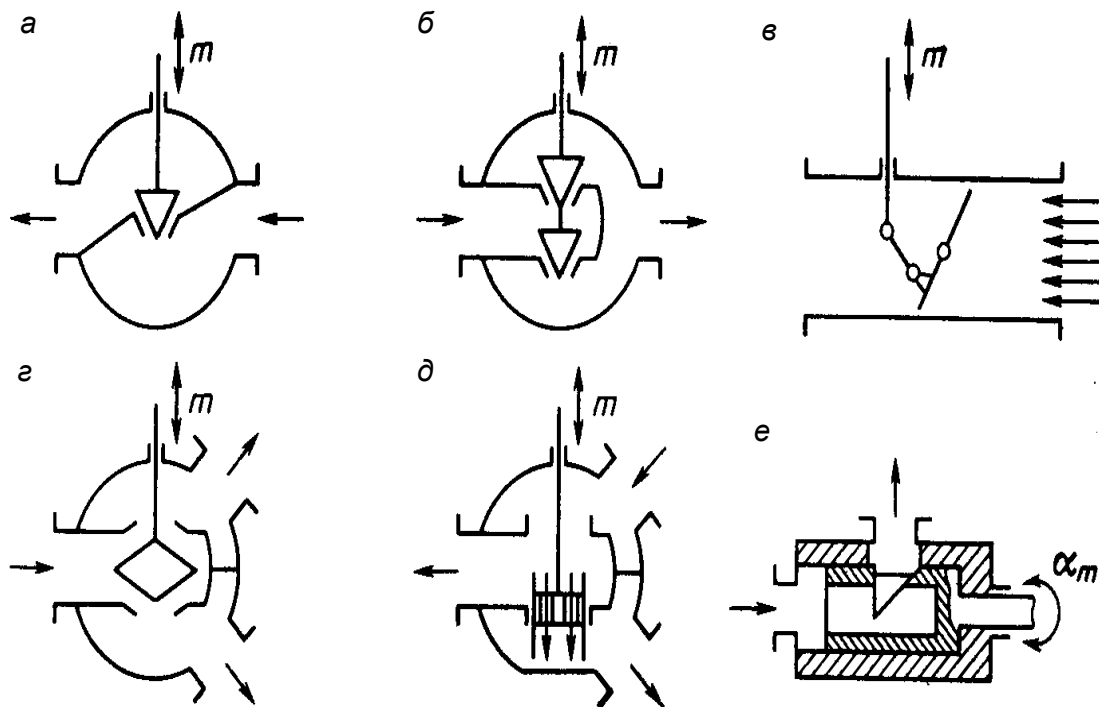


Рис. 37. Схемы регулирующих органов

Глава 5. Типовые элементарные звенья систем судовой автоматики

Как в состав САР, так и в состав ее элементов могут входить элементарные звенья, поведение которых в статике и динамике является стандартным и может быть описано соответствующими математическими зависимостями. Возможно выделить следующие так называемые **т и п о в ы е э л е м е н т а р н ы е з в е н ь я**, на которые можно расчлени любую САР или ее синтезировать, используя эти звенья [8, 12, 17, 18]:

1 – идеальное звено; 2 – апериодическое звено 1-го порядка (однoемкoстнoе); 3 – апериодическое звено 2-го порядка (двухъемкoстнoе); 4 – колебательное звено 2-го порядка (двухъемкoстнoе); 5 – интегрирующее звено; 6 – дифференциальное звено; 7 – звено чистого запаздывания.

Дифференциальные уравнения движения (динамики) типовых звеньев могут иметь высокий порядок, что затрудняет решение их и анализ неустановившихся режимов движения.

С целью получения эффективного и экономного решения дифференциальных уравнений в автоматике широко применяется операционное исчисление как совокупность методов прикладного математического анализа.

Некоторые сведения об операторной форме записи дифференциальных уравнений.

Операторная форма записи основана на замене операции дифференцирования по времени индексом p (где p - оператор Лапласа):

$$\frac{d}{dt} \rightarrow p; \frac{d^2}{dt^2} \rightarrow p^2; \frac{d^n}{dt^n} \rightarrow p^n.$$

Такая форма записи дифференциального уравнения имеет следующие замечательные свойства:

- 1) индекс p можно выносить за скобки;
- 2) индекс p является как бы алгебраическим

ч л е н о м уравнения, само уравнение превращается как бы в п с е в д о а л г е б р а и ч е с к о е, т. е. с оператором p можно производить те же действия, что и с другими членами уравнения;

3) умножение всех членов уравнения на p эквивалентно почленному дифференцированию;

4) деление на p эквивалентно интегрированию дифференциального уравнения и понижению его порядка.

Введем понятие «п е р е д а т о ч н а я ф у н к ц и я» $W(p)$. Это понятие эквивалентно коэффициенту динамического усиления звена (в переходном процессе, когда входная и выходная координаты переменны во времени). В каждый момент времени $W(p)$ определяется так же, как коэффициент статической передачи $k = \frac{y}{x}$. Таким образом, в ди-

намике, когда происходит переходной процесс, $k = \text{var} = W(p)$ и $W(p)$ является функцией времени. Но когда переходный процесс завершается, то $W(p) = \text{const} = k$. Таким образом, $\lim W(p) = k$ при $t \rightarrow \infty$.

Передаточная функция выделяется из дифференциального уравнения, записанного в операторной форме. Например, уравнение $T \frac{dy}{dt} + y = kx$. Операторная форма записи

$Try + y = kx$. Передаточная функция – это $W(p) = \frac{y}{x}$ (y и x – временные зависимости в переходном процессе). Тогда из уравнения в операторной форме получим

$$(Tp + 1)y = kx \quad \text{и} \quad W(p) = \frac{y}{x} = \frac{k}{Tp + 1}.$$

В передаточной функции как бы скрыт переходный процесс, происходящий при переменном значении коэффициента статической передачи в каждый момент времени, т. е. $W(p) = f(t)$. Зная вид передаточной функции, можно перейти к переходному процессу, описываемому дифференци-

альным уравнением. Если принять знаменатель передаточной функции равным нулю, то получим так называемое характеристическое уравнение относительно p , из которого и определим его значение $p = -\frac{1}{T}$. Общее решение уравнения (общий интеграл) имеет вид $y = Ce^{pt}$.

§ 5. 1. Идеальное звено (звено нулевого порядка)

Предполагается, что масса звена нулевая, а жесткость абсолютная. Примером такого звена является рычаг (усилительное звено) или нагруженная силой F (выходная координата y) пружина в результате перемещения ее свободного конца (рис. 38, а). Движение звена подчиняется второму закону Ньютона, но в силу поставленных условий для идеального звена уравнение статики и динамики будут одинаковы:

$$y = k \cdot x,$$

где $k = \frac{OB}{OA}$ и $W(p) = k$.

Временная характеристика звена (переходный процесс) показана на рис. 38, б. Из-за отсутствия инерционности звена и абсолютной его жесткости входная координата преобразуется в выходную для любого значения времени.

При подаче на вход идеального (безынерционного) звена периодических синусоидальных воздействий с амплитудой A на выходе звена устанавливаются колебания с амплитудой a , для которых независимо от частоты ω отношение амплитуд равно коэффициенту статической передачи (усиления) (рис. 38, в). По фазе эти колебания совпадают с колебаниями входной координаты, поэтому сдвиг по фазе $\gamma(\omega) = 0$.

Зависимость $\frac{a}{A} = f_1(\omega)$ для звена, определенную при изменении частоты колебаний от нуля до бесконечности ($0 < \omega < \infty$), называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

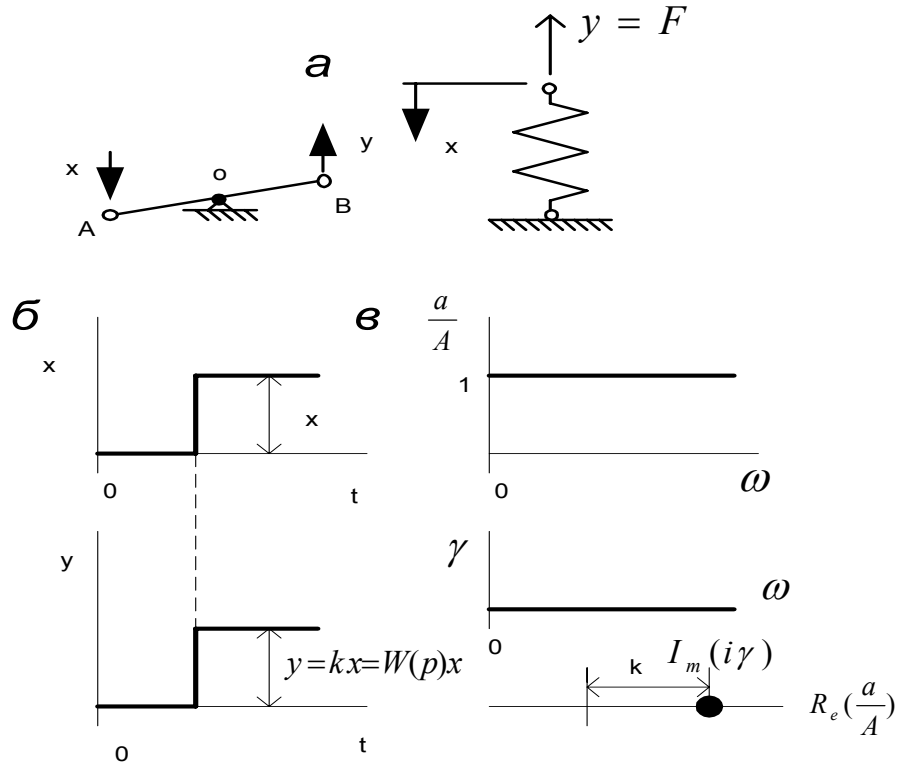


Рис. 38. Идеальное звено и его динамические характеристики

Для идеального звена $\frac{a}{A} = 1$. Зависимость сдвига фаз $\gamma = f_2(\omega)$ для звена, определенную в диапазоне $0 < \omega < \infty$, называют фазовой частотной характеристикой (ФЧХ).

Часто применяют понятие амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ), которая одновременно отражает изменение амплитуды и фазовый сдвиг между входной и выходной координатами звена.

Для построения АФЧХ законы синусоидальных колебаний x и y выражают в векторной форме с помощью комплексно-сопряженных чисел. Синусоидальные колебания представляют в виде изменения проекции вектора на мнимую ось при его вращении против часовой стрелки вокруг начала координат с угловой скоростью ω , т.е.

$$x = A \cdot \exp(i\omega \cdot t),$$

$$y = a \cdot \exp[i(\omega \cdot t + \gamma)] = a \cdot \exp(i\omega \cdot t) \cdot \exp(i\gamma).$$

Отсюда получим $\frac{y}{x} = W(i\omega) = \frac{a}{A} \exp(i\gamma)$.

Таким образом, АФЧХ – это изменение вектора передаточной функции $W(i\omega)$ при изменении ω в диапазоне $0 < \omega < \infty$ по величине и направлению, конец вектора описывает при этом кривую (годограф).

Вектор $W(i\omega)$ в общем случае может быть записан как

$$W(i\omega) = \underbrace{\frac{a}{A}(\omega)}_{\text{АЧХ}} \cdot \underbrace{\exp[i\gamma(\omega)]}_{\text{ФЧХ}}.$$

Угол γ откладывается против часовой стрелки, если $\gamma > 0$ (запаздывание), или по часовой стрелке, если $\gamma < 0$ (опережение). В системах автоматического регулирования, как правило, имеет место запаздывание. Величина вектора $W(i\omega)$ совпадает с передаточной функцией звена $W(p)$, если $p = i\omega$. Например, если для звена $W(p) = \frac{k}{Tp + 1}$, то

АФЧХ можно представить как

$$W(i\omega) = \frac{a}{A}(\omega) \cdot \exp[i\gamma(\omega)] = \frac{k}{T(i\omega) + 1}.$$

Для любого идеального (см. рис. 38, в) звена АФЧХ вырождается в точку по оси R_{em} (здесь откладываются значения $\frac{a}{A}(\omega)$), для любого значения ω $\frac{a}{A} = k$.

§ 5. 2. Аperiodическое звено (однородное, первого порядка)

В качестве обобщенного примера рассмотрим звено в виде некоего объема жидкости, ограниченного со всех сторон стенкой, в центре помещен точечный источник энергии Δq с температурой t_{ex}^0 . Требуется найти зависимость из-

менения температуры жидкости у стенки $t_{вых}^0$. Таким образом, это аналог системы охлаждения двигателя. Источник энергии – рабочий процесс в цилиндре со средней интегральной температурой в объеме сгорающей топливовоздушной смеси (рис. 39).

Подведенное тепло идет на аккумулялирование энергии Δq_{ak} в объеме жидкости, связанной с повышением температуры, и часть энергии рассеивается (диссипирует) в окружающей объем среде Δq_{∂} . Уравнение баланса энергии $\Delta q = \Delta q_{ak} + \Delta q_{\partial}$. Если рассматривать процесс в интервале времени Δt , стремящемся к нулю, то уравнение запишется как

$$dq = dq_{ak} + dq_{\partial}.$$

С целью упрощения задачи будем считать, что вследствие теплоизоляции стенок диссипация энергии отсутствует и $dq_{\partial} = 0$. Используя простейшие зависимости тепловой физики, определим dq и dq_{ak} как

$$dq = \alpha \cdot F (t_{ex}^0 - t_{вых}^0) dt \quad \text{и} \quad dq_{ak} = c \cdot G \cdot dt_{вых}^0,$$

где α - коэффициент теплопередачи от источника энергии в жидкость;

F -среднеинтегральная площадь теплопередачи;

c -теплоемкость жидкости;

G -масса жидкости в объеме.

Раскроем уравнение баланса энергии

$$\alpha \cdot F (t_{ex}^0 - t_{вых}^0) dt = c \cdot G \cdot dt_{вых}^0$$

или

$$\frac{c \cdot G}{\alpha F} \cdot \frac{dt_{вых}^0}{dt} + t_{вых}^0 = t_{ex}^0.$$

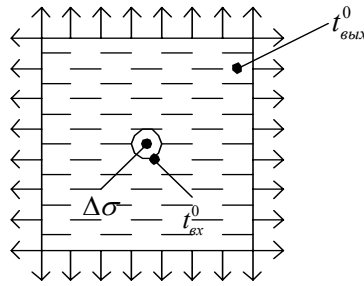


Рис. 39. Схематичное представление одноемкостного апериодического звена 1-го порядка

Удобнее производить запись уравнения через приращения переменных, что соответствует переносу начала координат в точку, с которой начинается процесс изменения температуры

$$\frac{c \cdot G}{\alpha F} \cdot \frac{d\Delta t_{\text{вых}}^0}{dt} + \Delta t_{\text{вых}}^0.$$

После введения относительных координат $x = \frac{\Delta t_{\text{вх}}^0}{t_{\text{вх.ном}}^0}$

и $y = \frac{\Delta t_{\text{вых}}^0}{t_{\text{вых.ном}}^0}$ получим так называемые уравнения движения (динамики) звена

$$\frac{c \cdot G \cdot t_{\text{вых.ном}}^0}{\alpha F} \cdot \frac{dy}{dt} + t_{\text{вых.ном}}^0 \cdot y = t_{\text{вх.ном}}^0 \cdot x$$

или
$$T \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (11)$$

где $T = \frac{cG}{\alpha F}$ - коэффициент, так называемое время звена;
 k - коэффициент статической передачи (усиления) звена.

Часто уравнение движения представляют в ином виде:

$$\frac{T}{k} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{1}{k} \cdot y = x \quad \text{или} \quad T_a \cdot \frac{dy}{dt} + \delta_a y = x, \quad (12)$$

где T_a - время разгона объекта;

δ_a – коэффициент самовыравнивания или коэффициент неравномерности звена.

Таким образом, апериодическое звено (однородное) описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому к определению звена вводится дополнение – «апериодическое звено 1-го порядка».

В операторной форме записи

$$T_a p y + \delta_a y = x \quad (13)$$

или

$$y(T_a p + \delta_a) = x,$$

где выражение в скобках называется собственным оператором звена.

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{y}{x} = \frac{1}{T_a p + \delta_a} = \frac{k}{Tp + 1}. \quad (14)$$

Характеристическое уравнение получим, приравняв знаменатель $W(p)$ нулю

$$T_a p + \delta_a = 0 \quad \text{или} \quad Tp + 1 = 0.$$

Рассмотрим переходной процесс однородного звена при скачкообразном возмущении входной координаты ($x = 1$) согласно уравнения движения (12).

Чтобы получить однородное дифференциальное уравнение с нулевой правой частью, введем вместо x в нашем случае величину

$$\delta_a x_1,$$

где $x_1 = \frac{x}{\delta_a}.$

Получим искомое уравнение $T_a \frac{dy}{dt} + \delta_a y = x_1 \delta_a$

или $T_a \frac{dy}{dt} + \delta_a (y - x_1) = 0.$

Введем новую переменную $\Psi = y - x_1 = y - \frac{x}{\delta_a}.$

Так как $\frac{dy}{dt} = \frac{d\Psi}{dt}$, получим линейное дифференциальное уравнение с нулевой правой частью

$$T_a \frac{d\Psi}{dt} + \delta_a \Psi = 0. \quad (15)$$

Общий интеграл (решение) этого уравнения

$$\Psi = ce^{pt},$$

где c - коэффициент (постоянная);

p - показатель степени.

Первая производная $\frac{d\Psi}{dt} = ce^{pt} \cdot p$. Подставив в уравнение (15) Ψ и $\frac{d\Psi}{dt}$, получим

$$T_a ce^{pt} \cdot p + \delta_a ce^{pt} = 0$$

или

$$T_a p + \delta_a = 0. \quad (16)$$

Из уравнения (16), которое называется х а р а к т е р и с т и ч е с к и м, определим значение $p = -\frac{\delta_a}{T_a}$.

Х а р а к т е р и с т и ч е с к о е уравнение можно получить более простым способом, для этого необходимо уравнение (15) записать в операторной форме:

$$T_a p \Psi + \delta_a \Psi = 0 \quad \text{или} \quad \Psi(T_a p + \delta_a) = 0. \quad (17)$$

Так как Ψ не равно нулю, то выражение, стоящее перед переменной, равно нулю ($T_a p + \delta_a = 0$).

Это выражение $T_a p + \delta_a$, аналогичное выражению (16), называется собственным оператором звена и обозначается как $d(p)$. Собственный оператор обладает всеми свойствами простого оператора (см. начало гл. 5).

Таким образом, чтобы определить p в формуле общего интеграла уравнения необходимо дифференциальное уравнение представить в операторной форме записи, выделить собственный оператор и, приравняв его к нулю, из полученного характеристического уравнения найти значение p .

Постоянная c определяется путем подстановки начальных условий (н.у.) в выражение общего интеграла (решения) уравнения (15).

Начальные условия для данной задачи: при $t = 0$ $y = 0$
и $\frac{dy}{dt} = 0$ (рис. 40).

Таким образом, $\Psi = ce^{-\frac{\delta_a}{T_a}t}$, $y - \frac{x}{\delta_a} = ce^{-\frac{\delta_a}{T_a}t}$ и $c = -\frac{x}{\delta_a}$.

Решение уравнения (12) $y - \frac{x}{\delta} = -\frac{x}{\delta} e^{-\frac{\delta_a}{T_a}t}$

или $y = \frac{x}{\delta}(1 - e^{-\frac{\delta_a}{T_a}t})$. (18)

Переходный процесс звена рассчитывается по выражению (18) и представлен на рис. 40.

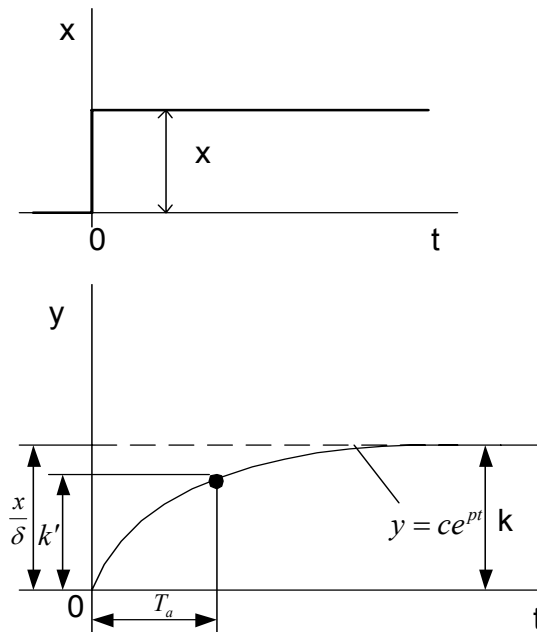


Рис. 40. Переходный процесс аperiodического
однoемкoстного звeна при скачкообразном
возмущении на входе, $x = 1$

Экспонента асимптотически приближается к значению $y = \frac{x}{\delta}$ при $t \rightarrow \infty$. При $t = T_a$ из выражения (18) имеем

$$y = \frac{x}{\delta_a}(1 - e^{-\delta_a}) = k' = \text{const.} \quad (19)$$

Этим переходным процессом возможно воспользоваться в эксплуатации с целью определения коэффициентов уравнения движения (12) T_a и δ_a при помощи так называемого имитатора переходного процесса для подобного звена, например, дизеля, системы охлаждения, компрессора, котла и т.п. Имитатор представляет собой устройство, позволяющее скачкообразно изменить входную координату звена на величину x . С помощью осциллографа записывается переходной процесс $y = f(t)$.

Определяют коэффициент усиления звена k как отношение $k = \frac{y}{x}$ после завершения переходного процесса. Как

следует из рис. 40,
$$k = \frac{y}{x} = \frac{x}{\delta_a} \cdot \frac{1}{x} = \frac{1}{\delta_a}.$$

Таким образом, $\delta_a = \frac{1}{k}$, где k определено из осциллограммы. T_a определяют следующим образом. Откладывают на оси ординат отрезок $k' = \frac{x}{\delta_a}(1 - e^{-\delta})$. На оси абсцисс определяется T_a (показано стрелкой на рис. 40).

Амплитудная фазовая частотная характеристика (АФЧХ) апериодического (однородного) звена $W(i\omega)$ может быть определена по его передаточной функции при подстановке в нее величины $p = i\omega$ при $0 < \omega < \infty$.

$$W(i\omega) = \frac{a}{A} \exp(i\omega) = \frac{1}{T_a(i\omega) + \delta_a} = \frac{1}{T(i\omega) + 1} = \text{Re} + i\text{Im}.$$

Раскрытие $W(p)$ возможно путем умножения и деления ее на выражение. $\frac{T(i\omega) - 1}{T(i\omega) - 1}$.

При этом выделяются вещественная и мнимая части выражения:

$\text{Re} = \frac{k}{T^2\omega^2 + 1}$ - вещественная часть, $\text{Im} = -\frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}$ - мнимая часть.

В системе координат $\text{Re}-\text{Im}$ при изменении $0 < \omega < \infty$ возможно построить амплитудную фазовую частотную характеристику (рис. 41, в).

Модуль вектора $A(\omega)$ определится как

$$A(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}}.$$

Сдвиг фаз определится как $\text{tg}\gamma(\omega) = \frac{\text{Im}}{\text{Re}}$.

После преобразований получим ФЧХ (см. рис. 41, б)

$$\gamma(\omega) = -\text{arctg}\left(\frac{\omega T}{k}\right).$$

Определив вещественную и мнимую составляющие (Re и Im), получим

$$W(i\omega) = A(\omega) \cdot \exp[-i\gamma(\omega)] = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} \cdot \exp[-i \cdot \text{arctg}(\omega T)],$$

$\uparrow \quad \uparrow$
 АФЧХ

$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow$
 АЧХ

$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow$
 ФЧХ

где $A(\omega)$ и $\gamma(\omega)$ - соответственно зависимости $\frac{a}{A}$ и γ от частоты колебаний. На рис. 41 соответственно приведены АЧХ, ФЧХ и АФЧХ.

АЧХ и ФЧХ строятся по данным эксперимента как $\frac{a}{A} = f_1(\omega)$ и $\gamma = f_2(\omega)$ соответственно. При построении

АФЧХ модуль вектора определяют как $\frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}}$, а угол γ

для каждого значения частоты ω определяют из осциллограммы переходного процесса. АФЧХ позволяет определить частотные характеристики звена, при которых может выявиться зона резонансного усиления внесенных в движение звена возмущений, например, при ω_2 .

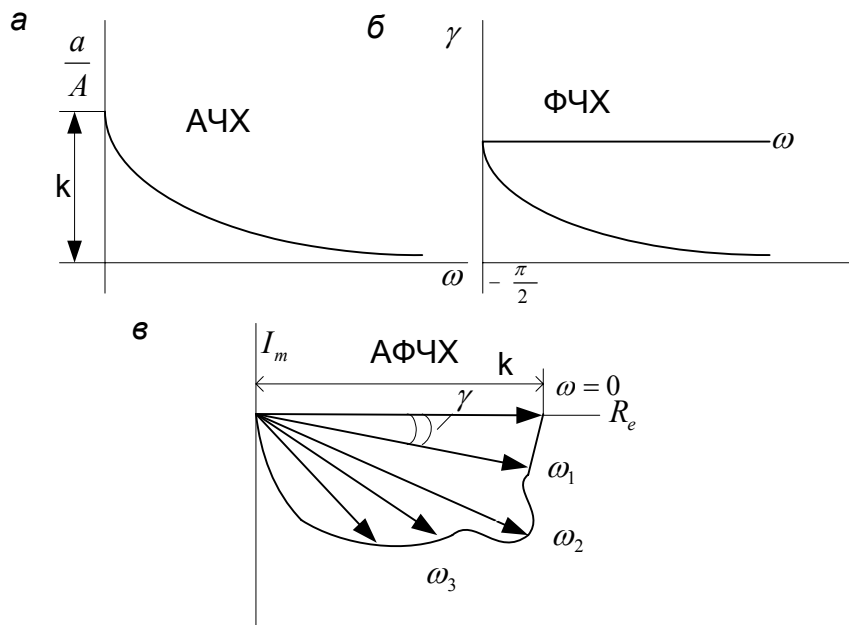


Рис. 41. Частотные характеристики одноемкостного апериодического звена

Как правило, в качестве одноемкостного типового звена представляют основные объекты судовой автоматики, например, двигатель, котел, компрессор и т.д.

В зависимости от значения фактора устойчивости объекта, т.е. в зависимости от взаимного расположения характеристик подвода и отвода энергии, одноемкостные объекты разделяются на статические ($F > 0$), астатические ($F = 0$) и неустойчивые объекты ($F < 0$).

§ 5.3. Апериодическое звено (двухъемкостное, 2-го порядка)

Примерами такого типового звена могут быть регуляторы прямого действия частоты и температуры, двухконтурная система охлаждения, двухъемкостный тепловой аккумулятор (рис. 42). Источник энергии находится в 1-ой полости, а процесс аккумуляции тепла исследуется во второй. Таким образом, система состоит из двухъемкостных звеньев, соединенных последовательно.

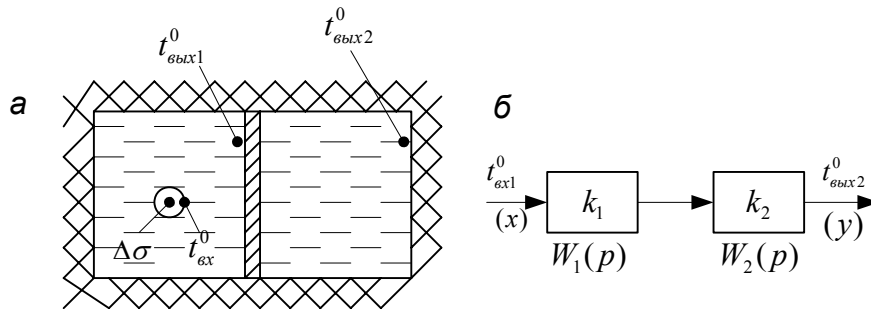


Рис. 42. Схема аperiodического двухъёмкостного звена второго порядка:

а - функциональная схема; б - структурная схема

Составим систему дифференциальных уравнений, определяющую тепловые процессы двухъёмкостного звена, на базе уравнения (11):

$$T_1 \frac{dt_{вых1}^0}{dt} + t_{вых1}^0 = t_{ex}^0 \quad - \text{ для 1-й полости;}$$

$$T_2 \frac{dt_{вых2}^0}{dt} + t_{вых2}^0 = t_{вых1}^0 \quad - \text{ для 2-й полости.}$$

После ввода относительных координат и преобразований системы уравнений получим дифференциальное уравнение 2-го порядка для двухъёмкостного звена

$$T_p^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_k \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (20)$$

где $T_p^2 = T_1 \cdot T_2$, $T_k = T_1 + T_2$ и $k = k_1 \cdot k_2$.

Разделив все члены уравнения (20) на k и введя замены, получим распространенную в автоматике другую форму этого уравнения

$$T_{pa}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_{ka} \frac{dy}{dt} + \delta_p y = x, \quad (21)$$

где $T_{pa} = \sqrt{\frac{T_p}{k}}$ - время регулятора;

$T_{ka} = \frac{T_k}{k}$ - время катаракта;

$\delta = \frac{1}{k}$ - степень неравномерности статической характеристики звена.

К аналогичному результату придем, если функцию двухъёмкостного звена (см. рис. 42, б) представим как произведение передаточных функций последовательно соединенных полостей

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{k_2}{T_2 p + 1} = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1}.$$

Далее, из выражения $W(p) = \frac{y}{x}$ получим дифференциальное уравнение движения двухъёмкостного апериодического звена (20). Этот путь, как видим, намного проще и удобнее, чем преобразование системы уравнений в конечное выражение (20).

Передаточная функция данного звена может быть представлена из уравнения (21) как

$$W(p) = \frac{1}{T_{pa}^2 p^2 + T_{ka} p + \delta_p}. \quad (22)$$

Решение дифференциального уравнения движения (20) двухъёмкостного звена 2-го порядка (согласно степени уравнения) производится, например, методом подстановки общего интеграла уравнения $y = c_1 e^{p_1 t} + c_2 e^{p_2 t}$ (аналогично решению уравнения (15)), где $p_{1,2}$ - корни характеристического уравнения двухъёмкостного звена

$$T_p^2 p^2 + T_k p + 1 = 0, \quad (23)$$

и

$$p_{1,2} = -\frac{T_k}{2T_p^2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_k}{2T_p^2}\right)^2 - \frac{1}{T_p^2}}.$$

Условием протекания апериодического переходного процесса является выражение $\left(\frac{T_k}{2T_p^2}\right)^2 \geq \frac{1}{T_p^2}$.

Тогда корни характеристического уравнения (23) будут вещественны и отрицательны, а общий интеграл уравнения

(20) определяют аperiodический характер переходного процесса (рис. 43), например, при «толчкообразном» возмущении на входе в звено x . Значения c_1 и c_2 определяются при начальных условиях:

при $t = 0, x = 0, y = c_1 + c_2, \frac{dy}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} = 0$. Значения p_1 и p_2

определяются путем решения характеристического уравнения.

При «скачкообразном» возмущении $x=1$ решение имеет вид

$$y = \frac{1}{\delta_p} (1 + c_1 e^{-p_1 t} + c_2 e^{-p_2 t}), \quad (24)$$

где $c_1 = \frac{T'}{T' - T''}$; $c_2 = \frac{T''}{T' - T''}$; $p_1 = \frac{1}{T'}$; $p_2 = \frac{1}{T''}$.

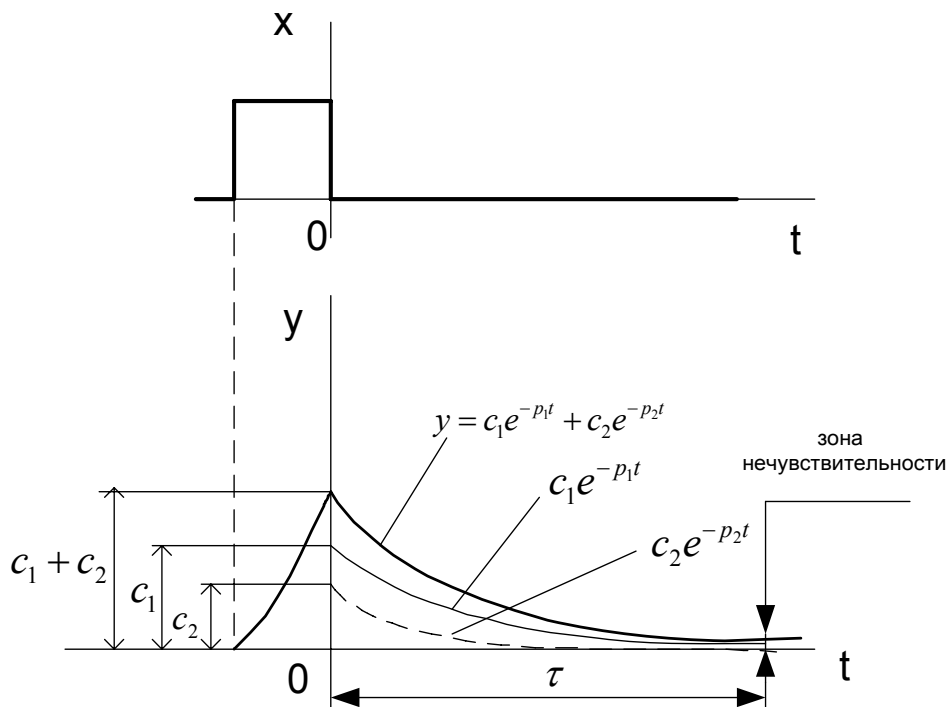


Рис. 43. Переходной процесс двухъёмкостного звена (аperiodического) при «толчкообразном» возмущении

Коэффициенты решения определяются как

$$T' = \frac{2T_{pa}^2}{T_k - \sqrt{T_k^2 - 4T_{pa}^2}}; \quad T'' = \frac{2T_{pa}^2}{T_k + \sqrt{T_k^2 - 4T_{pa}^2}}. \quad (25)$$

Переходный процесс представлен на рис. 44.

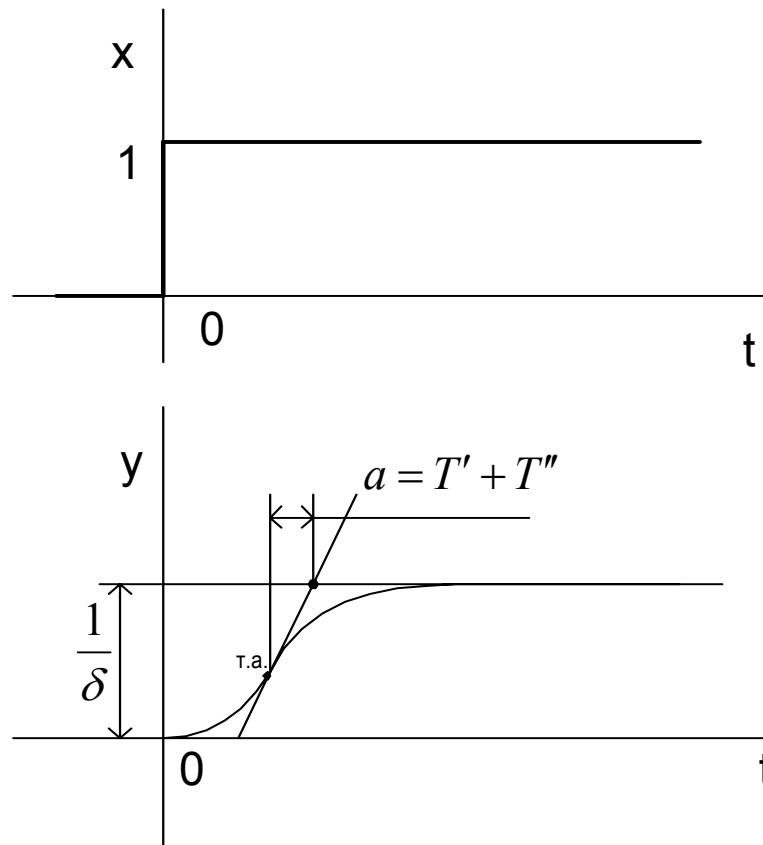


Рис. 44. Переходный процесс двухъёмкостного апериодического звена при «скачкообразном» возмущении

Переходной процесс имеет характерную точку перегиба (т. А), касательная к кривой в этой точке позволяет определить $T' + T''$.

Для подобного звена проводится эксперимент путем внесения ступенчатого возмущения на входе. При этом осциллографируется изменение выходного параметра во времени, то есть переходный процесс двухъёмкостного апериодического звена при «скачкообразном» возмущении. Изменение

входной координаты производят с помощью специального устройства, так называемого имитатора.

Таким образом, если экспериментально получена кривая переходного процесса звена, то, решив систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} c_1 + c_2 &= -\frac{1}{\delta_p} \quad (\text{из уравнения (24) при } t = 0); \\ c_1 + c_2 &= \frac{T' + T''}{T' - T''}, \end{aligned}$$

получаем $T' - T'' = -a\delta_p$. Из системы уравнений

$$T' - T'' = -a\delta_p,$$

$$T' + T'' = a$$

получим числовые значения

$$T' = \frac{a - \delta_p a}{2} \quad \text{и} \quad T'' = \frac{a + \delta_p a}{2}.$$

Далее, подставив значения T' и T'' в выражения (25), получим значения T_{pa} и T_k . Коэффициент усиления звена k определится как отношение значения выходной координаты к значению входной $k = \frac{y}{x}$ после завершения переходного процесса и, следовательно,

$$\delta_p = \frac{1}{k}.$$

АФЧХ звена есть геометрическое место точек конца вектора передаточной функции при $p = i\omega$

$$W(i\omega) = \frac{1}{T_{pa}^2(i\omega)^2 + T_{ka}(i\omega) + \delta_p} = \frac{1}{(\delta_p - \omega^2 T_{pa}^2) + i\omega T_{ka}}. \quad (26)$$

Передаточная функция может быть представлена в виде комплексного числа $W(i\omega) = u + iv = \text{Re} + i\text{Im}$,

где $u(\text{Re})$ - вещественная часть, $iv(\text{Im})$ - мнимая часть передаточной функции.

Умножив и разделив выражение (26) на разность

$$((\delta - \omega^2 T_{pa}^2) - i\omega T_{ka}),$$

получим формулу для Re и Im :

$$\text{Re} = \frac{\delta_p - \omega^2 T_{pa}^2}{T_{pa}^4 \omega^4 + (T_{ka}^2 - 2T_{pa}^2 \delta_p) \omega^2 + \delta_p^2};$$

$$\text{Im} = -\frac{\omega T_{ka}}{T_{pa}^4 \omega^4 + (T_{ka}^2 - 2T_{pa}^2 \delta_p) \omega^2 + \delta_p^2}.$$

По полученным значениям Re и Im можно построить АФЧХ, аналогичную изображенной на рис. 41, в.

АЧХ ($A(\omega)$ или $\frac{a}{A}(\omega)$) получается как вектор $W(i\omega)$ в системе координат $\text{Re}-\text{Im}$ при условии $0 < \omega < \infty$

$$A(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)} = \frac{1}{\sqrt{T_{pa}^4 \omega^4 + (T_{ka}^2 - 2T_{pa}^2 \delta_p) \omega^2 + \delta_p^2}}.$$

ФЧХ ($\gamma(\omega)$) определится как

$$\gamma(\omega) = -\arctg \frac{\omega T_{ka}}{\delta_p - \omega^2 T_{pa}^2},$$

где $0 < \omega < \infty$.

Предполагается, что статическая характеристика звена в рассматриваемом диапазоне линейна. Как правило, для наиболее распространенных в судовой практике двухъёмковых апериодических звеньев при «скачкообразном» возмущении на входе это предположение вполне оправдано.

§ 5. 4. Колебательное звено (двухъёмкостное, 2-го порядка)

Пример такого звена представлен на рис. 42, *а*. Но в отличие от апериодического звена, описанного в разделе 5.3, при соответствующих условиях характер переходного процесса является колебательным, т.е. при определенном соотношении коэффициентов уравнения движения звено из апериодического превращается в колебательное.

Вид уравнения движения при этом сохраняется:

$$T_p^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_k \frac{dy}{dt} + y = kx.$$

Условием колебательного переходного процесса является выражение

$$\left(\frac{T_k}{2T_p^2}\right)^2 < \frac{1}{T_p^2}.$$

Тогда корни характеристического уравнения становятся комплексно-сопряженными $p_{1,2} = \alpha \pm i\beta$,

где i - мнимая единица, $i = \sqrt{-1}$;

α - вещественная часть выражения, $\alpha = -\frac{T_k}{2T_p^2}$;

β - мнимая часть выражения, $\beta = \sqrt{\frac{1}{T_p^2} - \left(\frac{T_k}{2T_p^2}\right)^2}$.

Решение уравнения движения выполним путем подстановки

$$y = c_1 e^{p_1 t} + c_2 e^{p_2 t} = c_1 e^{(\alpha + i\beta)t} + c_2 e^{(\alpha - i\beta)t}$$

или

$$y = e^{\alpha t} (c_1 e^{i\beta t} + c_2 e^{-i\beta t}). \quad (27)$$

Введем соотношения Эйлера для комплексной области

$$e^{i\beta t} = \cos \beta t + i \sin \beta t \quad \text{и} \quad e^{-i\beta t} = \cos \beta t - i \sin \beta t.$$

Тогда, подставив соотношения Эйлера в уравнение (27), получим

$$y = e^{\alpha t} [(c_1 + c_2) \cos \beta t + i(c_1 - c_2) \sin \beta t]. \quad (28)$$

Обозначив $c_1 + c_2 = c \sin \gamma$ и $i(c_1 - c_2) = c \cos \gamma$, получим значения новых постоянных γ и c

$$c = 2\sqrt{c_1 c_2} \quad \text{и} \quad \gamma = \operatorname{arctg} \frac{c_1 + c_2}{i(c_1 - c_2)}.$$

Окончательно после простых преобразований уравнения (28) получим $y = ce^{\alpha t} \sin(\beta t + \gamma)$

или

$$y = ce^{-\frac{T_k}{2T_p^2}t} \sin \left[\left(\sqrt{\frac{1}{T_p^2} - \left(\frac{T_k}{2T_p^2}\right)^2} \right) t + \gamma \right]. \quad (29)$$

На рис. 45 представлен переходный процесс:

а) при «толчкообразном» возмущении, б) при «скачкообразном» возмущении. Здесь T - период колебаний, $T = \frac{2\pi}{\beta}$,

при этом частота колебаний процесса $f = \frac{\beta}{2\pi}$.

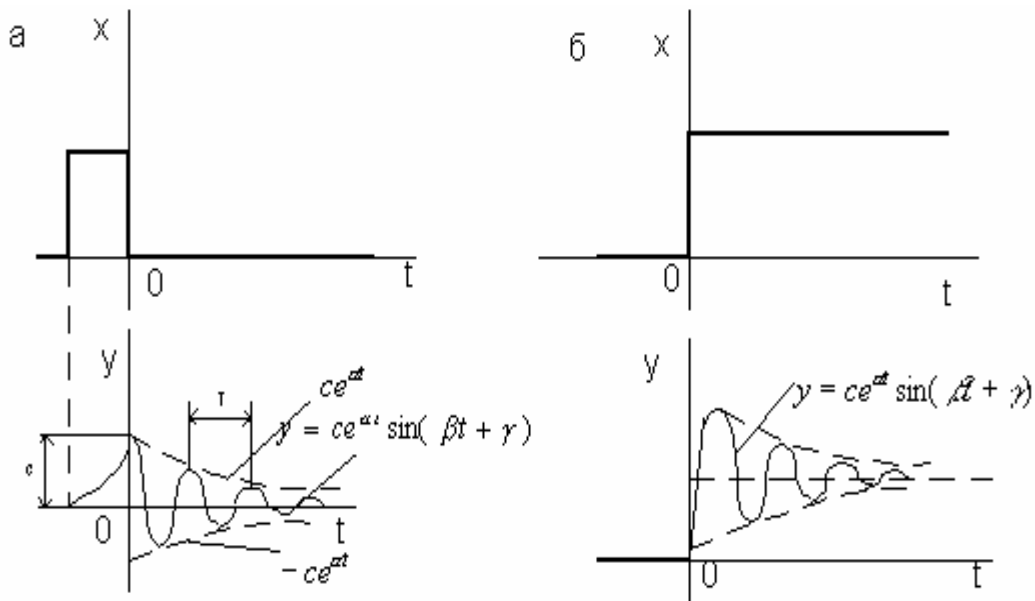


Рис. 45. Переходные процессы двухъёмкостного колебательного звена второго порядка

Передаточная функция, АЧХ, ФЧХ и АФЧХ аналогичны предыдущему случаю (см. раздел 5. 3).

§ 5. 5. Интегрирующее звено

Простейшее интегрирующее звено представлено на рис. 32. Зависимость между входной и выходной координатами определяется уравнением (9). Это же уравнение можно представить как

$$y = \frac{1}{T_c} \int_{t_1}^{t_2} x dt + y_0. \quad (30)$$

Переходный процесс интегрирующего звена и его характеристики приведены на рис. 46. Так, при «скачкообразном» возмущении, например, при $x = 1$

$$y = \frac{1}{T_c} t \Big|_{t_1}^{t_2} + y_0 = \frac{t_2 - t_1}{T_c} + y_0.$$

Отклонение выходной величины пропорционально интегралу отклонения входной координаты x , поэтому такие звенья называют интегрирующими.

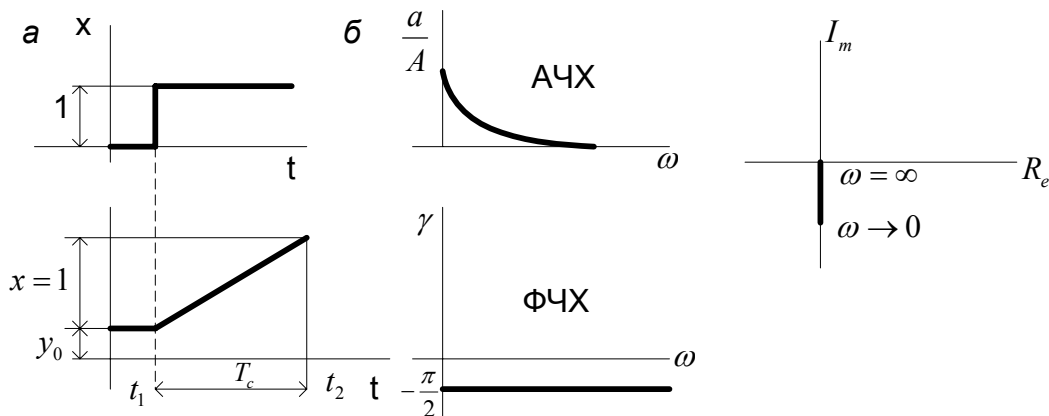


Рис. 46. Переходный процесс интегрирующего звена и его характеристики

Передаточную функцию интегрирующего звена получим из уравнения (9), записанного в операторной форме

$$x = T_c p y \quad \text{и} \quad W(p) = \frac{y}{x} = \frac{1}{T_c p}.$$

АФЧХ при подстановке в $W(p)$ $p(i\omega)$ определится при условии $0 < \omega < \infty$

$$W(i\omega) = \frac{1}{T_c(i\omega)} = \frac{a}{A}(\omega) \exp[i\gamma(\omega)]. \quad (31)$$

$\uparrow \quad \uparrow$
 АФЧХ

$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow$
 АЧХ ФЧХ

Выделив Re и Im, получим $W(i\omega) = \frac{1}{T_c \omega} \exp(-i\frac{\pi}{2})$.

§ 5. 6. Дифференцирующее звено

В идеальном дифференцирующем звене (см. рис. 47, а) зависимость между входной и выходной координатами определяется уравнением

$$y = k \frac{dx}{dt}. \quad (32)$$

В операторной форме уравнение движения $y = k p x$.

Передаточная функция $W(p) = \frac{y}{x} = k p$, откуда

$$W(i\omega) = k(i\omega) = k\omega \cdot \exp(i\frac{\pi}{2}). \quad (33)$$

$\uparrow \quad \uparrow$
 АФЧХ

$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow$
 АЧХ ФЧХ

Уравнение движения дифференцирующего звена показывает, что при «ступенчатом» возмущении (см. рис. 47, б) переходный процесс начинается мгновенным импульсом бесконечной (теоретически) амплитуды. Но так как длительность времени изменения входной координаты стремится к нулю, то сразу же за установлением $\frac{dx}{dt} = 0$ выходная координата также принимает нулевое значение $y = 0$.

Звено состоит из катаракта 1 и пружины 2 (см. рис. 47, *a*). В технике такое звено принято называть изодромом. Если через изодром (дифференцирующее звено) проходит обратная связь, то ее называют изодромной или гибкой обратной связью (ГОС).

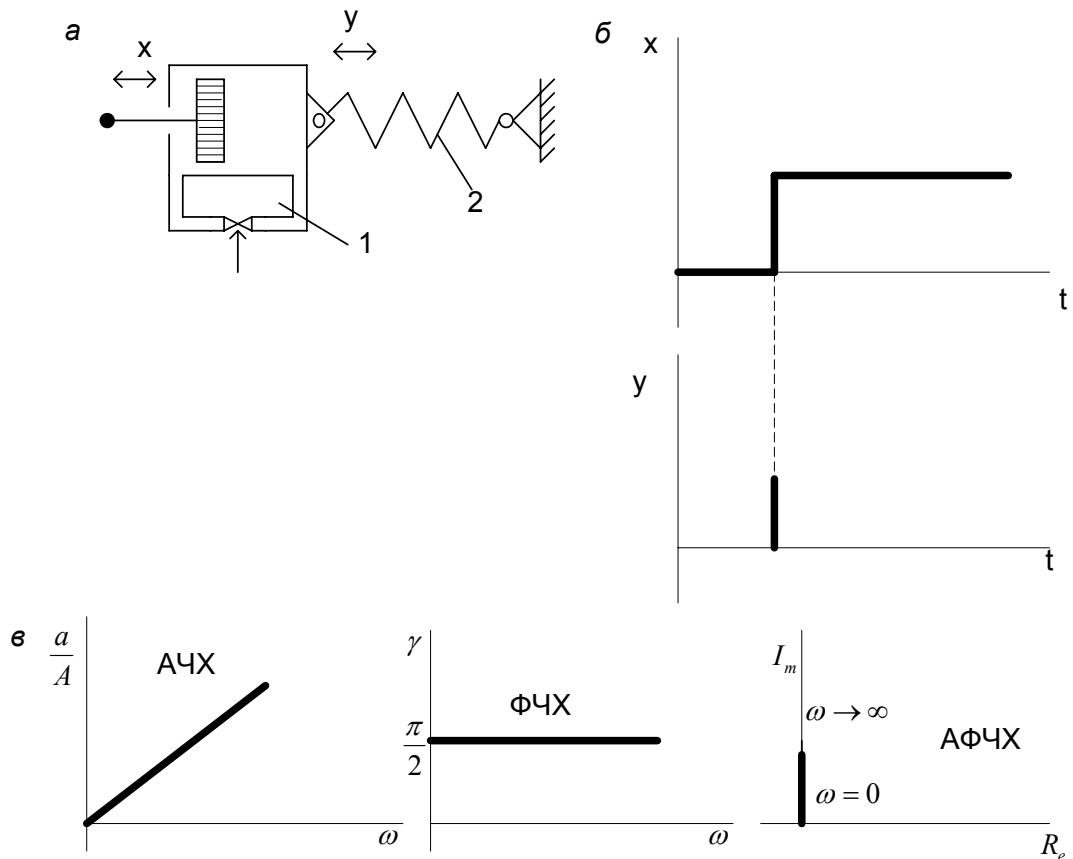


Рис. 47. Дифференцирующее звено, его переходный процесс и характеристики

§ 5. 7. Звено чистого запаздывания

Звеном чистого запаздывания называется звено, в котором изменения выходной координаты y полностью повторяют изменения входной координаты x , но смещены относительно ее во времени, т.е. происходят с некоторым запаздыванием τ (рис. 48, *a*).

Реально такое звено не существует. Путем искусственного введения в цепочку САР звеньев запаздывания удастся приблизить их математическое описание к реальным про-

цессам, например, двигателя, можно учесть тепловое и химическое запаздывание между процессом ввода топлива и сгоранием, дискретность топливоподачи, наличие люфтов и зазоров в передаче сигнала от регулятора к топливной аппаратуре и т.п. Зависимость между входной и выходной координатами записывается следующим уравнением: $y(t) = x(t - \tau)$, где τ - временное запаздывание.

Передаточная функция имеет вид

$$W(p) = e^{-p\tau}. \quad (34)$$

Амплитудная фазовая частотная характеристика имеет вид

$$W(i\omega) = \exp(-i\omega\tau).$$

Переходный процесс звена чистого запаздывания и его характеристики приведены на рис. 48.

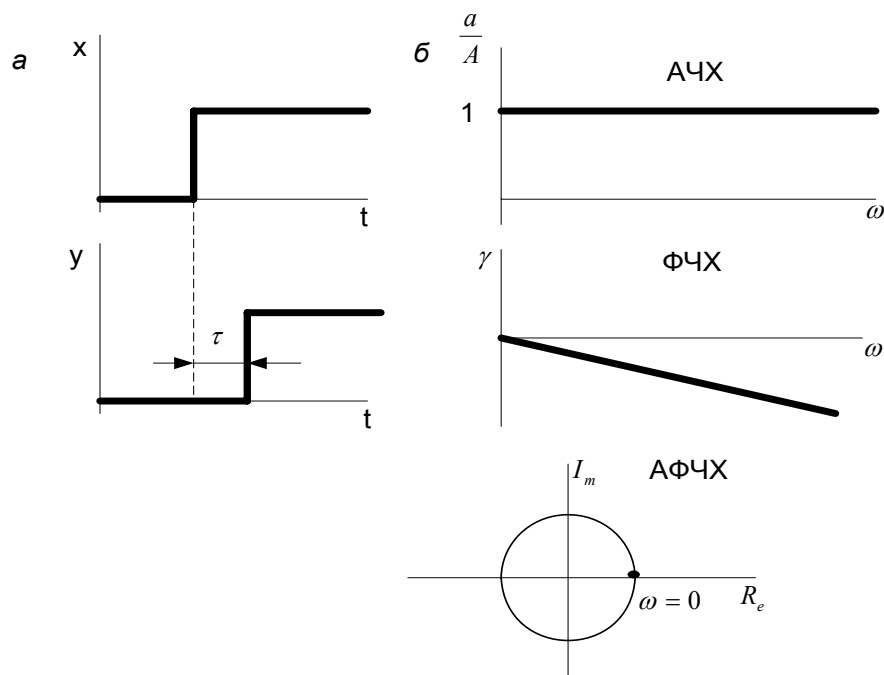


Рис. 48. Переходный процесс звена чистого запаздывания и его характеристики

§ 5. 8. Анализ соединений типовых звеньев (структурные схемы и уравнения САР)

В системах автоматического регулирования типовые динамические звенья могут соединяться в различных сочета-

ниях. Поэтому, зная передаточные функции всех звеньев, возможно составлять передаточную функцию САР или ее отдельных элементов и выходить на дифференциальное уравнение движения системы. Наиболее характерные объединения типовых звеньев можно заменить аналогом с соответствующей передаточной функцией, например, для случаев последовательного или параллельного соединения элементов, для звена, охваченного положительной или отрицательной обратной связью и т.п. При этом действия и получаемые выражения аналогичны анализу статики (см. раздел 2.4.). Так, например, последовательное соединение n -звеньев может быть заменено одним звеном с передаточной функцией

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \dots \cdot W_n(p).$$

Аналогично САР, состоящая из нескольких звеньев (см. рис. 18, б), заменяется одним звеном с передаточной функцией для замкнутой системы $W_3(p) = \frac{y}{\lambda}$

$$W_3(p) = \frac{W_{o\lambda}(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{ox}(p)}.$$

(35)

При переходе к частотным передаточным функциям и соответственно к АФЧХ, ФЧХ и АЧХ необходимо принять $p = i\omega$ при изменении частоты в пределах $0 < \omega < \infty$,

где
$$W_3(i\omega) = \frac{W_{o\lambda}(i\omega)}{1 + W_p(i\omega) \cdot W_{ox}(i\omega)}.$$

Таким образом, полученная передаточная функция САР после подстановки в выражение (35) значений передаточных функций составляющих САР типовых элементов с предварительно определенными расчетом или экспериментом коэффициентами позволяет вычислить выражение $W_3(p)$.

Далее, передаточная функция разворачивается в уравнение движения САР в операторной форме записи и затем

может быть представлена в виде дифференциального уравнения. Решение дифференциального уравнения позволяет построить диаграмму переходного процесса САР при внесении того или иного возмущения с целью последующего анализа качества работы САР.

Синтез уравнения движения САР возможен другим путем. Сначала САР представляют в виде набора типовых звеньев (так называемый анализ САР). При составлении дифференциального уравнения звеньев выявляют физический закон, определяющий их поведение, например, закон сохранения энергии, равновесия сил.

Рассмотрим пример для простейшей САР уровня (рис. 49, а). Для этого составим структурную схему (рис. 49, б). Регулятор состоит из поплавка и рычага, т.е. представляет собой типовое идеальное звено (звено нулевого порядка) с передаточной функцией

$$W_p(p) = k_1 = \frac{AO}{OB}.$$

Заслонку (регулирующий орган) и вентиль (нагрузка) объединяем с регулируемым объектом и описываем как типовое одноёмкостное звено с передаточной функцией

$$W_0(p) = \frac{k_2}{T_0 p + 1}.$$

Далее, составляем упрощенную структурную схему САРу (рис. 49, в) в виде звена, охваченного обратной отрицательной связью через регулятор уровня. И, наконец, определяем передаточную функцию САРу, используя выражение (35) для простейшего аналога САРу (рис. 49, г)

$$W_{cap}(p) = W_3(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_0(p)}.$$

Так как $W_{cap}(p) = -\frac{h}{\lambda}$ (здесь знак определяется координатой λ), получим

$$h[1 + W_p(p) \cdot W_0(p)] = -\lambda W_0(p)$$

или

$$h(1 + k_1 \frac{k_2}{T_0 p + 1}) = -\lambda \frac{k_2}{T_0 p + 1}.$$

После преобразования равенства получим

$$h(T_0 p + 1 + k_1 k_2) = -k_2 \lambda$$

или

$$T_0 p h + k h = -k_2 \lambda,$$

где $k = 1 + k_1 k_2$.

Разделив все члены уравнения на коэффициент k и раскрыв оператор Лапласа $p = \frac{d}{dt}$, получим известное уравнение автоматики (см. выражение (11))

$$T \frac{dh}{dt} + h = -\frac{k_2}{1 + k_1 k_2} \lambda, \quad (36)$$

где

$$T = \frac{T_0}{1 + k_1 k_2}.$$

Свойства и динамические характеристики этой САРу в полном объеме определяются графиками и выражениями согласно разделу 5.2.

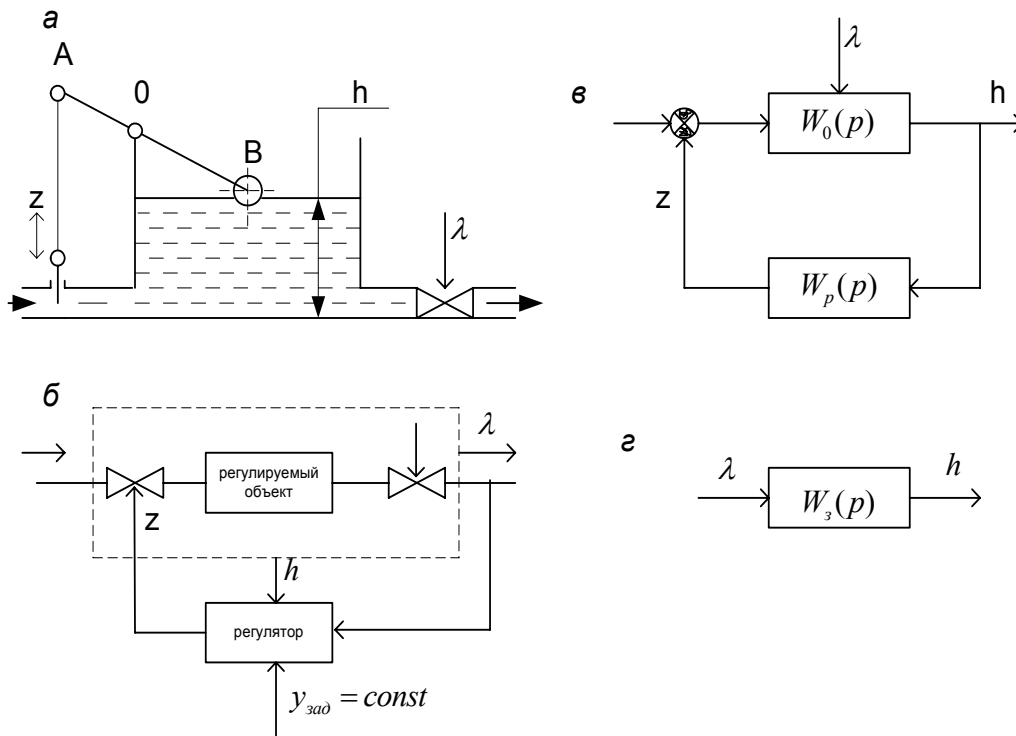


Рис. 49. Функциональная и структурные схемы САРу
Уравнение статики САРу получается из выражения (36) при равенстве первого члена уравнения нулю и имеет вид

$$h = -\frac{k_2}{1 + k_1 k_2} \lambda.$$

По этому уравнению возможно построение статической характеристики системы автоматического регулирования уровня (она же является регуляторной характеристикой). Решив уравнение (36), можно построить диаграмму переходного процесса САРу как $h = f(t)$.

По передаточной функции САРу при подстановке в нее $p = i\omega$ при изменении частоты в пределах $0 < \omega < \infty$ возможно построить АФЧХ, АЧХ, ФЧХ и оценить качество функционирования системы автоматического регулирования уровня.

Данный подход в судовой автоматике является основным при исследовании и анализе сложных структур систем автоматического регулирования техническими средствами судна.

При использовании относительно несложных экспериментов определяются основные параметры, характеризующие уравнения движения элементов.

Далее проводится исследование передаточных функций и переходных процессов в системах автоматического регулирования с целью улучшения статических и динамических характеристик и показателей качества системы.

Глава 6. Устойчивость систем автоматического регулирования и качество переходных процессов

§ 6. 1. Общие представления об устойчивости САР

Основная задача регулирования состоит в установлении и поддержании заданного режима работы объекта во времени. При этом качество процесса регулирования определяется рядом показателей, отраженных в государственных стандартах и требованиях нормативной документации, например, длительность переходного процесса, заброс регулируемого параметра, степень нечувствительности, степень неравномерности и т.п.

Если какое-либо возмущение нарушило равновесие в системе и далее исчезло, то при устойчивом регулировании после достаточно малого возмущения регулятор восстановит режим, который поддерживался до действия возмущения.

Для линейной САР устойчивость процесса регулирования по отношению к малым возмущениям означает его устойчивость также и по отношению к любому другому возмущению, не обязательно малому. Но сама линейная модель САР позволяет судить о поведении реальной системы лишь по отношению к малым возмущениям [8, 9, 10].

Рассмотрим дифференциальное уравнение движения САР (регулируемый параметр φ) в операторной форме записи при возмущающем воздействии от изменения нагрузки λ

$$(a_0 \cdot p^n + \dots + a_{n-1} \cdot p + a_n) \cdot \varphi = (b_0 \cdot p^m + \dots + b_{m-1} \cdot p + b_m) \cdot \lambda. \quad (37)$$

Характер переходных процессов определяется видом левой части уравнения (37).

Уравнение (37) является неоднородным дифференциальным уравнением. Его решение относительно φ находится как сумма двух решений: частного решения с правой ча-

стью и общего решения уравнения без правой части. Таким образом, решение уравнения (37)

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{част}}(t) + \varphi_{\text{общ}}(t). \quad (38)$$

Первое слагаемое определяет вынужденную составляющую $\varphi_{\text{в}}(t)$, второе слагаемое – переходную составляющую $\varphi_n(t)$. Формула (38) может быть представлена следующим образом

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{уст}}(t) + \varphi_n(t).$$

Характерный переходный процесс показан на рис. 50.

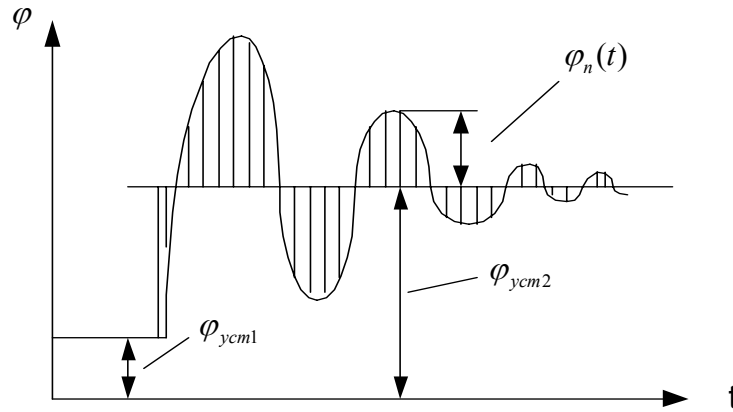


Рис. 50. Характерный переходный процесс САР

САР является устойчивой, если при $t \rightarrow \infty$ переходная составляющая стремится к нулю ($\varphi_n(t) \rightarrow 0$). Найдем эту составляющую из уравнения (37). Для этого решим уравнение без правой части

$$a_0 \cdot \frac{d^n \varphi}{dt^n} + \dots + a_{n-1} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + a_n \cdot \varphi = 0. \quad (39)$$

Определим корни характеристического уравнения

$$a_0 \cdot p^n + \dots + a_{n-1} \cdot p + a_n = 0. \quad (40)$$

Так как уравнение (40) содержит n корней, то переходную составляющую можем записать в виде

$$\varphi_n(t) = c_1 \cdot \exp(p_1 \cdot t) + c_2 \cdot \exp(p_2 \cdot t) + \dots + c_n \cdot \exp(p_n \cdot t),$$

где $p_1, p_2, \dots, p_n$ - корни характеристического уравнения;

$c_1, c_2, \dots, c_n$ - постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий.

Корни характеристического уравнения определяются только левой частью уравнения (37), постоянные интегрирования - также и правой частью уравнения. Поэтому быстрота затухания и форма переходного процесса определяются как правой, так и левой частями исходного дифференциального уравнения.

Однако поскольку понятие устойчивости САР учитывает наличие или отсутствие затухания переходного процесса, то устойчивость линейной системы не зависит от вида правой части уравнения (37) и определяется только уравнением (40).

Чтобы определить, устойчива ли система, нет необходимости решать уравнение (40) и определять его корни. Выясним, какие свойства корней необходимы и достаточны для того, чтобы САР была устойчивой.

Сами корни могут быть вещественными, комплексными и чисто мнимыми.

Вещественный корень. Пусть один из корней, например, p_1 является вещественным. Если он отрицательный ($p_1 = -\alpha_1$), то слагаемое, определяемое этим корнем в решении уравнения (40), будет представлять собой экспоненту $c_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot t)$. При $t \rightarrow \infty$ этот член будет стремиться к нулю (затухающий процесс). При $p_1 = +\alpha_1$ получится не затухающий, а расходящийся процесс (см. рис. 51, а).

Комплексные корни являются попарно сопряженными. При отрицательной вещественной части корня два корня p_1 и p_2 будут иметь вид $p_{1,2} = -\alpha \pm i \cdot \beta$. В этом случае слагаемые в решении, определяемые корнями, могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} c_1 \cdot \exp[(-\alpha + i \cdot \beta) \cdot t] + c_2 \cdot \exp[(-\alpha - i \cdot \beta) \cdot t] = \\ = A \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \cdot \sin(\beta \cdot t + \gamma), \end{aligned}$$

где A - новая постоянная интегрирования.

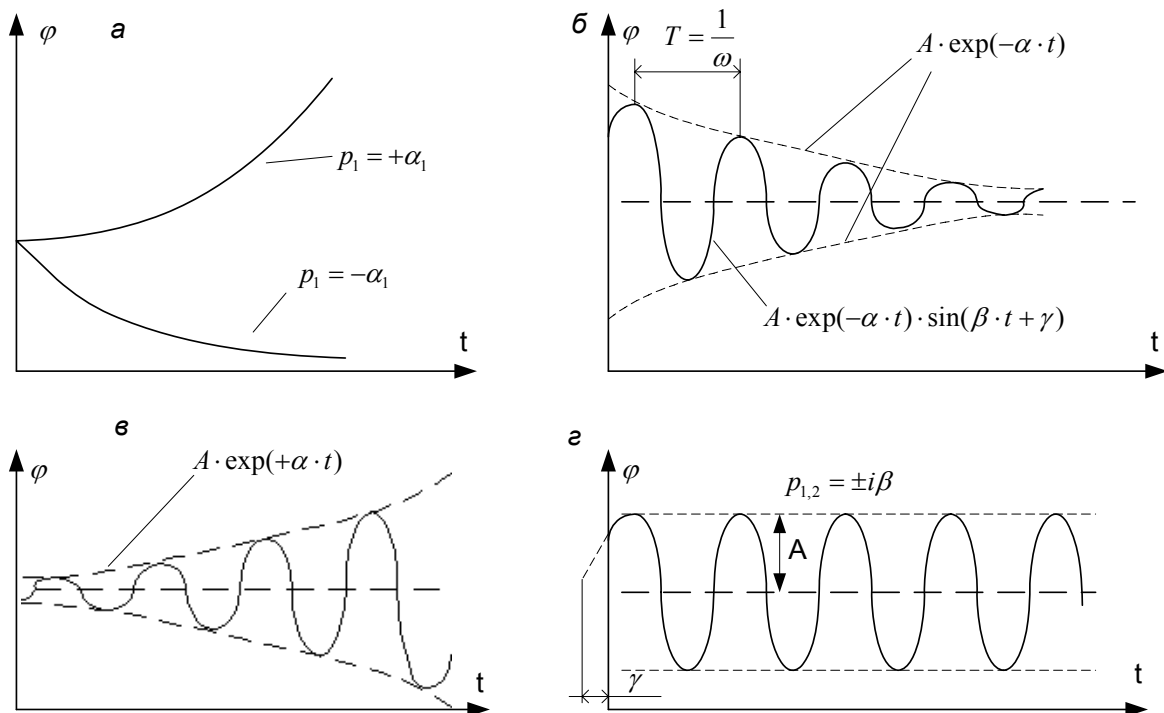


Рис. 51. Переходные процессы при различных значениях корней характеристического уравнения

В этом случае (рис. 51, б) получаются затухающие колебания, причем мнимая часть корня β определяет круговую частоту колебаний $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{\beta}$.

Вещественная часть корня определяет затухание огибающей к кривой переходного процесса (обозначена пунктирной линией). При положительном значении α имеет место расходящийся колебательный процесс (рис. 51, в).

Ч и с т о м н и м ы е к о р н и при $\alpha = 0$. В этом случае $p_{1,2} = \pm i \cdot \beta$, что определит незатухающие колебания (рис. 51, г). Угол γ определяет фазовое смещение переходного процесса по отношению к возмущающему воздействию.

Таким образом, для затухания переходного процесса необходимо, чтобы вещественные части корней были отрицательными. Это относится как к вещественным, так и ком-

плексным корням. Если хотя бы один корень уравнения (40) будет иметь положительную вещественную часть, то переходный процесс в целом будет расходящимся, а система неустойчивой. Корни уравнения (40) можно представить в виде точек на комплексной плоскости $I_m - R_e$ (рис. 52). Для устойчивости САР необходимо и достаточно, чтобы все корни лежали слева от мнимой оси. Таким образом, мнимая ось представляет собой границу, за которую не должны переходить корни уравнения (40).

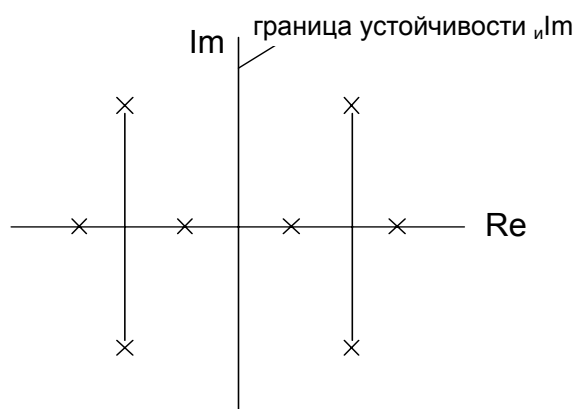


Рис. 52. Комплексная плоскость отображения корней характеристического уравнения

Левая полуплоскость представляет собой область устойчивости. Превращение устойчивой системы в неустойчивую произойдет тогда, когда хотя бы один вещественный или пара комплексных корней перейдет из левой полуплоскости в правую. Граница перехода будет так называемой границей устойчивости САР.

§ 6. 2. Теоремы Ляпунова об устойчивости линеаризованных систем

Реально ни одна САР не является линейной системой. Линейные характеристики типовых звеньев и линейные дифференциальные уравнения движения получены путем линеаризации их реальных характеристик и уравнений.

При разложении в ряд Тейлора удерживались линейные члены и отбрасывались члены более высоких порядков, которые для малых отклонений считались пренебрежимо малыми. Обоснование подобных допущений содержится в теоремах А.М. Ляпунова:

1. Если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет все корни с отрицательными вещественными частями, то действительная система будет устойчивой (так же, как и линеаризованная), т. е. никакие добавки в виде членов второй и высшей степени переменных и их производных или произведений не могут в этом случае «испортить» устойчивость системы.

2. Если характеристическое уравнение линеаризованной системы имеет хотя бы один корень с положительной вещественной частью, то действительная система будет неустойчивой (так же как и линеаризованная), т. е. никакие добавки в виде членов второй и высшей степени переменных и их производных или их произведений не могут придать устойчивость системе.

3. При наличии нулевых или чисто мнимых корней поведение действительной системы не всегда даже качественно определяется ее линеаризованными уравнениями. При этом в ряде случаев добавки в виде членов второй и высших степеней переменных и их производных или их произведений могут коренным образом изменить вид динамического процесса в системе.

Поэтому по линеаризованным уравнениям, вообще говоря, нельзя судить о том, что происходит на границе устойчивости системы (т. е. при нулевых и чисто мнимых корнях).

Обычно представляет интерес изучение и проектирование САР, которые должны быть устойчивы и достаточно далеки от границы устойчивости.

§ 6. 3. Условия и критерии устойчивости

Вычисление значений корней характеристического уравнения высокого порядка является достаточно трудоемким процессом. Желательно воспользоваться какими-либо критериями, с помощью которых можно было бы судить об устойчивости САР непосредственно по коэффициентам характеристического уравнения значений корней.

Необходимым (но не достаточным) условием системы является **положительность** всех коэффициентов характеристического уравнения. Это значит, что система может быть устойчива, но не исключена возможность существования неустойчивости.

Однако, если **не все коэффициенты положительны**, то система неустойчива и никаких дополнительных исследований устойчивости не требуется. Это **необходимое и достаточное условие** устойчивости системы.

Для доказательства сформулированного необходимого условия предположим, что все корни характеристического уравнения вещественные. Представим левую часть уравнения (40) в виде произведения

$$\alpha_0 \cdot (p - p_1) \cdot (p - p_2) \dots (p - p_n) = 0, \quad (41)$$

где $p_1, p_2, \dots, p_n$ - корни характеристического уравнения.

При этом будем считать $\alpha_0 > 0$, так как всегда это условие можно выполнить, умножив все члены уравнения на минус единицу.

В устойчивой системе все корни должны быть отрицательными, т. е. $p_1 = -\alpha_1, p_2 = -\alpha_2$ и т.д.

При этом уравнение (41) приобретает вид

$$\alpha_0 \cdot (p + \alpha_1) \cdot (p + \alpha_2) \dots (p + \alpha_n) = 0. \quad (42)$$

Если раскрыть скобки и вернуться к уравнению в обычном виде (40), то все коэффициенты уравнения получаются положительными, так как, перемножая или складывая положительные величины $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0$ и т.д., нельзя получить отрицательные.

При наличии в уравнении (41) комплексных корней с отрицательной вещественной частью, например, $p_{1,2} = -\alpha \pm i \cdot \beta$, результат не изменяется, так как множители, соответствующие этим корням, будут иметь вид

$$(p + \alpha - i \cdot \beta) \cdot (p + \alpha + i \cdot \beta) = (p + \alpha)^2 + \beta^2.$$

Очевидно, что появление такого множителя не может изменить вывод о положительности всех коэффициентов характеристического уравнения.

Необходимое условие устойчивости становится достаточным только для уравнений первого и второго порядка. В этом случае система будет всегда устойчивой при положительности всех коэффициентов характеристического уравнения.

§ 6. 4. Критерии устойчивости САР

Критерий устойчивости Рауза - Гурвица. Задачу отыскания критерия устойчивости для систем, описываемых дифференциальными уравнениями любого порядка, сформулировал Максвелл в 1868г. Эта задача была впервые решена в алгебраической форме Раузом в 1873г. для уравнений четвертой и пятой степени. В 1877г. задача была решена полностью в виде алгоритма, определяющего последовательность математических операций, необходимых для решения.

Большее распространение получил алгебраический критерий устойчивости, сформулированный в 1895г. математиком Гурвицем.

Независимый подход Рауза и Гурвица к оценке устойчивости системы дал повод в мировой практике считать предложенный критерий – критерием Рауза-Гурвица.

Решение сводится к составлению матрицы коэффициентов уравнения (40), содержащую n строк и n столбцов.

Сначала заполняется главная диагональ матрицы коэффициентами от a_1 до a_n . Вверх (по вертикали) записываются последовательно коэффициенты с увеличивающимся индексом, вниз записываются коэффициенты с убывающими

значениями индексов. Несуществующие коэффициенты ($n < \text{индекс} < 0$) заменяются нулями.

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \bullet & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & \cdot & \bullet & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_0 & \cdot & \cdot & \bullet & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \bullet & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \bullet & a_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_n \end{vmatrix}$$

Оценка устойчивости сводится к тому, что при $a_0 > 0$ должны быть больше нуля все n определителей, получаемых из квадратной матрицы коэффициентов, определители (миноры) составляются по следующему правилу:

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0; \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0; \dots\dots\dots$$

Последний определитель включает в себя всю матрицу. Так как в последнем столбце матрицы все элементы, кроме нижнего, равны нулю, то последний определитель выражается через предпоследний следующим образом: $\Delta_n = a_n \cdot \Delta_{n-1} > 0$.

Однако в устойчивой системе предпоследний определитель должен быть положительным. Поэтому условие положительности последнего определителя сводится к условию $a_n > 0$, т.е. к положительности свободного члена характеристического уравнения.

П р и м е р: САР имеет характеристическое уравнение

$$0.001p^3 + 0.02p^2 + 0.4p + 0.5 = 0.$$

Оценить устойчивость САР по критерию Рауза - Гурвица.

Р е ш е н и е.

1. Составим квадратную матрицу, для чего сначала заполним главную диагональ коэффициентами, начиная с a_1 , а затем всю матрицу согласно правилу Рауза – Гурвица.

$$\begin{vmatrix} 0.02 & 0.5 & 0 \\ 0.001 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0.5 \end{vmatrix}$$

2. Определим значения миноров

$$\Delta_1 = 0.02 > 0; \Delta_2 = \begin{vmatrix} 0.02 & 0.5 \\ 0.001 & 0.4 \end{vmatrix} = 0.02 \cdot 0.4 - 0.001 \cdot 0.5 > 0;$$

$$\Delta_3 = 0.5 \cdot \Delta_2 > 0.$$

3. При положительном значении $a_0(0.001)$ все миноры определителя больше нуля. Следовательно, система устойчива.

К р и т е р и й у с т о й ч и в о с т и М и х а й л о в а.

Левая часть уравнения (40) представляет собой характеристический полином или собственный оператор САР $D(p)$

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n. \quad (43)$$

Если подставить в полином значение $p = i\omega$, где ω - круговая частота колебаний, соответствующих мнимому корню уравнения (40), то получим характеристический комплекс

$$D(i\omega) = X(\omega) + iY(\omega) = D(\omega) \exp[-i\Psi(\omega)], \quad (44)$$

где $X(\omega)$ - вещественная часть, содержит четные степени

$$\omega, \quad X(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + \dots;$$

$Y(\omega)$ - мнимая часть, содержит нечетные степени ω ,

$$Y(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + \dots$$

Функции $D(\omega)$ и $\Psi(\omega)$ представляют собой модуль и фазу (аргумент) характеристического комплекса.

Уравнение (40) не будет иметь корней в правой полуплоскости, если полное приращение аргумента $\Psi(\omega)$ при изменении $0 < \omega < \infty$ равно $n \cdot \frac{\pi}{2}$, где n - степень полинома $D(p)$. САР будет при этом устойчивой. Если полное приращение окажется меньше $n \cdot \frac{\pi}{2}$, то система неустойчива.

Чтобы установить связь между видом кривой Михайлова и знаками вещественных корней характеристического уравнения, определим, чему должен равняться угол поворота Ψ вектора $D(i\omega)$ при $0 < \omega < \infty$. Для этого запишем характеристический полином в виде произведения сомножителей

$$D(p) = a_0(p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n), \quad (45)$$

где $p_1, p_2, \dots, p_n$ - корни характеристического уравнения.

Характеристический вектор можно представить в виде

$$D(i\omega) = a_0(i\omega - p_1)(i\omega - p_2) \dots (i\omega - p_n). \quad (46)$$

Каждое выражение в скобках представляет собой комплексное число. Следовательно, $D(i\omega)$ - произведение из комплексных чисел. При перемножении аргументы комплексных чисел складываются. Поэтому результирующий угол поворота вектора $D(i\omega)$ при изменении $0 < \omega < \infty$ будет равен сумме углов поворота отдельных сомножителей

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 + \dots + \Psi_n.$$

Рассмотрим каждое выражение в скобках в отдельности.

1. Если $p_1 = -\alpha_1$, где $\alpha_1 > 0$, то данный сомножитель будет $(\alpha_1 + i\omega)$. При изменении $0 < \omega < \infty$ вещественная часть остается равной $X = \alpha_1$, а мнимая $Y = \omega$ изменится от

$$Y = 0 \quad \text{до} \quad \Psi_1 = +\frac{\pi}{2} \quad (\text{рис. 53, а}), \quad \text{т.е. на угол } \frac{\pi}{2}.$$

2. Если корень $p_1 = +\alpha_1$, где $\alpha_1 > 0$, то сомножитель $(-\alpha + i\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ изменится таким об-

разом, что вектор повернется на угол от $+\pi$ до $+\pi/2$, т.е. на угол $(-\pi/2)$ (рис. 53, б).

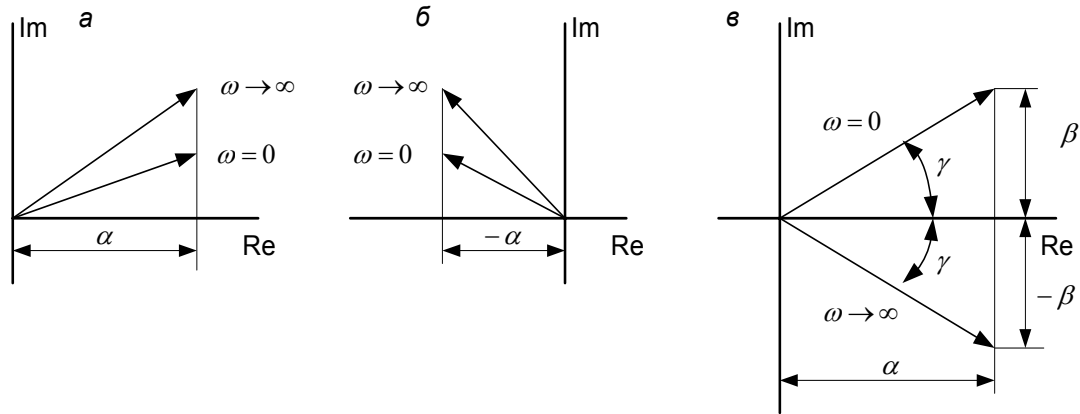


Рис. 53. Анализ сомножителей характеристического вектора

3. Если корни равны $p_{1,2} = -\alpha \pm i\beta$, то сомножители $(\alpha - i\beta + i\omega)(\alpha + i\beta + i\omega)$ при аналогичном изменении ω повернутся на углы $\Psi_1 = \pi/2 + \gamma$ и $\Psi_2 = \pi/2 - \gamma$ (см. рис. 53, в). Тогда вектор, соответствующий данному произведению повернется на угол $\Psi_1 + \Psi_2 = 2 \cdot \pi/2$.

4. Аналогично, если $p_{1,2} = +\alpha \pm i\beta$, то $\Psi_1 + \Psi_2 = -2 \cdot \pi/2$.

Таким образом, если характеристическое уравнение из n корней будет иметь l корней с положительной вещественной частью, то каковы бы ни были эти корни (вещественные или комплексные), им будет соответствовать сумма углов поворота, равная $(-l \cdot \pi/2)$, всем же остальным $n - l$ корням характеристического уравнения, имеющим отрицательные вещественные части, будет соответствовать сумма углов поворота, равная $(n - l) \cdot \pi/2$. Общий угол поворота вектора $D(i\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞

$$\Psi = (n - l) \cdot \pi/2 - l \cdot \pi/2 = n \cdot \pi/2 - l \cdot \pi.$$

В общем случае i -й сомножитель $(\bar{p} - \bar{p}_i)$ выражения (45) в векторной форме можно представить в комплексной плоскости (рис. 54) при подстановке $\bar{p} = i\omega$.

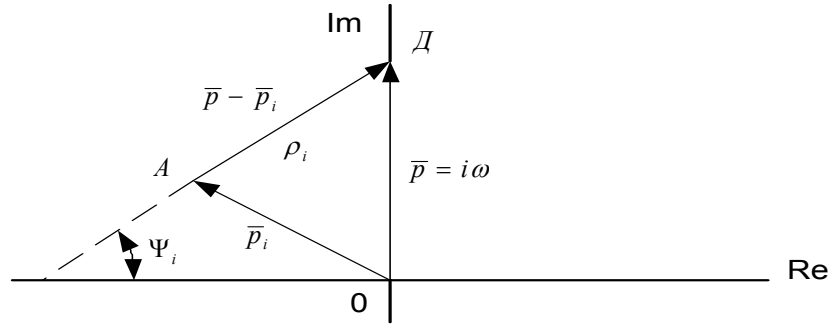


Рис. 54. Представление i -го сомножителя характеристического вектора $p(i\omega)$

Каждый сомножитель $(\bar{p} - \bar{p}_i) = i\omega - p_i = \rho_i \cdot e^{i \cdot \Psi_i}$,
где ρ_i - модуль вектора $\overline{AD}$;

Ψ_i - фазовый угол вектора $\overline{AD}$ (его аргумент).

Тогда уравнение (41) можно представить как

$$a_0(\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \dots \cdot \rho_{n-1} \cdot \rho_n) \cdot e^{i \cdot \Psi_1} \cdot e^{i \cdot \Psi_2} \cdot \dots \cdot e^{i \cdot \Psi_{n-1}} \cdot e^{i \cdot \Psi_n} = 0$$

или
$$R \cdot \exp(i \cdot \sum_{i=1}^n \Psi_i) = 0, \quad (47)$$

где R - модуль Михайлова, $R = a_0 \cdot \prod_{i=1}^n \rho_i$.

Если изменять частоту ω от $(-\infty)$ до (∞) , то угол Ψ_i каждого из векторов изменится от $(-\pi/2)$ до $(\pi/2)$.

К р и т е р и й М и х а й л о в а читается так:
для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы годограф вектора $D(i\omega)$ в комплексной плоскости, полученный в результате подстановки $p = i\omega$ в характеристическое уравнение, при изменении $0 < \omega < \infty$, нигде не обращаясь в н у л ь, развернулся п о с л е д о в а т е л ь н о против часовой стрелки на угол $\pi/2 \cdot n$ (где n - степень уравнения).

Пример: САР описана дифференциальным уравнением

движения

$$0.001 \cdot \frac{d^3 y}{dt^3} + 0.02 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + 0.4 \cdot \frac{dy}{dt} + 0.5y = kx.$$

Оценить устойчивость САР по критерию Михайлова.

Решение:

1. Запишем уравнение в операторной форме:

$$(0.001 \cdot p^3 + 0.02 \cdot p^2 + 0.4 \cdot p + 0.5) \cdot y = kx.$$

2. Приравняв собственный оператор нулю $D(p) = 0$, получим характеристическое уравнение

$$0.001 \cdot p^3 + 0.02 \cdot p^2 + 0.4 \cdot p + 0.5 = 0.$$

3. Делаем подстановку $p = i\omega$

$$(-0.001 \cdot i\omega^3) - 0.02 \cdot \omega^2 + 0.4 \cdot i\omega + 0.5 = 0$$

и выделяем вещественную и мнимую части (Re и Im):

Вещественная часть $\text{Re} = 0.5 - 0.02 \cdot \omega^2$;

Мнимая часть $\text{Im} = 0.4 \cdot \omega - 0.001 \cdot \omega^3$.

4. Для отыскания точек годографа составим табл. 6.1.

Таблица 6.1

ω	0	1	5	10	20	50	100
Re	0.5	0.48	0	-1.5	-7.5	-49	-199
Im	0	0.4	1.9	3	0	-105	-960

5. Строим годограф вектора на комплексной плоскости (рис. 55).

6. При $\omega \rightarrow 0$ $\lim \text{Im} = -\infty$, т.е. годограф вектора последовательно и не обращаясь в нуль повернется против часовой стрелки на угол, не превышающий значения $\frac{\pi}{2} \cdot 3$. Таким образом, САР устойчива.

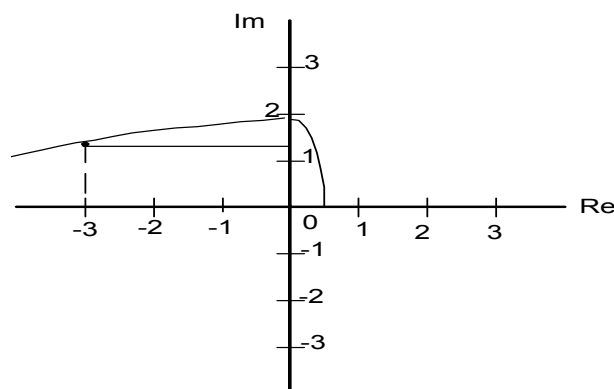


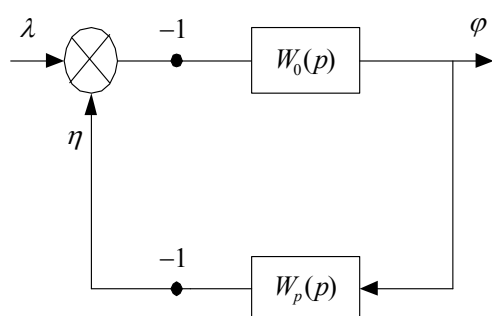
Рис. 55. Годограф Михайлова

К р и т е р и й у с т о й ч и в о с т и Н а й к в и с т а основан на построении амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$.

Устойчивость системы определяется в следующем порядке:

1. Строится структурная схема САР;
2. Разрывают замкнутую систему, нарушая одну из связей контура (рис. 56, а);

а



б

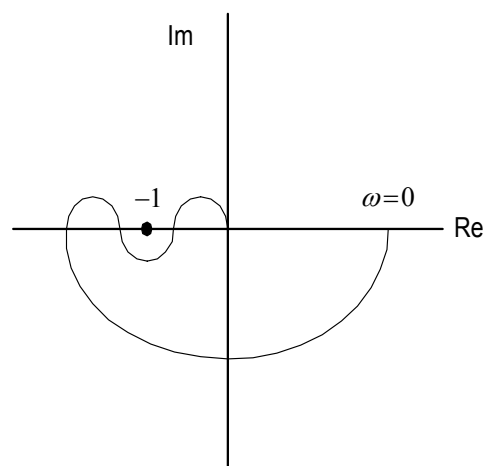


Рис. 56. Структурная схема САР и ее АФЧХ

3. Определяют передаточную функцию разомкнутой системы

$$W(p) = W_0(p) \cdot W_p(p);$$

4. Строят АФЧХ разомкнутой системы

$$W(i\omega) = A_0(\omega) \cdot A_p(\omega) \cdot \exp\{-i[\gamma_0(\omega) + \gamma_p(\omega)]\}, \quad (48)$$

где $A_0(\omega), A_p(\omega)$ - соответственно амплитудно-частотные характеристики объекта и регулятора;

$\gamma_0(\omega), \gamma_p(\omega)$ - соответственно фазово-частотные характеристики объекта и регулятора.

Введя замену $A(\omega) = A_0(\omega) \cdot A_p(\omega)$ для разомкнутой системы, получим АФЧХ $W(i\omega) = A(\omega) \exp\{-i[\gamma_0(\omega) + \gamma_p(\omega)]\}$;

5. Для устойчивости САР необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ соответствующей разомкнутой системы не охватывала на комплексной плоскости точку с координатами $(-1, i0)$. Произвольная АФЧХ устойчивой системы показана на рис. 56, б.

П р и м е р: Оценить устойчивость САР с регулятором прямого действия с помощью критерия Найквиста, если степень неравномерности регулятора $\delta_p = 0.1$, время двигателя $T_a = 0.9с$, время регулятора $T_{pa} = 0.001с$, время катаккта $T_{ka} = 0.02с$, степень неравномерности статической характеристики двигателя $\delta_a = 0.1$.

Решение:

1. Определим передаточную функцию разомкнутой системы (см. разделы 5. 2 и 5. 3)

$$W(p) = \frac{1}{T_a \cdot p + \delta_a} \cdot \frac{1}{T_{pa}^2 \cdot p^2 + T_{ka} \cdot p + \delta_p}. \quad (49)$$

2. Определим АФЧХ (подставим для этого в выражение (49) значение $p = i\omega$ и получим выражение (48) для АФЧХ разомкнутой системы), где

$$A_0(\omega) = \frac{\delta_a}{\sqrt{\delta_a^2 + T_a \cdot \omega^2}};$$

$$A_p = \frac{1}{\sqrt{\delta_p^2 + (T_{ka}^2 - 2 \cdot T_{pa}^2 \cdot \delta_p) \cdot \omega^2 + T_{pa}^4 \cdot \omega^4}}.$$

3. Определим АЧХ $A(\omega) = A_0(\omega) \cdot A_p(\omega)$ при изменении $0 < \omega < \infty$, результаты сведем в табл. 6.2.
4. Определим ФЧХ, где $\gamma(\omega) = \gamma_a(\omega) + \gamma_p(\omega)$

$$\gamma_a(\omega) = -\arctg(\omega \cdot T_a / \delta_a) ;$$

$$\gamma_p(\omega) = -\arctg(\omega \cdot T_{ka} / (\delta_p - \omega^2 \cdot T_{pa}^2)) .$$

Результаты расчета $\gamma(\omega)$ при $0 < \omega < \infty$ сведем в табл. 6.2.

Таблица 6.2

$\omega, \frac{1}{c}$	0	2	4	6	8	10	20	30	∞
$A(\omega)$	10	9,28	7,81	6,4	5,3	4,47	2,42	1,64	0
$\gamma(\omega)$	0	-21,7	-38,5	-49	-57,7	-61,3	-75,6	-80,2	0

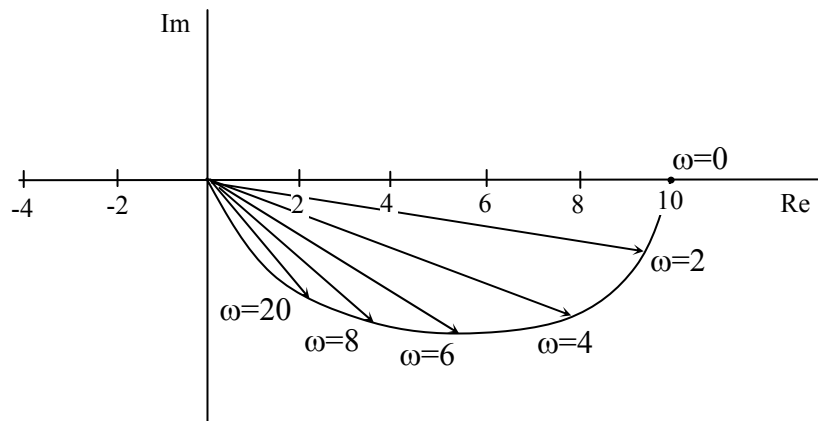


Рис. 57. Амплитудно-фазовая частотная характеристика

Оценка устойчивости по диаграмме Вышнеградского получила широкое использование для систем автоматического регулирования, описываемых уравнением движения третьего порядка, т.е. для САР с регулятором прямого действия.

Характеристическое уравнение при этом имеет вид

$$a_0 \cdot p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + a_3 = 0. \quad (50)$$

Разделим все члены этого уравнения на коэффициент a_3 и

введем вместо p новую переменную $p = q \cdot \sqrt[3]{\frac{a_3}{a_0}}$.

Нормированный вид этого уравнения

$$q^3 + \chi \cdot q^2 + \xi \cdot q + 1 = 0, \quad (51)$$

где χ, ξ - коэффициенты

$$\chi = \frac{a_1}{a_2} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{a_2}{a_0}} \right)^2 = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_0^2 \cdot a_3}};$$

$$\xi = \frac{a_2}{a_3} \cdot \sqrt[3]{\frac{a_2}{a_0}} = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_0 \cdot a_3^2}}.$$

Эти коэффициенты называются параметрами Вышнеградского.

Поскольку после нормирования уравнения (50) первый и последний коэффициент равны единице, параметры χ и ξ стали определяющими параметрами для любой САР третьего порядка в плоскости $\chi = f(\xi)$.

Условия устойчивости для САР с регулятором прямого действия были впервые сформулированы Вышнеградским в 1876г. (до появления критерия Гурвица). Это условие $\chi > 0, \xi > 0$ при $\chi \cdot \xi > 1$. Граница устойчивости САР является уравнением гиперболы $\chi = \frac{1}{\xi}$. Область устойчивости лежит выше этой кривой при $\chi > 0$ и $\xi > 0$ (рис. 58).

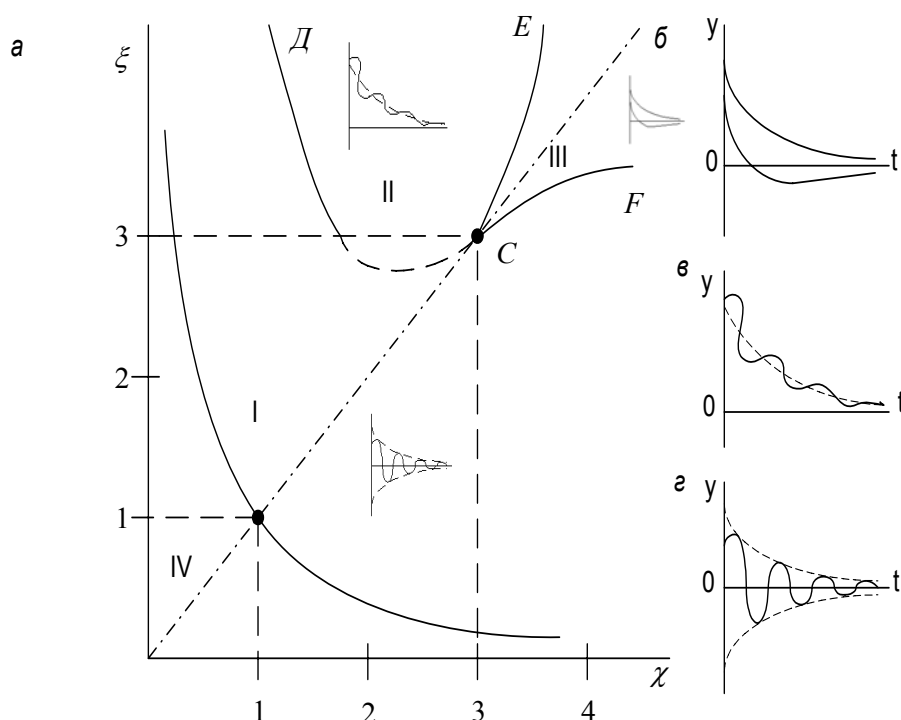


Рис. 58. Диаграмма устойчивости Вышнеградского

В точке «С» с координатами $\chi = 3$ и $\xi = 3$ все три корня уравнения (51) равны, следовательно, характеристическое уравнение имеет вид $(\sigma + 1)^3 = 0$, где $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -1$.

В области устойчивости САР возможны два случая:

- когда все три корня вещественны;
- когда один корень вещественный, а два комплексных.

Граница между этими возможными случаями определяется равенством нулю дискриминанта уравнения третьей степени, который может быть получен из формулы дискриминанта

$$\chi^2 \cdot \xi^2 - 4 \cdot (\chi^3 + \xi^3) + 18 \cdot \chi \cdot \xi - 27 = 0. \quad (52)$$

Это уравнение дает на плоскости $\chi - \xi$ кривые СЕ и СФ. Внутри области ЕСФ дискриминант отрицателен, следовательно, в этой области имеется три вещественных корня (область III).

В остальной части области устойчивости дискриминант положителен, что соответствует наличию пары комплексных корней.

Существенное значение имеет взаимное расположение вещественных и комплексных корней. Здесь следует выделить два случая:

I – пара комплексных корней лежит ближе к мнимой оси, чем к вещественной;

II – вещественный корень лежит ближе к мнимой оси, чем пара комплексных.

Границей между этими двумя случаями является расположение всех корней на одинаковом расстоянии от мнимой оси.

Уравнение этой границы можно найти, положив значения корней

$$q_1 = -\alpha, q_2 = -\alpha \pm i\beta.$$

Тогда характеристическое уравнение примет вид

$$q^3 + \chi \cdot q^2 + \xi \cdot q + 1 = (q + \alpha) \cdot (q + \alpha - i\beta) \cdot (q + \alpha + i\beta).$$

Приравнивание коэффициентов при одинаковых степенях q после исключения α и β дает искомое уравнение, соответствующее граничному случаю

$$2 \cdot \chi^3 - 9 \cdot \chi \cdot \xi + 27 = 0.$$

Кривая СД (см. рис. 58, *а*) на плоскости $\chi - \xi$ соответствует этому уравнению.

Таким образом, область устойчивости разбивается на три части I, II и III. В области III, где все корни вещественные в зависимости от начальных условий получим апериодический переходный процесс одного из видов, приведенных на рис. 58, *б*.

В областях I и II, где имеется один вещественный корень и два комплексных, переходный процесс будет иметь соответственно формы, показанные на рис. 58, *в* и *г*.

В области I быстрее затухает экспонента и переходный процесс в основном будет определяться колебательной составляющей.

Область I – это область колебательных процессов.

В области II, наоборот, затухает колебательная составляющая. Это область монотонных сходящихся процессов.

Область IV – область расходящихся (неустойчивых) переходных процессов.

§ 6. 5. Качество процесса регулирования

Под качеством процесса регулирования понимают способность автоматического регулятора поддерживать с достаточной точностью заданное значение регулируемой величины.

Качество процесса тем выше, чем меньше отклонение регулируемой величины от заданного значения и чем быст-

рее практически устанавливается заданный установившийся режим.

Следовательно, первой стороной качества регулирования является точность поддержания заданного значения регулируемого параметра, когда на систему регулирования не воздействуют какие бы то ни было внешние возмущающие факторы. Другой стороной качества регулирования является качество переходных процессов, которые возникают при действии на систему различных по характеру и форме внешних воздействий.

Качество процесса регулирования оценивается (рис. 59) прежде всего статической ошибкой (степенью неравномерности статической характеристики) по окончании переходного процесса в установившемся режиме работы, которая определяется степенью неравномерности регулируемой величины

$$\delta = 2 \cdot \frac{\varphi_{уст.хх.} - \varphi_{уст.н.}}{\varphi_{уст.хх.} + \varphi_{уст.н.}} \cdot 100\%,$$

а также степенью неустойчивости регулируемой величины Ψ , определяемой размахом колебаний в установившемся режиме. В соответствующих ГОСТах устанавливают допускаемую степень неустойчивости $[\Psi]$ для определенных установившихся режимов. Как правило, это режим холостого хода и номинальные режимы.

Свойства переходного процесса определяются прежде всего максимальным отклонением регулируемой величины от исходного режима или перерегулированием.

Все параметры вычисляют или в относительных единицах или в процентах.

Важнейшим показателем качества переходного процесса является время переходного процесса τ , определяемое отрезком времени от начала переходного процесса до момента, начиная с которого отклонение регулируемой величины не будет выходить за пределы зоны допускаемой степени неустойчивости установившегося режима работы.

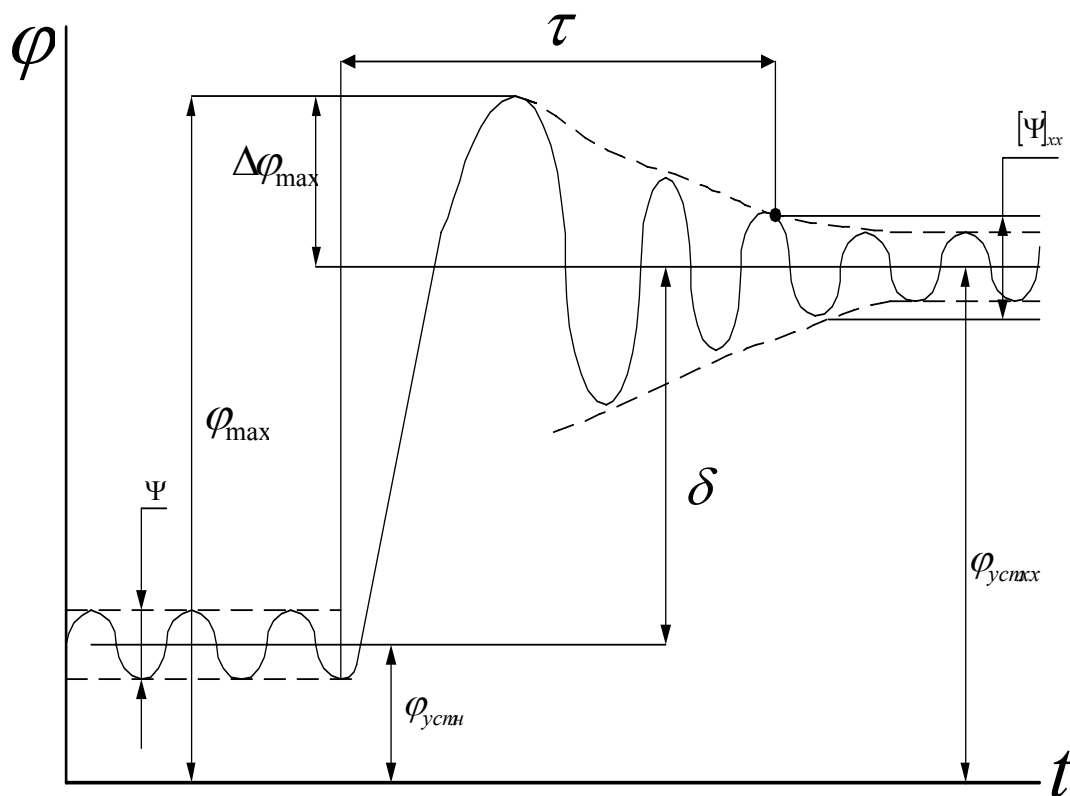


Рис. 59. Переходный процесс САР

Иногда качество переходного процесса оценивают дополнительно числом полувольт за время τ , что характеризует степень колебательности переходного процесса.

Глава 7. Виды регулирующих воздействий (законы регулирования)

§ 7.1. Релейное регулирование

Особенностью работы регуляторов является создание прерывистости потока вещества (энергии) на входе в объект регулирования. Соответственно колеблется значение выходной координаты. Релейные регуляторы просты, надежны и имеют низкую стоимость.

На рис. 60, а приведена широко применяемая функциональная схема релейного регулирования давления пара во вспомогательном паровом котле 2, осуществляемая включением и выключением электроприводного топочного устройства 1 с помощью регулятора давления пара сильфонного типа 3. Управление топочным устройством осуществляется с помощью электромагнитного пускателя 4.

На рис. 60, б представлена структурная схема САРд пара, где I – реле давления (регулятор), II – пускатель, III – объект регулирования. Временная диаграмма изменения регулируемой величины иллюстрируется на рис. 60, в. Моменты включения топочного устройства отмечены величиной расхода топлива g с 8-й минуты по 18-ю и с 23-й минуты по 32-ю. Соответственно на оси давления котла P_k отмечены штрих-пунктирные линии включения – выключения топочного устройства. Давление удерживается в диапазоне $(4...5,2) \cdot 10^{-2} \text{ кПа}$. Таким образом, статизм системы автоматического регулирования давления определится величиной $\delta = 2 \cdot \frac{(5,2 - 4)}{(5,2 + 4)} \cdot 100\% = 26\%$.

Частота включений зависит от величины потребления пара (внешнее возмущение, нагрузка). Неравномерность регулирования можно уменьшить за счет сужения установки реле давления, однако, при этом возрастает частота включений в работу топочного устройства. Это скажется на надежности работы САРд. Релейные САР применяются для регулирования процессов, в которых допускаются сущест-

венные колебания регулируемого параметра (регулирование давления сжатого воздуха в компрессорах при набивке баллонов, уровня воды в утилизационных котлах, регулирование температуры в морозильных камерах и т.п.).

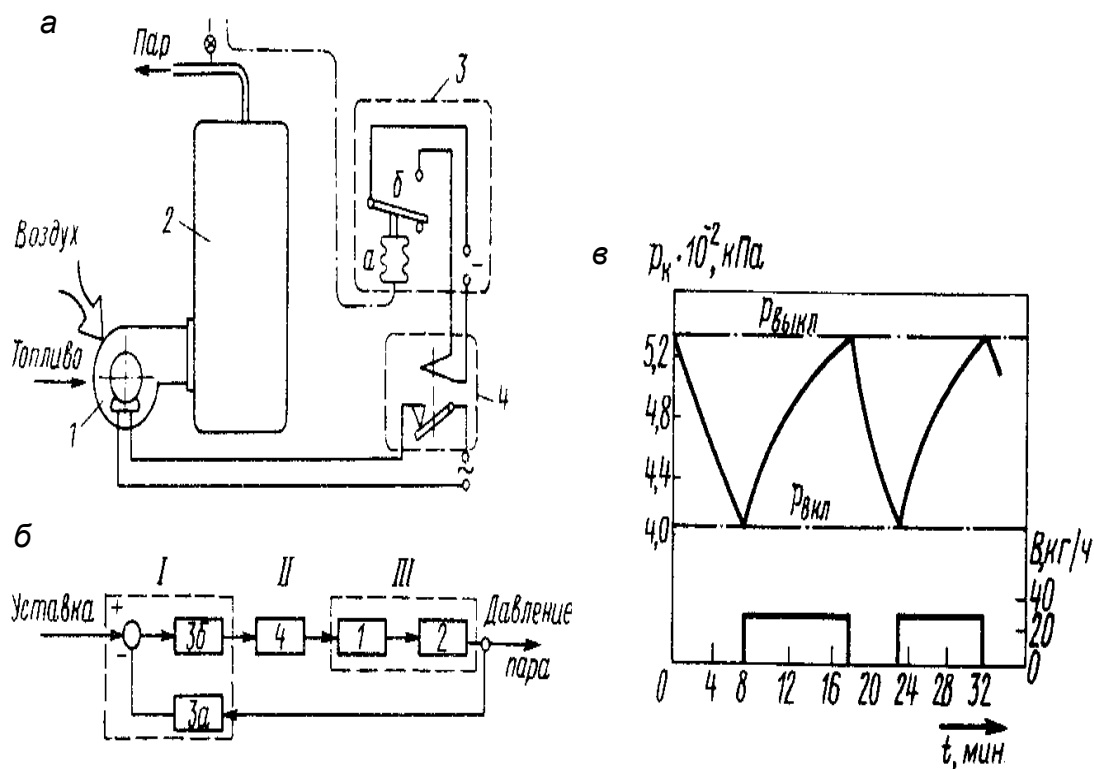


Рис. 60. Релейное регулирование

§ 7. 2. Пропорциональное регулирующее действие (пропорциональные регуляторы)

Если управляющий сигнал регулятора пропорционален отклонению регулируемой величины, то такие регуляторы называются пропорциональными (обозначаются русской буквой «П» или латинской «Р»). Примером простейшего П-регулятора является регулятор уровня воды в баке, предложенный и реализованный в паровой машине И.И. Ползуновым, или регуляторы уровня, представленные на рис. 26. Наглядное представление о работе этого П-регулятора дает его временная характеристика (рис. 61).

Так как данный регулятор представляет собой типовое идеальное звено нулевого порядка, то в любой момент вре-

мени $t_1, t_2, \dots, t_i$ выходной сигнал равен $y_i = k_R \cdot x_i$, где коэффициент статического усиления $k_R = \frac{y_i}{x_i} = \text{const.}$

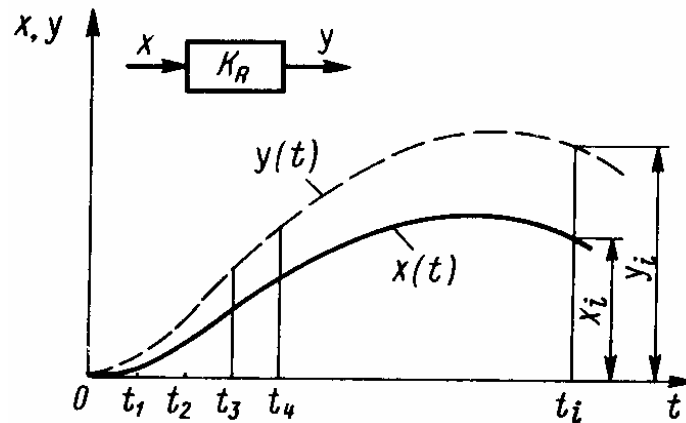


Рис. 61. Временная характеристика П-регулятора

П-регулятором, например, также является пневматический регулятор непрямого действия (рис. 62). Этот регулятор описывается уравнением типового аperiodического звена первого порядка $T_R \cdot \frac{dy}{dt} + y = k_R \cdot x$.

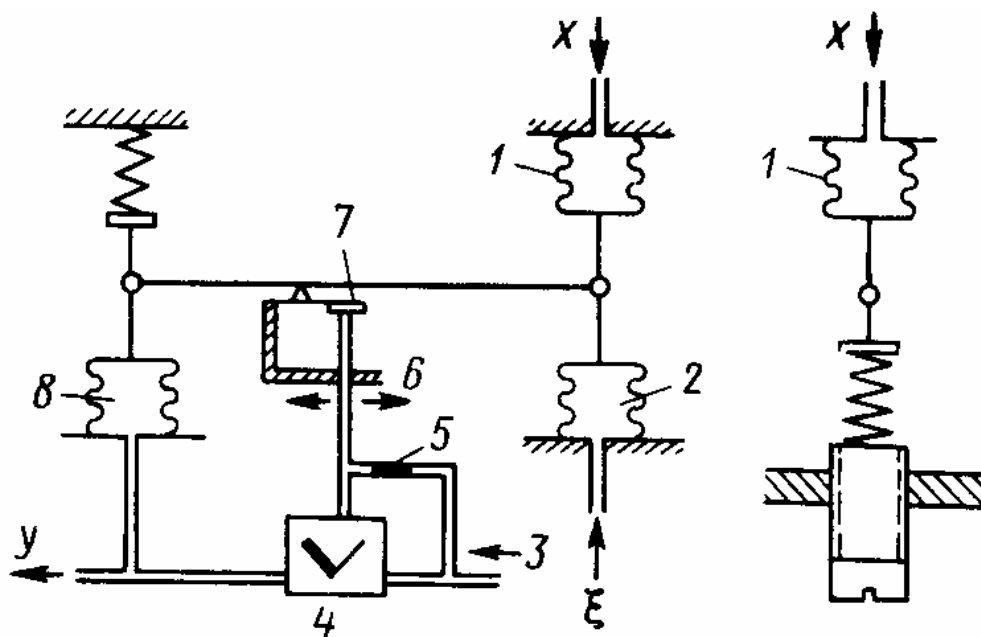


Рис. 62. Функциональная схема пропорционального пневматического регулятора непрямого действия

На рис. 62 обозначены: 1 – измеритель входного сигнала x ; 2 – измеритель сигнала задания ξ ; 3 – питание; 4 – усилитель мощности; 5 – жиклер; 6 – устройство для измерения коэффициента усиления; 7 – заслонка; 8 – сильфон отрицательной обратной связи (вместе с пружиной сильфон образует ГОС)

Как правило, устройство для изменения координаты задания выполняется в виде конструкции, позволяющей изменять предварительную затяжку пружины (показано на рисунке справа).

Заслонка 7 закреплена на горизонтальном рычаге, перемещение правого конца рычага определяется сигналом рассогласования $x - \xi$ между входной величиной x и заданием ξ , а левого – сигналом отрицательной обратной связи.

В потоке воздуха между постоянным сопротивлением 5 и сопротивлением пневмопреобразователя формируется управляющий сигнал, пропорциональный зазору между соплом и заслонкой. Так как сопротивление 5 дросселирует поток до ламинарного режима движения, то мощность управляющего сигнала незначительна, поэтому предусмотрен усилитель мощности 4.

Угловой груз 6 обеспечивает горизонтальное положение заслонки независимо от значения входной координаты x .

Питание пневматического безрасходного усилителя мощности обеспечивается так называемым сервисным воздухом при определенном давлении.

На рис. 63 представлена осциллограмма переходного процесса этого регулятора. Форма входного и выходного сигналов вследствие инерционности (T_R) отлична от «чистого» скачка. По ординатам установившихся режимов (горизонтальные участки осциллограммы) можно определить коэффициент усиления регулятора по известному правилу (отношению выходного сигнала к входному)

$$k_R = \frac{19,5}{12} = 1,6.$$

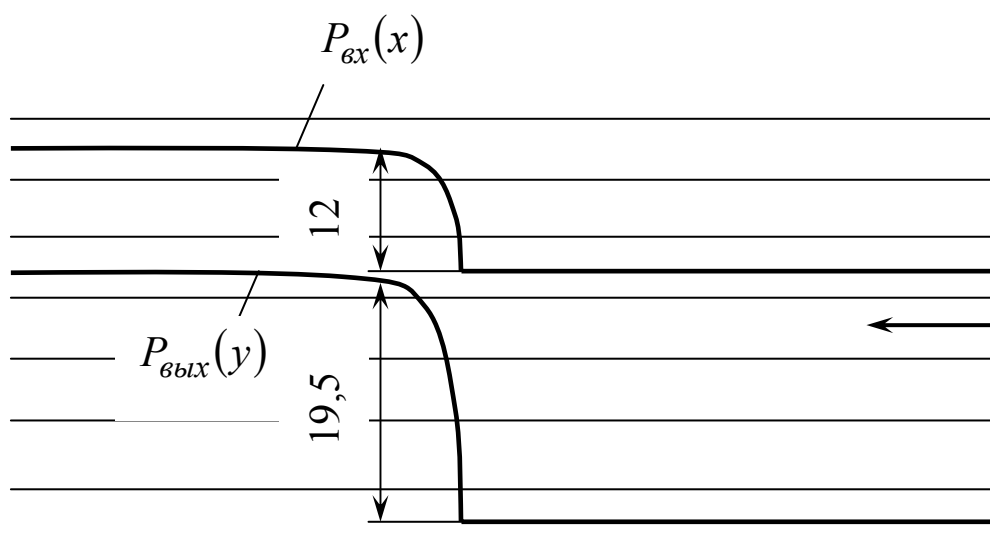
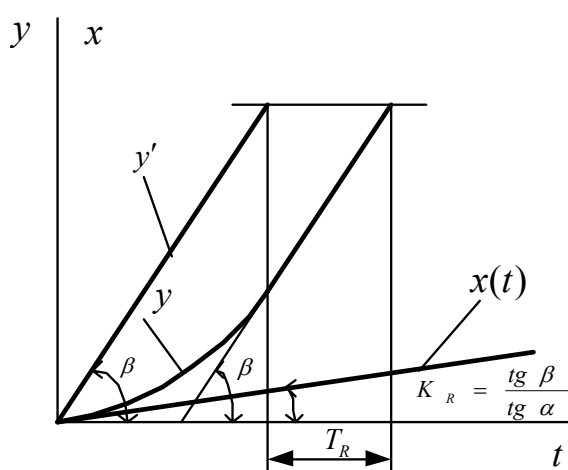


Рис. 63. Определение коэффициента усиления регулятора по осциллограмме переходного процесса при «скачкообразном» возмущении

На рис.64 показан способ определения коэффициента усиления регулятора k_R и времени регулятора T_R по разгонной характеристике, полученной экспериментально при пропорциональном во времени возрастании сигнала на входе в регулятор $x(t)$.



$y'(t)$ - при $T_R = 0$
(безинерционный регулятор)
 $y(t)$ - зависимость выходного сигнала от времени

Рис. 64. Определение коэффициентов k_R и T_R пропорционального регулятора

При малой инерционности П-регулятора, когда $T_R \rightarrow 0$, кривая $y(t)$ практически совпадает с $y'(t)$. Вводится понятие «зона пропорциональности» регулятора. Оно практически подменяет коэффициент усиления регулятора и обозначается как РВ (Proportional Band). РВ выражает статическое изменение входного сигнала в процентах к его полному диапазону, необходимое для перемещения регулирующего органа на величину номинального хода. Так $PB = 10\%$ означает, что 10%-е отклонение входа по шкале регулятора, вызовет перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое. В России зона пропорциональности обозначается символом « b » $PB = b = \frac{100}{k_R} \%$

или
$$b = 100 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y} \%$$

Следует иметь в виду следующее:

1. С увеличением коэффициента усиления уменьшается **н е р а в н о м е р н о с т ь р е г у л и р о в а н и я**, но ухудшается при этом устойчивость работы САР в динамике.

2. Инерционность регулятора **у х у д ш а е т д и н а м и ч е с к и е с в о й с т в а** системы, поэтому следует стремиться к снижению коэффициента T_R .

В основе П-регулирования заложен принцип Ползунова-Уатта, т.е. управление процессами по отклонению регулируемой величины. Это основной закон регулирования, он широко используется в современных автоматических регуляторах.

К недостаткам пропорционального регулирования следует отнести:

- замедленную реакцию регулятора в начале переходного процесса, пока это отклонение незначительно и, следовательно, незначительно регулирующее воздействие на процесс;
- невозможность обеспечения П-регуляторами малых значений степени неравномерности, т.к. при ее уменьшении

ниже 1,5...1% увеличивается неустойчивость процессов регулирования ($\delta \rightarrow 0$, а $k_R \rightarrow \infty$).

§ 7. 2. Интегральное регулирующее воздействие (интегральные регуляторы)

При предъявлении высоких требований в части обеспечения точности поддержания регулируемого параметра в судовой энергетике часто применяют **и н т е г р а л ь н ы е** **р е г у л я т о р ы** (обозначение русским символом И или латинским I). На рис. 65 приведена схема интегрального регулятора, установленного в системе автоматического регулирования давления на питательном клапане парового котла.

Регулирующее воздействие пропорционально не отклонению регулируемого параметра, а интегралу от этого отклонения (см. раздел 5.5). Разность давлений Δp измеряется сильфонами 5, управляющими положением струйной трубки 6 гидравлического усилителя.

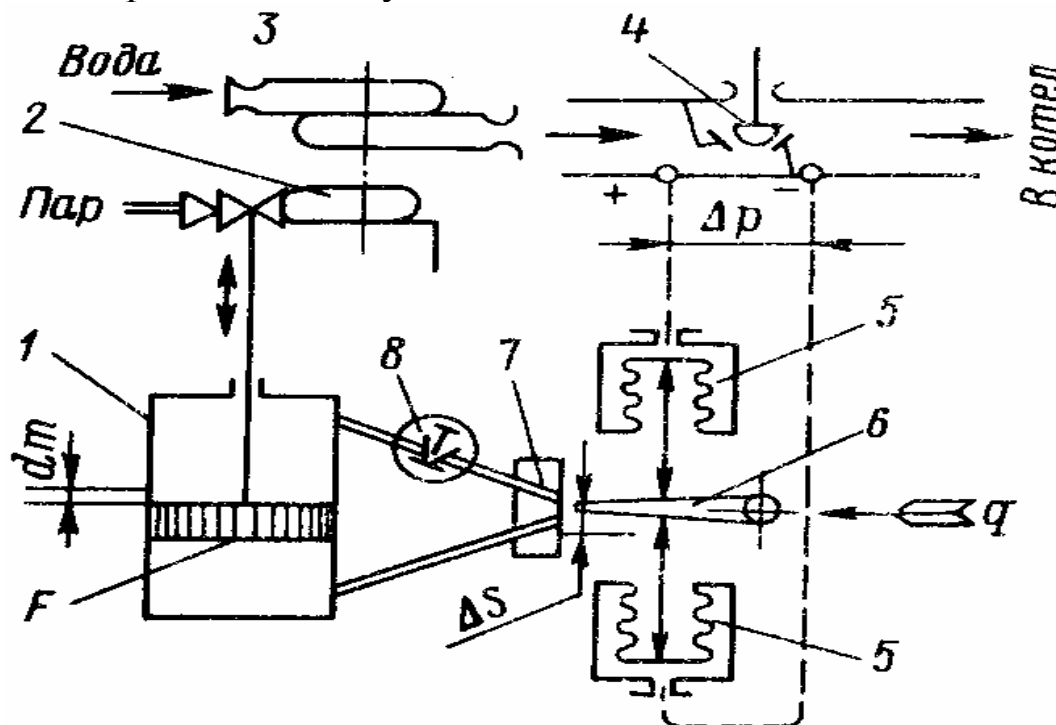


Рис. 65. Функциональная схема САР давления на питательном клапане парового котла

К трубке подводится под давлением конденсат. При нейтральном (среднем) положении трубки давление в полостях сервомотора 1 одинаково, но по мере ее отклонения от среднего положения через плату 7 поступает в рабочую полость сервомотора конденсат с интенсивностью $q, \text{см}^3/\text{с}$.

Сервомотор 1 управляет парорегулирующим клапаном турбопривода 2 к насосу 3, который подает питательную воду в котел через регулирующий клапан 4. Дроссель 8 служит для изменения скорости перемещения поршня сервомотора (времени сервомотора) при регулировках и настройке.

Уравнение движения имеет вид
$$\mu = \frac{1}{T_u} \cdot \int_0^t \varphi \cdot dt,$$

где μ, φ - соответственно относительные изменения регулирующего воздействия и регулируемой величины,

$$\mu = \frac{m}{m_{\max}} \quad \text{и} \quad \varphi = \frac{\Delta p}{(\Delta p)_{\max}};$$

$$T_u - \text{время интегрирования, с, } T_u = \frac{F \cdot m_{\max}}{q \cdot \Delta S_{\max}}.$$

Величина T_u - настроечный параметр И-регулятора, устанавливается дросселем 8. На рис. 66, а представлена аstaticкая характеристика регулирования, на рис. 66, б – графическая интерпретация уравнения И-регулятора. Управляющий сигнал μ_i в любой момент времени пропорционален площади под кривой $\varphi(t)$. Равновесие может быть достигнуто лишь при условии $\varphi = 0$.

К недостаткам интегрального закона регулирования следует отнести затягивание процесса и ухудшение качества регулирования в динамике.

Автоматическое регулирование с улучшенными характеристиками можно получить путем комбинирования пропорционального и интегрального воздействий. Для обозначения пропорционально-интегрального регулятора введены символы ПИ или PI.

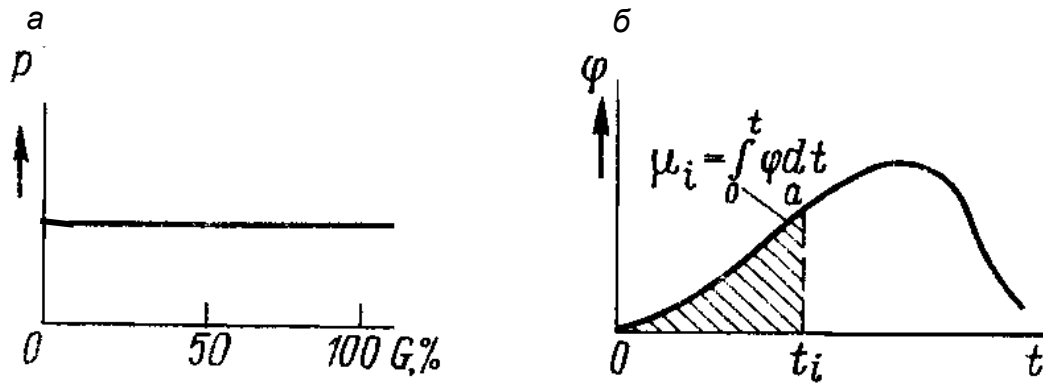


Рис. 66. Характеристики И-регулятора

§ 7.3. Пропорционально-интегральное регулирующее воздействие (пропорционально-интегральный регулятор)

На рис. 67 представлена функциональная схема такого регулятора.

Пропорциональная составляющая формируется за счет сигнала, поступающего в полость сильфона отрицательной обратной связи 8.

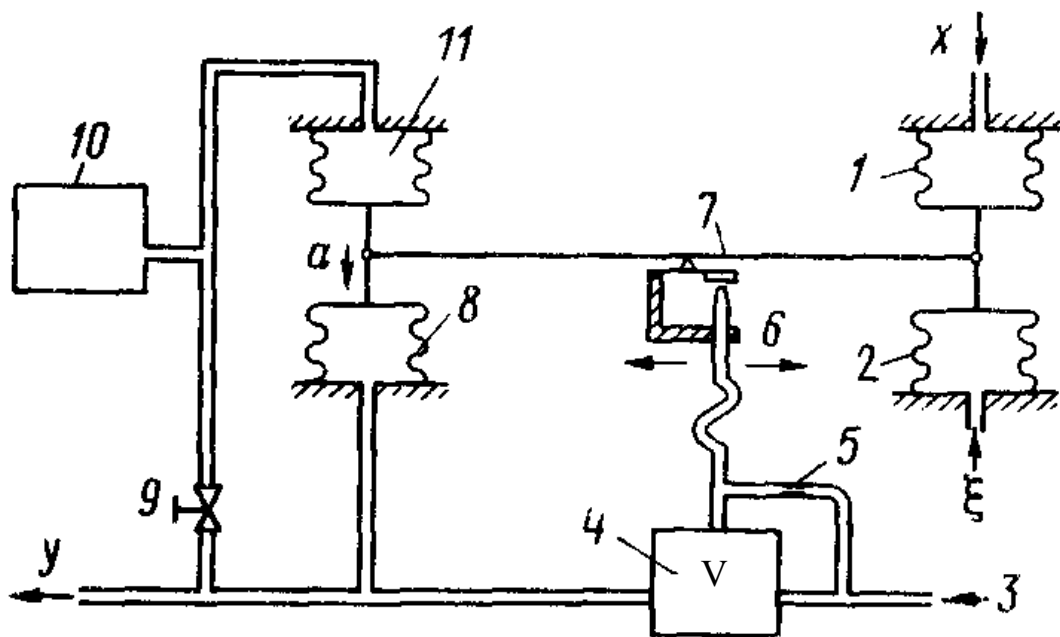


Рис. 67. Функциональная схема ПИ-регулятора

Изменение выходного сигнала Δy_1 по этой составляющей пропорционально изменению входного сигнала X (см. раздел 7.2) $\Delta y_1 = k_R \cdot X$. Интегральная составляющая ПИ-регулятора формируется за счет сигнала, поступающего в полость сильфона 11 через дроссель 9 (положительная обратная связь). Объем 10 играет роль аккумулятора сжатого воздуха и облегчает установку времени интегрирования T_u регулятора дросселем 9. Изменение интегральной составляющей Δy_2 выходного сигнала

$$\Delta y_2 = \frac{k_R}{T_u} \int_0^t x \cdot dt.$$

Эффект интегрального воздействия аналогичен эффекту ручной подстройки координаты задания после каждого изменения нагрузки. Полное изменение выходного сигнала определится согласно принципу суперпозиции как сумма составляющих процесса

$$y = k_R \cdot \left(x + \frac{1}{T_u} \int_0^t x \cdot dt \right). \quad (54)$$

Переходной процесс идеального ПИ-регулятора при скачкообразном изменении входной координаты представлен на рис. 68 (в идеальном регуляторе не учитывается инерционность).

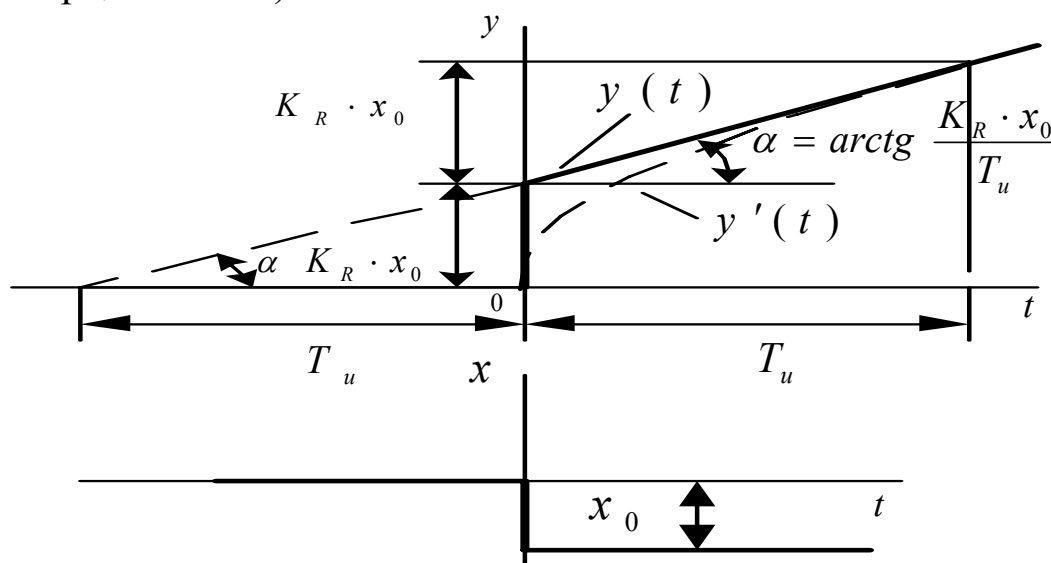


Рис. 68. Переходной процесс ПИ-регулятора:
 $y(t)$ - идеальный регулятор; $y'(t)$ - реальный регулятор

Интегральная составляющая ухудшает устойчивость системы и затягивает переходные процессы. Тем не менее, ПИ-регуляторы получили широкое применение в первую очередь для объектов, требующих большой перестановочной силы регулирующего органа.

§ 7. 4. Регулирующее воздействие по производной

Если знать в конкретный момент знак и значение производной по времени от отклонения регулируемой величины, то возможно, не дожидаясь определенного отклонения y , начать процесс регуляторного воздействия на объект. Это позволит существенно улучшить качество переходного процесса. В 1845г. братьями Сименс запатентован так называемый промышленный регулятор (рис. 69). Частота вращения ω_{ex} вала двигателя через коническую 1 и сателлитные 3 шестерни передается шестерне 4, установленной на валу маховика (вращение маховика с этим валом не связано). При установившемся режиме частоты $\omega_{ex} = \omega_m$ и водило 2 с шестернями 5 и 6 неподвижны. С изменением частоты вращения вала вследствие инерционности маховика возникает сила давления на зубья шестерни 4, пропорциональная ускорению $\frac{d\omega_{ex}}{dt}$. Эта сила поворачивает водило и шестерню 6 выходного вала регулятора на угол, пропорциональный скорости изменения ω_{ex} $\xi_{six} = k_R \cdot \frac{d\omega_{ex}}{dt}$ или

$$y = k_R \cdot \frac{dx}{dt}.$$

При соответствующей настройке удастся получить астатическую характеристику регулирования частоты вращения машины. Однако в чистом виде регулирование по производной от отклонения (символическое обозначение Д или в латинской транскрипции D) не получило распространения.

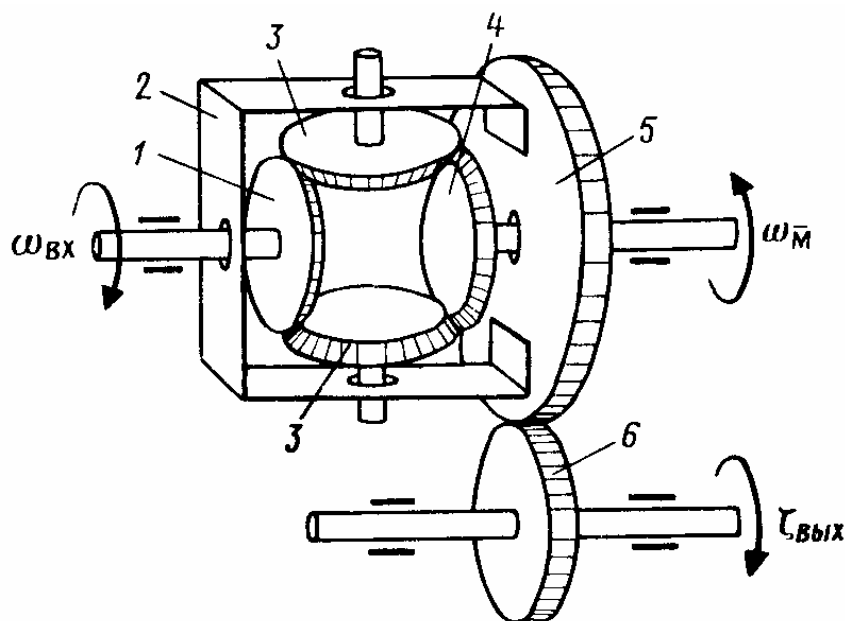


Рис. 69. Функциональная схема регулятора с воздействием по производной от частоты вращения вала

§ 7. 5. Пропорционально-дифференциальное регулирующее воздействие

Воздействие по производной часто совмещают с пропорциональным регулирующим воздействием в так называемых пропорционально-дифференциальных (ПД) регуляторах. Это позволяет улучшить качество переходных режимов САР.

На рис.70 приведена функциональная схема ПД-регулятора. От схемы П-регулятора (см. рис. 62) она отличается наличием дросселя 12, расположенного перед сильфоном 8 обратной связи. С помощью дросселя устанавливается постоянная времени дифференцирования T_D регулятора. Такой регулятор называют регулятором с упреждением.

Перемещение правого конца рычага, несущего заслонку 7 пневмоусилителя, определяется сигналом рассогласования $x - \xi$ на входе регулятора, а левого — изменением давления сжатого воздуха в полости сильфона 8. В статике, когда давление по обе стороны дросселя 12 выравнивается, регулятор работает как пропорциональный с коэффициен-

том усиления k_R . В начальный момент переходного процесса, когда действие обратной связи заблокировано дросселем 12, регулятор ведет себя как регулятор с коэффициентом усиления $k_\partial > k_R$. По мере уменьшения разности давлений на дросселе 12 коэффициент усиления возвращается к значению k_∂ .

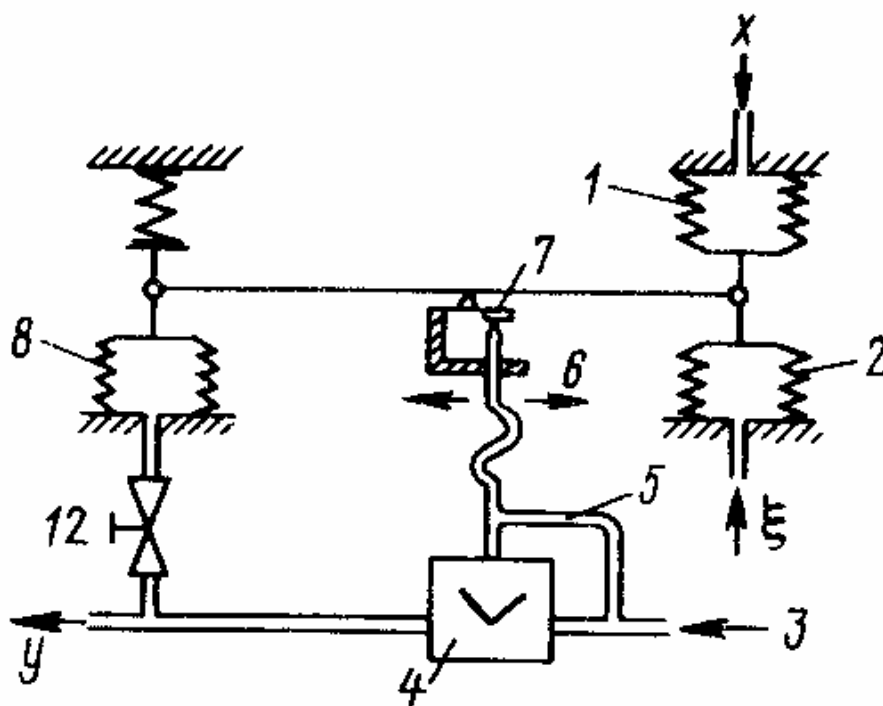


Рис. 70. Функциональная схема ПД-регулятора (регулятор с упреждением)

Уравнение движения идеального ПД-регулятора (безинерционного) $T_\partial \cdot \frac{dy}{dt} + y = k_R \cdot x$ с ненулевыми начальными условиями (при $t = 0$, $y(0) = k_\partial$). При ступенчатом входном воздействии $x_0 = const$ решение вышеприведенного уравнения с учетом ненулевых начальных условий имеет вид

$$y = \left[(k_\partial - k_R) \cdot e^{-\frac{t}{T_\partial}} + k_R \right] \cdot x_0. \quad (55)$$

Решение уравнения (55) представлено на рис. 71.

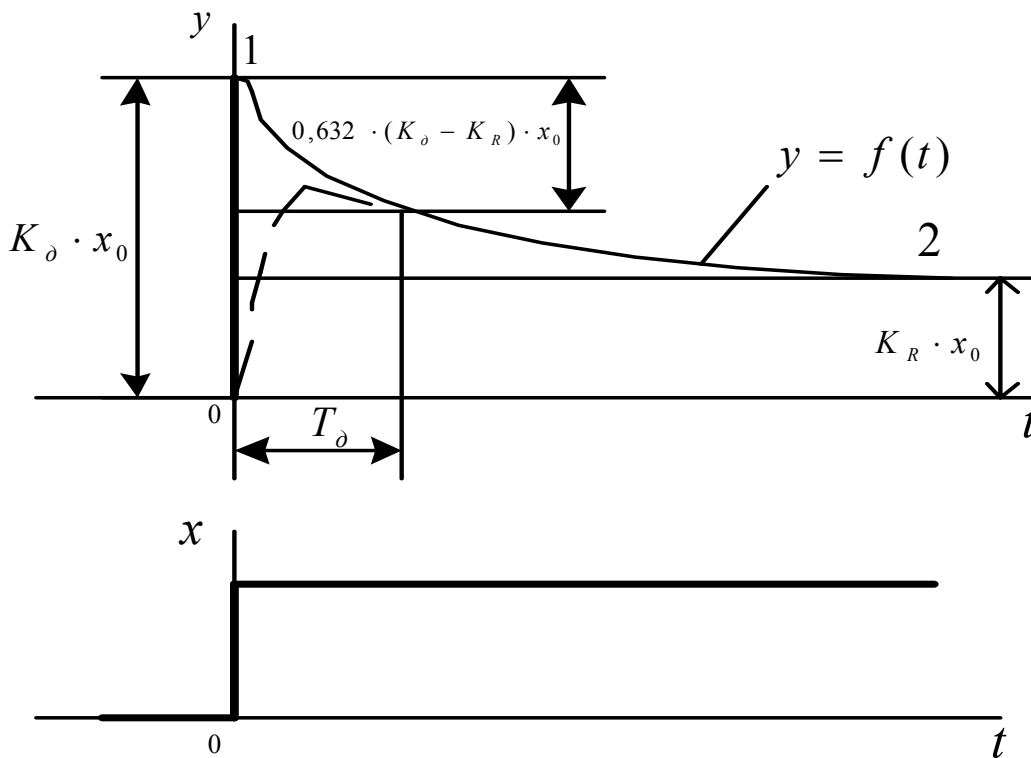


Рис. 71. Переходной процесс ПД-регулятора:
 --- - реальный регулятор; - - идеальный

Как видно из рис. 71, в начальный момент переходного процесса следует мгновенная реакция регулятора на изменение входной координаты (линия 0-1 при включенной обратной связи, $y = k_\delta \cdot x_0$). Участок 1-2 характеризует участок введения обратной связи со скоростью, пропорциональной времени дифференцирования T_δ . Реальный ПД-регулятор имеет инерционность, в результате чего переходный процесс максимально вписывается в кривую 0-1-2 (пунктирная линия). Выходной сигнал ПД-регулятора

$$y = k_R \cdot \left(x_0 + T_\delta \cdot \frac{dx}{dt} \right).$$

(56)

ПД-регуляторы с производной в цепи обратной связи (их иногда называют регуляторами с упреждением) получили

наибольшее применение в СЭУ. Значительно реже используются регуляторы с производной в прямой цепи. Редко используются в практике ИД-регуляторы (интегрально-дифференциальные).

§ 7. 6. Пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирование

Выходной сигнал ПИД-регулятора представляет собой сумму сигналов трех воздействий: пропорционального, интегрального и дифференциального

$$y = k_R \cdot (x_0 + T_D \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{1}{T_u} \cdot \int x \cdot dt). \quad (57)$$

Добавление к пропорциональному воздействию интегральной составляющей обеспечивает астатическую характеристику регулирования. Дифференциальная составляющая компенсирует ухудшение динамических свойств, вносимых интегральной составляющей и повышает быстродействие системы.

На рис. 72, а показано изменение выходного сигнала идеального ПИД-регулятора y , вызванное скачкообразным возмущением на входе. Начальный период переходного процесса определяется действием дифференциальной составляющей 1, выключающей, а затем постепенно вводящей отрицательную обратную связь. Далее начинает действовать интегральная составляющая 2, изменяющая выходной сигнал до тех пор, пока не исчезнет рассогласование между текущим и заданным значениями регулируемой величины.

На рис. 72, б представлен переходный процесс реального, обладающего инерционностью, регулятора.

Взаимодействие элементов ПИД-регулятора представлено на рис. 73.

Рассогласование $x - \xi$ на входе регулятора приводит к перемещению правого конца рычага, несущего заслонку 7 пневмоусилителя 4, и соответственному отклонению выходного сигнала y . При этом изменяется давление сжатого воздуха, поступающего через дроссели 12 и 9 в полости

сильфонов 8 и 11 (соответственно дифференциальной и интегральной составляющих).

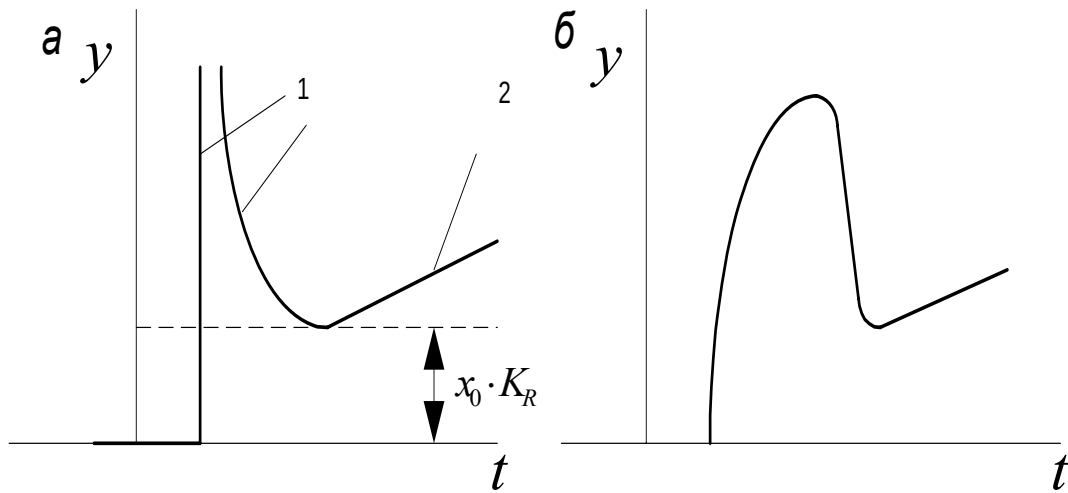


Рис. 72. Переходные процессы ПИД-регулятора при скачкообразном возмущении:
а – идеальный ПИД-регулятор; б – реальный

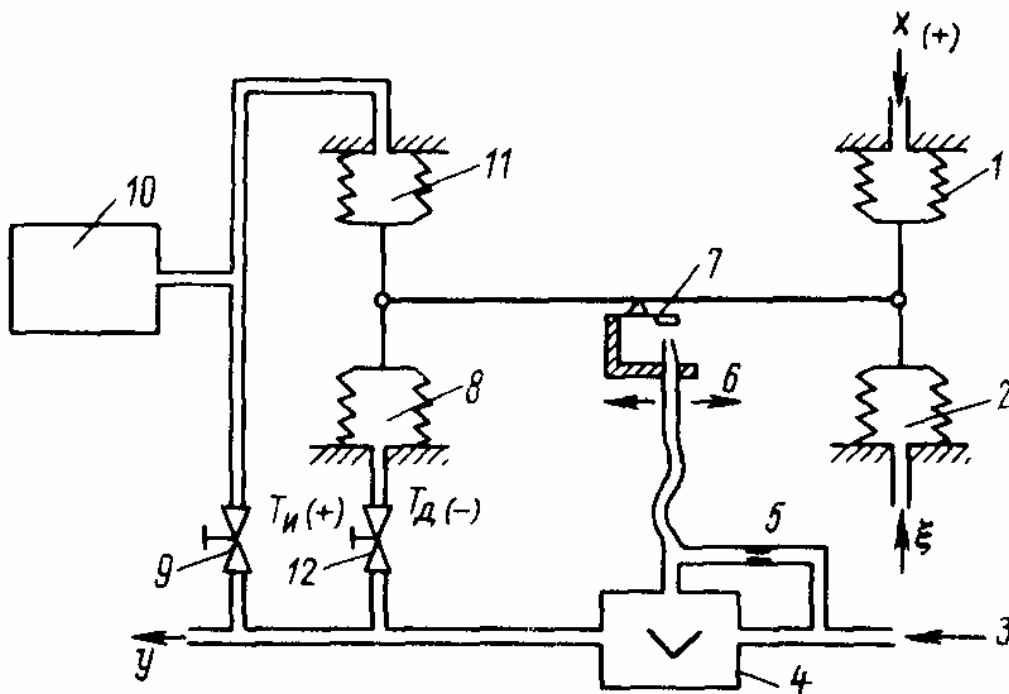


Рис. 73. Функциональная схема пневматического ПИД-регулятора

Выходной сигнал начинает изменяться во времени (см. рис. 72).

Знаки действия составляющих показаны на рис. 73. (величины их характеризуются значениями T_δ (минус) и T_u (плюс) по отношению к изменению входной величины x (плюс)).

При $T_\delta > T_u$ регулятор теряет устойчивость, так как давление в сильфоне интегральной составляющей 11 изменяется быстрее, чем в сильфоне дифференциальной составляющей 8.

Действительно, пусть Δx вызывает изменение выходного сигнала Δy . Так как $T_\delta > T_u$, то давление в сильфоне 11 будет расти быстрее, чем в сильфоне 8. Это вызовет дальнейшее увеличение сигнала y вместо его ограничения.

Такая схема будет устойчива только тогда, когда отрицательная связь будет преобладающей, т.е. $T_\delta < T_u$.

Рекомендуется принимать $\frac{T_\delta}{T_u} \leq 0,25$.

Наилучшее соотношение (по экспериментальным данным)

$$\frac{T_\delta}{T_u} = 0,15.$$

Передаточная функция ПИД-регулятора в соответствии с уравнением (57) имеет вид

$$W_{pid}(p) = k_R \left(1 + p \cdot T_\delta + \frac{1}{p \cdot T_u} \right). \quad (58)$$

ПИД - регуляторы получили достаточно широкое применение в судовой автоматике. Они реализуют полный закон регулирования.

При надлежащей настройке ПИД-регуляторы позволяют получать высокие показатели переходных процессов.

Глава 8. Микропроцессорные системы управления и комплексной автоматизации судов

Особая роль в автоматизации судовых технических средств (СТС) в последние десятилетия отводится компьютерным технологиям [1, 11]. Мини- и микроэлектронные вычислительные машины (ЭВМ) стали появляться на судах в конце 60-ых годов, они взяли на себя такие функции человека, как наблюдение (сбор информации), анализ увиденного (обработка и оценка результатов наблюдения), принятие решения и действие. Кроме того, обладая большими ресурсами памяти и оперируя многочисленными параметрами происходящих в СТС процессов, ЭВМ берут на себя функции безразборной диагностики и производство административно-хозяйственных расчетов, ведут бортовые журналы и контролируют погрузо-разгрузочные операции с оптимизацией распределения груза при обеспечении максимальной остойчивости [1].

Сегодня ЭВМ производятся не только как конечный продукт, но и в форме больших интегральных схем (БИС), микропроцессорных комплектов (МПК), БИС-запоминающих устройств, БИС - интерфейсов, интегральных схем аналого-цифровой и цифро-аналоговой техники и т.п. Все это и обусловило широкое применение ЭВМ в микропроцессорных системах управления (МПСУ).

Под МПСУ понимается комплекс аппаратурных и программных средств, который под воздействием оператора или управляющей программы управляет состоянием объекта или группы объектов.

Из структурных особенностей МПСУ следует отметить: развитую систему сопряжения с большим числом внешних устройств (датчиков, сигнализаторов, исполнительных устройств), использование каналов ввода-вывода информации и стандартного интерфейса, систему средств управления и отображения информации, обеспечение возможности прерывания работы, систему команд, ориентированную на выполнение управляющих алгоритмов, систему памяти в опе-

ративных запоминающих устройствах (ОЗУ), постоянные запоминающие устройства (ПЗУ), перепрограммируемые запоминающие устройства (ППЗУ) большой информационной емкости и быстродействия и т.п.

Задачи, решаемые МПСУ:

- контроль параметров и защита дизель-генератора при аварийных ситуациях;
- пуск и остановка дизеля при нормальных и аварийных ситуациях;
- синхронизация и распределение мощности между параллельно работающими агрегатами;
- пуск и остановка резервных дизель-генераторов в зависимости от загрузки работающих;
- управление балластом, в том числе управление клапанами и насосами, контроль уровня, температуры и давления в судовых системах;
- графическое отображение процессов в системах;
- пуск резервных насосов при понижении уровня или давления;
- расчеты по оптимизации движения судна и выбор режима работы главных дизелей;
- контроль параметров работы главной установки и вспомогательных механизмов;
- текущее безразборное диагностирование СТС и определение остаточного ресурса определяющих элементов, прогнозирование запасных деталей и сроков текущих ремонтных работ.

§ 8 .1. Понятия и терминология, общие требования к МПСУ

Под объектом управления (ОУ), как и в классической автоматике, понимают главный двигатель, дизель-генератор, компрессор, балластную и грузовую системы, все машинно-котельное отделение, процесс управления судном и т.д.

Совместно функционирующие ОУ и управляющая им МПСУ образуют автоматизированную систему управления (АСУ) или автоматизированный технологический комплекс.

Это аналогично САР. МПСУ должно получать информацию от источников, например, датчиков. Преобразование результатов решения задачи управления в непосредственное воздействие на объект осуществляют исполнительные устройства. Как правило, они не отделимы от объекта управления, поэтому их не включают в состав МПСУ. Они лишь являются «потребителями» ее выходной информации.

Вычислительные устройства (ВУ) обеспечивают переработку входных данных в управляющие воздействия на объект. Как правило, применяются информационно-вычислительные комплексы (ИВК).

Сложность задач по управлению объектом, недостаточность в некоторых случаях информации и ответственность принимаемых решений заставляет включать в контур управления оператора. Работая «параллельно» с ВУ, оператор должен иметь возможность вмешиваться в процесс управления. Для этого ему необходимо отслеживать в удобной для восприятия форме информацию (например, на экране дисплея) и вводить в систему управляющие воздействия (с помощью специальной клавиатуры и определенных управляющих команд), т.е. используя средства отображения информации (СОИ) и средства управления (СУ).

Микропроцессор (МП) представляет собой программно-управляемое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки, выполнен в виде одной или нескольких БИС с высокой степенью интеграции электронных элементов. При использовании МП их воспринимают как нечто цельное с внешними потребительскими свойствами, заложенными в его архитектуре.

При комплектовании микроЭВМ, предназначенных в качестве ИВК, широко используют следующие принципы: магистральность, модульность и микропрограммирование.

Магистральность предусматривает канальный характер связей блоков микроЭВМ. Все блоки и устройства подключаются к общей системе информационно-управляющих шин в виде унифицированного канала связи, используемого

для передачи информации между процессором, памятью, СОИ, СУ и периферийными устройствами. По единому унифицированному каналу связи передаются данные, адреса, команды, информация о состоянии периферийных устройств, сигналы управления. Передаваемая информация сопровождается адресом того блока или устройства, которому она предназначена, поэтому, несмотря на то, что она поступает на входы всех блоков машины, подключенных к единому каналу, воспринимается только адресуемым блоком.

Магистральность обеспечивает высокую гибкость микроЭВМ и позволяет наращивать управляющие и вычислительные мощности путем объединения нескольких машин или процессоров в единый ИВК.

Принцип модульности позволяет создавать микроЭВМ на основе ограниченного ряда микромодулей, отличающихся конструктивной законченностью, функциональной автономностью и структурной универсальностью.

Микропрограммирование позволяет управлять всей совокупностью элементарных действий (сдвиги, пересылки информации, логические поразрядные операции и т.д.) в отличие от аппаратной организации управления, которая имеет большее быстроедействие, но сужает возможности расширения репертуара команд, жестко закомутированных в управляющих схемах машины. Микропрограммирование позволяет учитывать конкретные особенности системы управления путем корректирования или замены рабочей программы.

МикроЭВМ четвертого поколения открывают широкие возможности для организации непосредственного цифрового управления, параметрического контроля, безразборной диагностики, прогнозирования состояния отдельных объектов, оптимизации работы судовых энергетических установок и обеспечения комплексной автоматизации.

Ресурсные характеристики современных управляющих микроЭВМ обеспечивают требования Регистра РФ и международной ассоциации классификационных обществ (МАКО). Так, например, межремонтный ресурс достигает

25000 часов, ежегодная наработка без подрегулировок и наладок – 5000 часов, выполняются требования по безотказности при длительном крене судна (до 22,5 °) и длительном дифференте (до 10°), а также при бортовой качке до 45° с периодом 5...17 с.

Значительно хуже дело обстоит со средствами так называемой периферийной автоматики (датчики, сигнализаторы), общее количество которых на современных судах достигает 500...700 единиц. До 75% датчиков имеют ресурс порядка 5000...7000 часов при фактической наработке 2000...3000 часов. Именно это обстоятельство сдерживает и ограничивает широкое применение микроЭВМ в эксплуатации.

§ 8. 2. Алгоритмы МПСУ

Алгоритмы сбора и первичной обработки информации могут быть циклическими и адресными.

При циклическом опросе производится (рис. 74):

- периодическое обращение к датчикам;
- сглаживание полученных текущих значений параметров;
- сравнение сглаженных значений с нормативными и аварийными уставками (верхняя и нижняя границы сравнения).

Для обнаружения и предотвращения ложного срабатывания системы при выходе какого-либо сигнала за пределы уставки из-за случайных помех производится текущее сглаживание текущих значений параметров:

$$y_i^{cp} = k(y_i^{cp})^n + (1 - k)y_i,$$

где y_i^{cp} - сглаженное значение i -го параметра;

k - коэффициент сглаживания ($0 < k < 1$);

$(y_i^{cp})^n$ - сглаженное значение i -го параметра в предшествующем цикле опроса;

y_i - текущее значение параметра.

В случае выхода параметры за нормальные уставки производится печать значения y_i^{cp} , его отклонения от нормы Δy_i , номера датчика i и текущего значения времени t . Если параметр выходит за аварийные значения уставки, то выдается сигнал оператору.

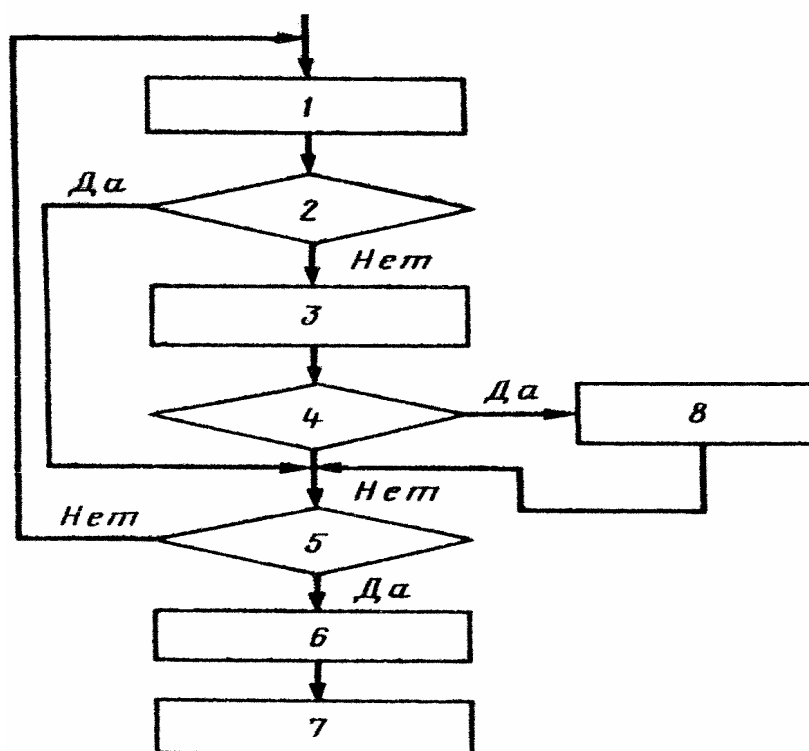


Рис. 74. Информационная модель сбора и первичной обработки информации:

1-опрос датчиков и сравнение его показаний с допустимыми уставками; 2- определение отклонений параметра; 3- запись информации в ОЗУ и сравнение с аварийными уставками; 4-превысил ли параметр аварийные пределы? 5- закончен ли опрос всех датчиков? 6-считывание информации из ячеек памяти ОЗУ; 7-переход к решению другой задачи; 8-выдача сигнала оператору

Алгоритм контроля предназначен для проверки исправности датчиков, сигнализаторов и их преобразователей. С этой целью выделяются массивы: -сглаженных значений на предыдущем цикле опроса; - верхних и нижних предельных уставок контролируемых параметров; -значений аварийных

параметров. Вводятся условные адреса для четырех ячеек памяти ОЗУ, предназначенных для записи y_i^{cp} , Δy_i , i , t . На печать при выбеге параметра выводится его значение (по i определяется номер датчика), при аварийном значении идет соответствующий сигнал оператору.

Алгоритмы управления подразделяются на два вида:

- информационная модель процесса управления (рис. 75);
- формирование управляющего воздействия (см. рис. 76).

Информационная модель процесса управления состоит из этапов подготовки данных (при этом формируются задающие воздействия g , устанавливаются текущие значения управляемых параметров y и определяется рассогласование между ними $x=g-y$), вычисления управляющего воздействия σ и вывода информации.

Управляющее воздействие в общем случае для линейных законов управления

$$\sigma(p) = W_{kopp}(p) \cdot \left[g(p) - \sum_{i=1}^N y_i(p) \right] + k_2 p g(p),$$

где $W_{kopp}(p)$ - передаточная функция корректирующего звена для шести наиболее распространенных законов управления:

$W_1 = k_1$ - пропорционального (П);

$W_2 = k_1(T_1 p + 1)/(T_2 p + 1)$ - интегрально-дифференциального (ИД);

$W_3 = k_1(T_1 p + 1)$ - пропорционально-дифференциального (ПД);

$W_4 = k_1/(T_2 p + 1)$ - апериодического;

$W_5 = k_1[1/(T_2 p) + 1]$ - пропорционально-интегрального (ПИ);

$W_6 = k_1[T_1 p + 1/(T_2 p) + 1]$ - пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД);

y_i - сигнал обратной связи (y_1 - основная управляемая переменная);

k_1, k_2 - коэффициенты пропорциональности.

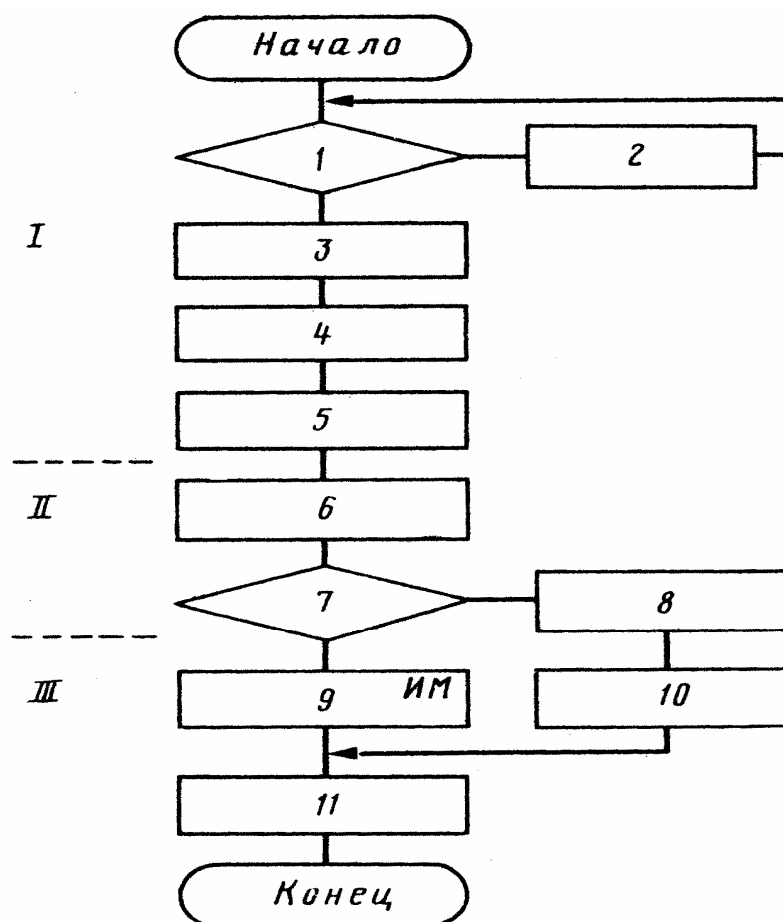


Рис. 75. Информационная модель процесса управления:

I – подготовка данных; II – вычисление управляющих воздействий; III – вывод информации;

1-выбор режима работы; 2-проверка управляющей вычислительной машины; 3-опрос задатчика g ; 4-определение текущего значения u ; 5-запуск таймера; 6-определение управляющего воздействия; 7-аварийная защита; 8-решение аварийной задачи; 9-выдача управляющего воздействия на исполнительный механизм; 10- выдача аварийного управляющего воздействия; 11-выдача информации на индикацию

Передаточные функции типовых звеньев судовой автоматики подробно представлены в гл. 5.

Формирование управляющего воздействия производится с целью улучшения динамических свойств системы управления и качества ее работы, для этого вводится со-

ставляющая сигнала управления, пропорциональная производной от задающего воздействия на объект (рис.76). Это позволяет скомпенсировать инерционность объекта управления.

В каждом такте работы системы МПСУ сигнал главной обратной связи « y_1 » и рассогласования « x » сравниваются с максимально допустимыми значениями, которые задаются перед началом работы системы. Если хотя бы один сигнал выходит за допустимые пределы, то выполняется: либо фиксация заданного положения с остановкой системы (на выход подается нулевое управляющее воздействие, а машина останавливается); либо фиксация заданного положения без остановки системы (на выход подается нулевое управляющее воздействие, машина продолжает обработку информации); либо отработка нулевого задающего воздействия, после чего машина останавливается.

Алгоритм управления запускается по сигналу от таймера, который позволяет стабилизировать период дискретности системы и увеличить точность вычисления производных.

При появлении неустойчивости МПСУ для обеспечения качественного управления может быть применена динамическая идентификация характеристик объекта с последующим обновлением по результатам этих исследований базы данных, используемой при формировании управляющих воздействий.

Алгоритмы оптимизации функционирования судовой силовой установки. Общая задача оптимизации функционирования объекта может быть сформулирована как задача отыскания экстремума некоторой целевой функции или функционала $extH(y)$ при некоторых ограничениях $Q(y)$. Универсальным алгоритмом, решающим эту задачу, является перебор и сравнение значений $F(y)$ в области θ , которая определяется ограничениями $Q(y)$.

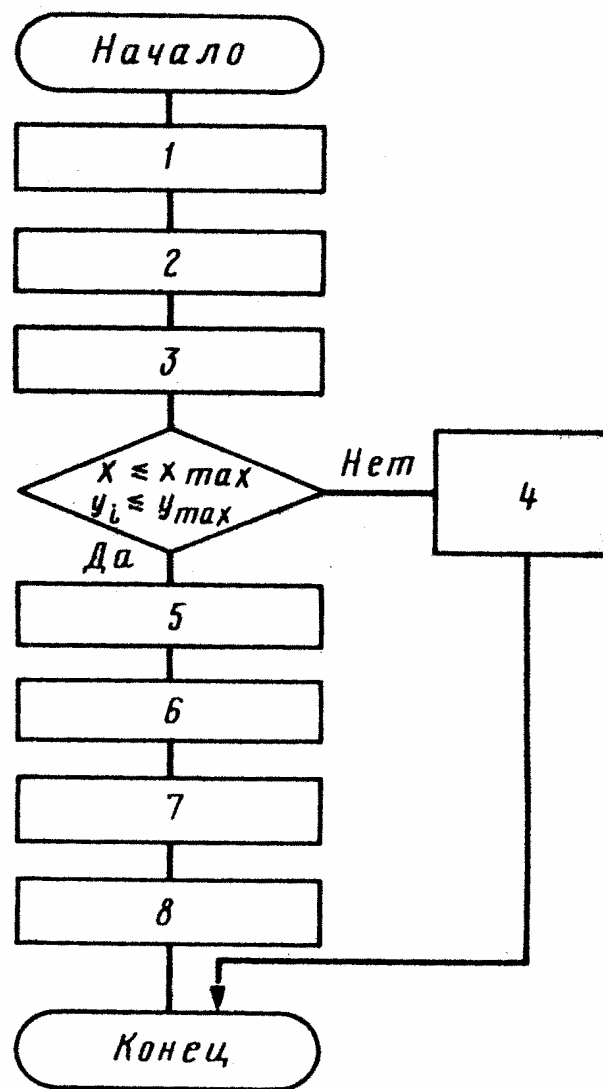


Рис. 76. Алгоритм формирования управляющего воздействия:

1-сигнал таймера; 2-определение $x(p)$; 3-выдача значений $x(p)$ на индикацию; 4-решение аварийной задачи; 5-определение $W_{\text{корр}}$; 6-определение g ; 7-определение управляющего воздействия σ ; 8-выдача информации

$$x(p) = g(p) - \sum_{i=1}^N y_i(p)$$

Однако для сложных объектов (например, двигатель внутреннего сгорания) значение экстремума оптимизируемой функции $F(y)$ дрейфует из-за изменения нагрузки, вида

топлива, внешних условий и т.п. Если закон дрейфа заранее не известен, то для организации управления применяются алгоритмы автоматического поиска экстремума.

Очевидно, что следует задать вид экстремума (максимум или минимум), определить движение к нему и далее обеспечивать движение системы к нему. Определив, что рабочая точка пришла в экстремум, система управления должна удерживать ее до тех пор, пока опять не изменятся условия. Таким образом, задача разбивается на две: -определение экстремальных значений; -организация движения к экстремуму.

Суть метода запоминания экстремума состоит в том, что при каждом определении F запоминается только то его значение, которое больше или меньше предшествующего в зависимости от настройки на максимум или минимум. Информационная модель, приведенная на рис.77, реализует этот метод для выпуклой формы экстремальной кривой. Если текущее значение F_n больше предыдущего F_{n-1} , то продолжается движение исполнительного механизма, перемещающего, например, рейку насоса высокого давления в одном направлении, а F_n записывается в ячейку памяти вместо F_{n-1} ; затем снова осуществляется сбор данных и вычисление F_{n+1} . Если F_n меньше F_{n-1} (система “перешла” точку максимума), то осуществляется реверс исполнительного механизма. Система возвращается к максимуму функции F , а затем выполняется запись в ячейку значения F_n .

Суть метода приращений состоит в том, что при перемещении рабочей точки по характеристике объекта определяется приращение функции, соответствующее определенному изменению входного сигнала. Если функция достигает экстремума, то при дальнейшем изменении входного сигнала приращение изменяет знак.

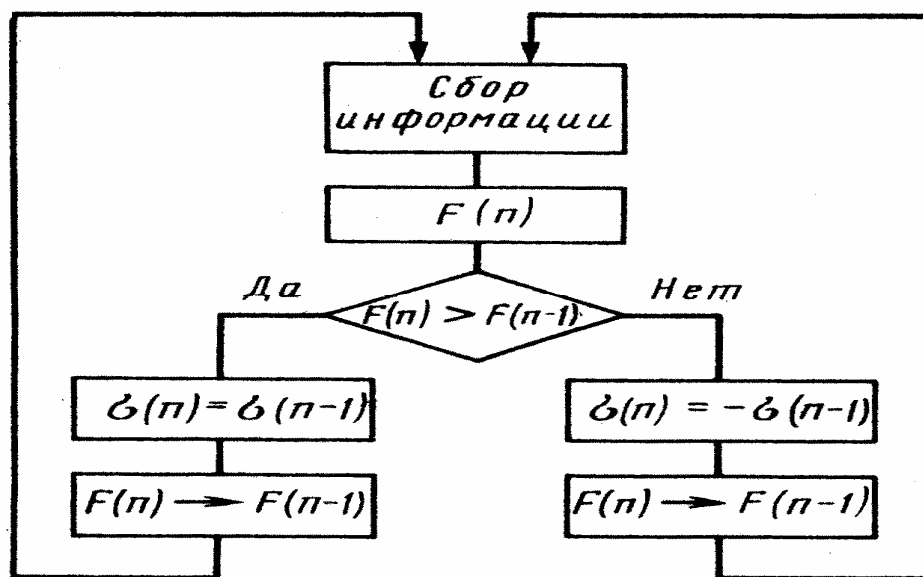


Рис. 77. Информационная модель метода запоминания экстремума

Алгоритмы диагностирования и прогнозирования.

Статистика аварий на автоматизированных судовых и промышленных установках утверждает, что 43% всех аварий происходят по вине обслуживающего персонала, 26% связаны с недостатками в конструкции и схемах, 14% - скрытые дефекты, 7% - износ, 10% приходятся на случайные причины. Диагностирование и прогнозирование состояния объектов управления и их систем позволяют обнаружить скрытые дефекты и назревающие отказы, в том числе связанные с ошибками обслуживающего персонала.

Основной частью информационной модели диагностирования и прогнозирования является математическая модель реального объекта, описывающая его функционирование в идеальном состоянии и при различных режимах его работы (рис.78).

Отклонения текущих важнейших параметров от их идеальных значений, определенных по математической модели при аналогичных реальности условиях работы, позволяют оценить снижение эффективности работы установки, ее износ, наличие отказов и т.п.

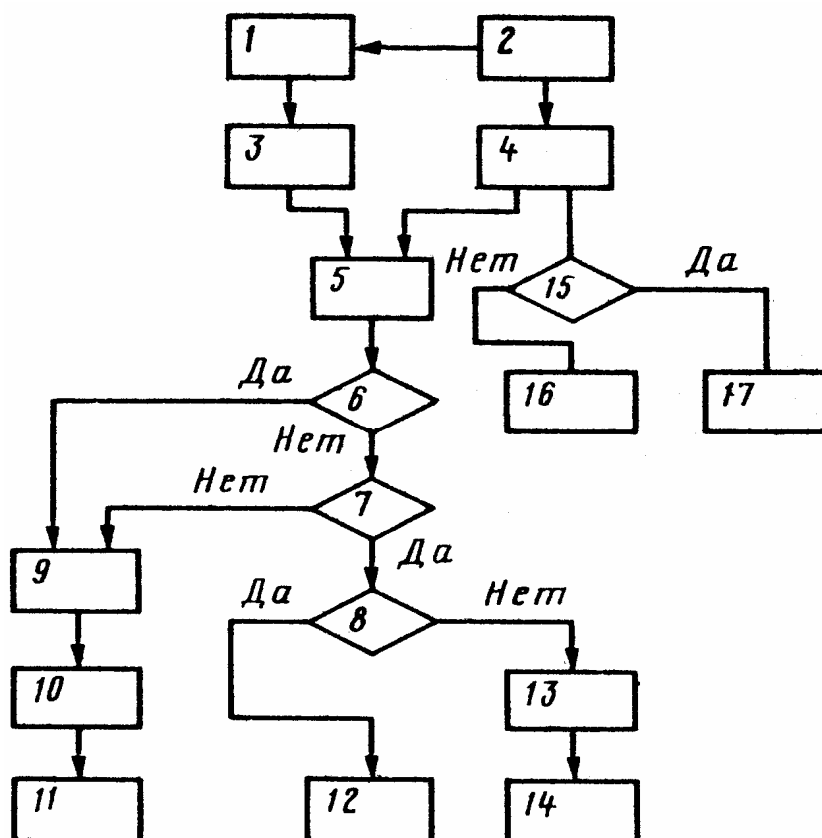


Рис. 78. Информационная модель организации
диагностического и прогностического контроля:

1-математическая модель идеального объекта; 2-реальный объект; 3-идеальные значения параметров, получаемые с помощью модели; 4-текущие значения параметров, получаемые с выхода реального объекта; 5-определение отклонения параметров; 6-определение наличия сигнала «вызов оператором прогностического контроля»; 7-сравнение текущих значений и отклонений параметров с аварийными уставками; 9-анализ текущих и предшествующих значений отклонений; 10-долго- и краткосрочные прогнозируемые периоды до ремонта оборудования; 11-выдача оператору данных о сроках проведения ремонта; 12-выдача оператору сигнала о необходимости проведения ремонта; 13-диагностика состояния объекта; 14-выдача оператору рекомендаций по устранению неполадок; 15-сравнение текущих значений параметров с допустимыми уставками; 16-выдача оператору сигнала об отсутствии отклонений параметров за допустимые уставки; 17-выдача оператору сигнала тревоги

Полученные значения отклонений сравниваются с их допустимыми и аварийными значениями и при определенных условиях оператору выдаются сигналы о необходимости проведения ремонта, снижению нагрузки или рекомендации по устранению неисправностей. Значения отклонений важнейших параметров, вычисленные в предшествующие моменты времени, используются для формирования долго- и краткосрочных прогнозов.

Алгоритмы логической обработки информации связаны с обработкой малоразрядной информации, например, с выводом из памяти текстовой информации и подготовкой ее для выдачи на быстродействующую печать или дисплей. Такая информации хранится в компактном (упакованном) виде.

Для организации вывода информации из памяти машины создается специальный алгоритм логической обработки, который обеспечивает распаковку данных и выдачу их на периферийные устройства.

§ 8. 3. Микропроцессорная система управления «Селма-2»

Широкое применение в эксплуатации при комплексной автоматизации судов получила система Селма-Марине, разработанная фирмой «АББ Стромберг Дрифес» (Финляндия) в 1983 г. Реализована эта МПСУ на микроЭВМ Селма-2 с процессором INTEL 8086, способным выполнять сложные задачи контроля и управления.

Блочно-модульный принцип построения системы в зависимости от принятого объема автоматизации позволяет использовать ее в качестве самостоятельной системы контроля за параметрами механизмов и оперативного управления электроприводами и системами либо как децентрализованную управляющую вычислительную сеть на базе микроЭВМ, предназначенную для комплексной автоматизации судна. Аппаратное и программное обеспечение позволяет выполнять:

- управление гребной установкой для винтов фиксированного и регулируемого шага (для дизель-электрической или дизельной силовой установки), главными дизелями

различных типов, электрическими приводами гребных винтов и подруливающих устройств, судовой электростанцией и системой распределения электроэнергии, резервными системами (в том числе простое резервирование насосов, двойное и тройное с комбинацией механических и электрических насосных пар), насосами и клапанами вспомогательных систем (кондиционирования воздуха, охлаждающей воды, топливной, осушительной, балластной и др.), жидким и газообразным грузом для танкеров;

- контроль параметров и групповую сигнализацию для машинного отделения согласно требованиям международной ассоциации квалификационных обществ (МАКО);
- регулирование влажности воздуха и вентиляции судов для перевозки специальных грузов;
- управление кранами;
- сопряжение с другими системами управления, построенными на базе микропроцессорной техники с помощью соответствующих интерфейсов;
- диагностирование СТС и прогнозирование отказов, определение остаточного ресурса.

Судовая МПСУ Селма-Марине состоит из периферийных устройств, диспетчерских станций и управляющих вычислительных машин (рис. 79).

Диспетчерские станции SV собирают информацию об объекте управления через управляющие вычислительные машины (УВМ) AS, связанные с объектом с помощью специальных устройств I/O, группируют на цветном дисплее VD и на принтере PR распечатки сообщений о сигнализации и выдают отчеты в сжатом и наглядном виде, а также передают с клавиатуры KB управляющие сигналы на УВМ.

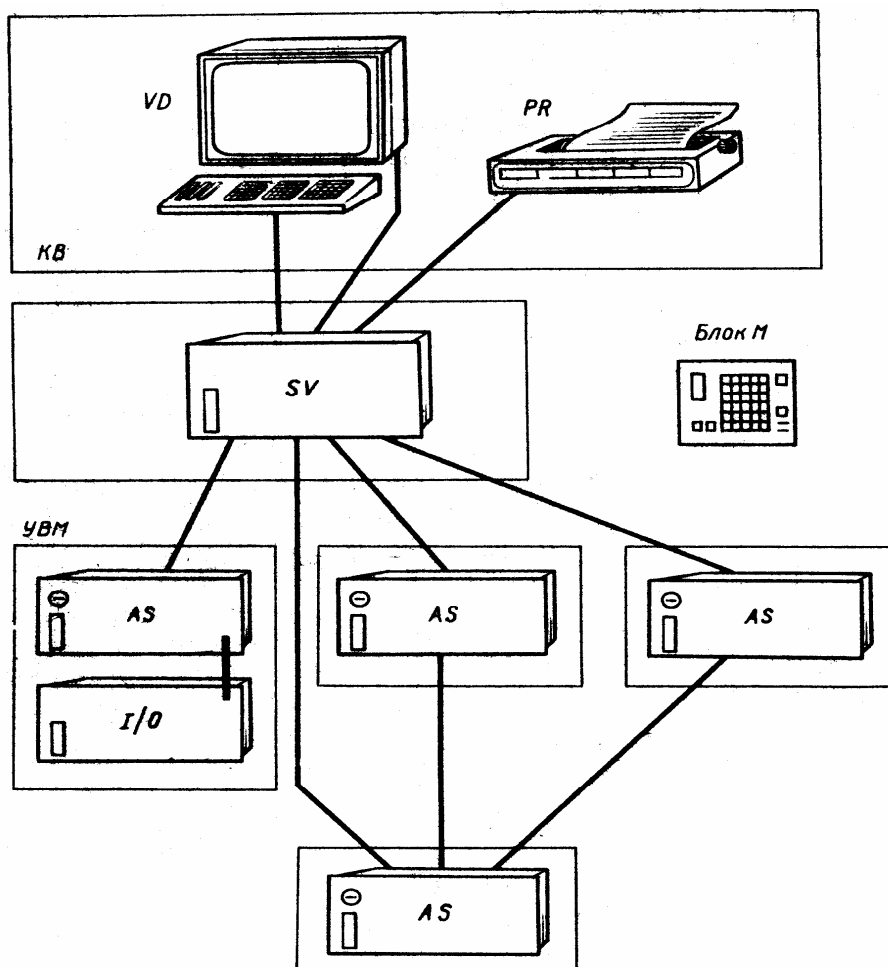


Рис. 79. Состав МПСУ Селма-Марине

УВМ выполняют самостоятельные функции:

- измерения;
- управление регуляторами;
- пуски и остановки двигателей и СТС;
- контроль СТС.

УВМ соединены каналами последовательно включенных интерфейсов с диспетчерскими станциями или другими УВМ. Они могут работать в качестве самостоятельных систем автоматизации. Управление при этом производится посредством блоков М.

Блок М представляет собой панель оператора с выключателями, нажимными кнопками и индикаторными лампами. Блок является микропроцессорным модулем и имеет

прямую последовательную связь с управляющей вычислительной машиной.

При необходимости с целью повышения надежности диспетчерские станции могут быть дублированы таким образом, что если одна из них не работает, то управление и контроль передается параллельно работающей станции. Предусмотрено прямое местное управление СТС.

Особенностью системы Селма является программирование с помощью так называемых функциональных блоков, представляющих собой несколько вариантов стандартизованных подпрограмм, выполняющих ту или иную функцию (сложение, преобразование входного сигнала, интегрирование, пуск односкоростного двигателя, П и ПИ-регулирование и т.п.). Разработка прикладных программ сводится к сопряжению между собой функциональных блоков и становится аналогичной процессу синтеза устройств на жесткой логике. При этом не требуется знание программирования и оператор при необходимости легко может изменить программу.

Для повышения надежности программного обеспечения (содержимое ОЗУ) имеются резервные копии прикладного программного обеспечения для УВМ и диспетчерской станции. Для этого к станциям подключен дисковод и терминал программирования.

Диспетчерская станция SV представлена на рис. 80.

Диспетчерская станция с помощью последовательного интерфейса обеспечивает связь оператора с УВМ. Все связи станции с процессом проходят через УВМ по каналам передачи информации. Диспетчерская станция SV собирает все данные об объектах через УВМ, группирует их на цветных дисплеях, печатающих устройствах сигнализации и выдачи ответов в сжатой форме и наглядном виде, передает заданные оператором с клавиатуры видеотерминалов сигналы управления на станции УВМ. Она управляет не более чем четырьмя видеотерминалами, четырьмя независимыми принтерами (для выдачи аварийных сигналов и отчетов) и 28 станциями УВМ.

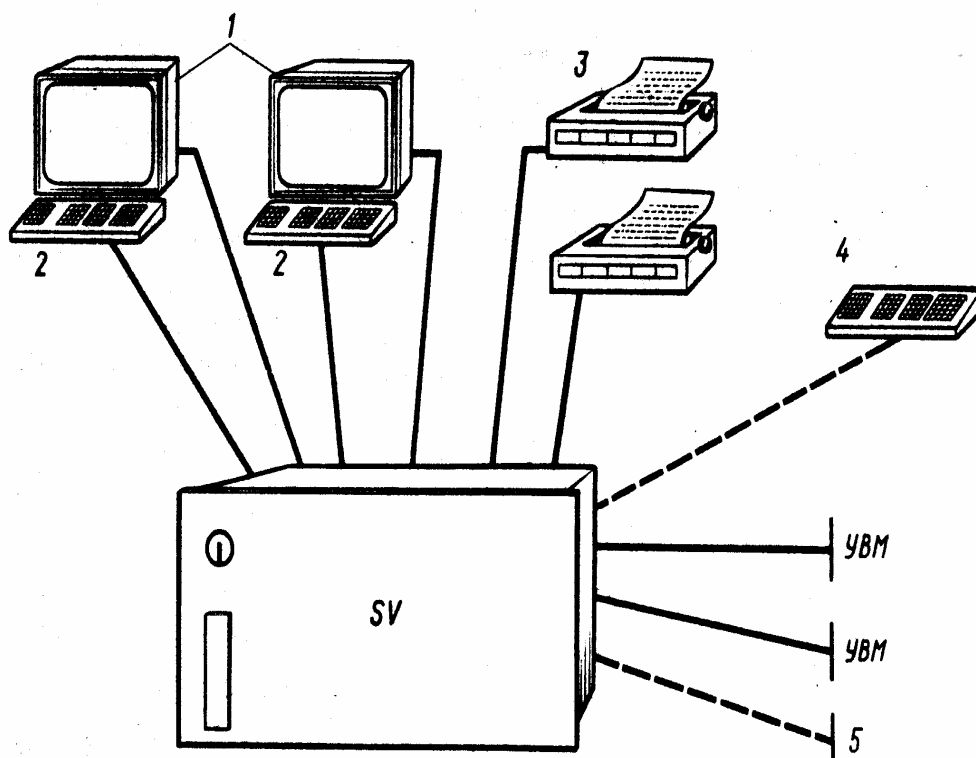


Рис. 80. Структурная схема диспетчерской станции SV:
 1-видеомониторы; 2-клавиатуры оперирования;
 3-печатающие устройства; 4-клавиатура программирования;
 5-дисковод

Для дублирования системы с целью повышения надежности или в том случае, когда не хватает требуемых периферийных устройств или станций AS, можно параллельно подключить идентичную станцию SV. Таким образом, можно удвоить число видеотерминалов и других периферийных устройств.

С клавиатуры оператора (рис. 81) с помощью видеокадра и курсора на дисплее выполняются все требуемые функции управления.

Скорость управления курсором можно увеличить дополнительным прибором – шаровым указателем TR.

Клавиатура для ручного управления разделена на четко обозначенные секторы:

- управление регуляторами;

- двигателями;
- выбора кадров (страниц) изображения;
- управления клапанами;
- курсором или печатающими машинками;
- дистанционным пуском и остановом;
- сигнализации;
- ввода цифровой информации.

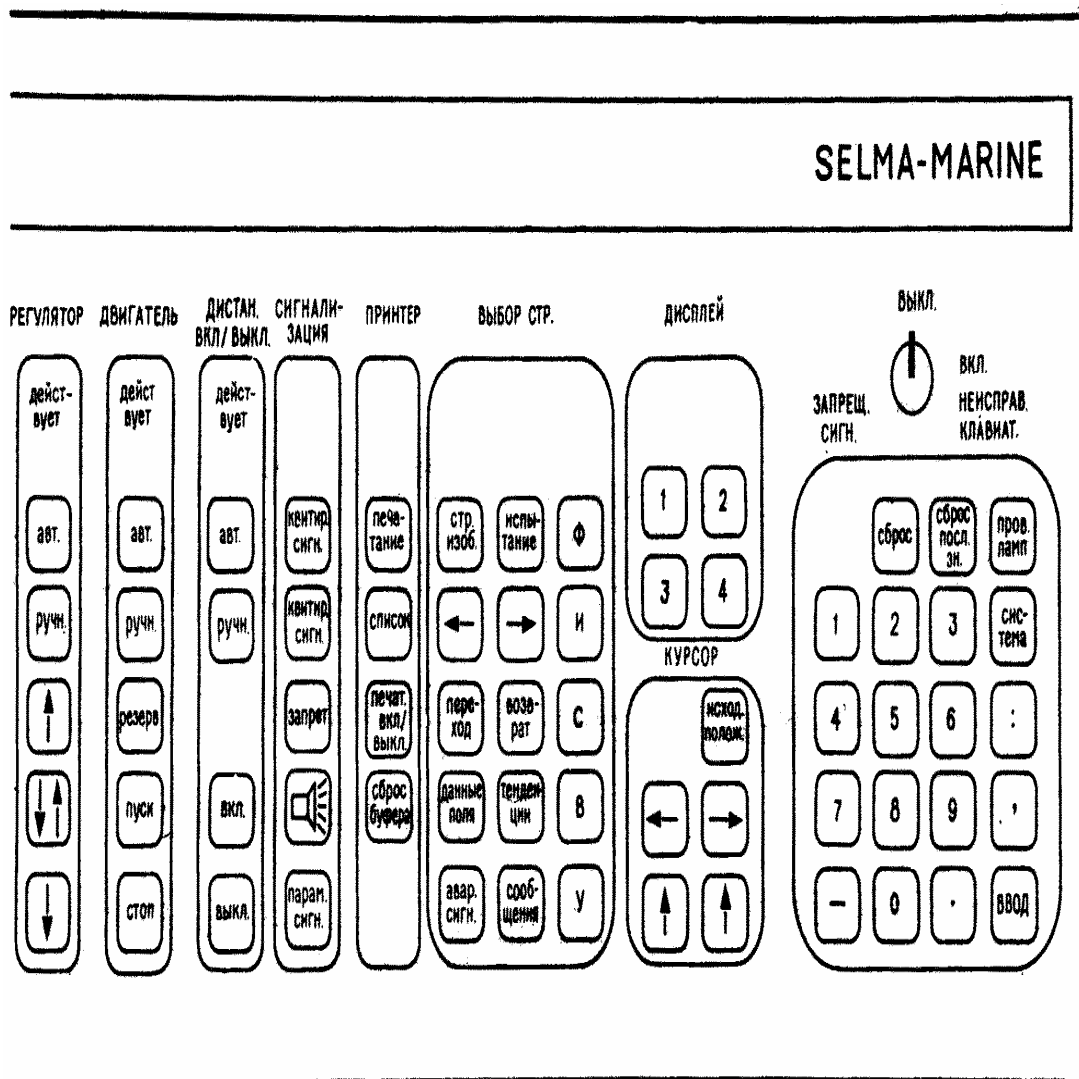


Рис. 81. Клавиатура оператора

Предусмотрена блокировка функции управления с помощью ключа. Информация на цветных дисплеях представляется в виде мнемосхем, гистограмм, прогнозируемых тенденций, сигнализаций и т.п. Оператор задает команды

управления с помощью клавиатуры и курсора. Обновление видеокadra происходит через 1 секунду.

Диспетчерская станция позволяет отобразить на экране дисплея 568 видеокadров:

- 255 с изображениями различных графиков;
- 4 страницы сигнализации (до 26 активных сигналов на каждой);
- 4 страницы для вывода сообщений (до 28 сообщений на каждой);
- 255 страниц для представления состояния параметров контрольных точек;
- 50 страниц для иллюстрации тенденции изменения контролируемых параметров, на одной странице до трех тенденций.

Ввод на дисплей любой страницы осуществляется путем воздействия на клавишу «выбор страниц». Страницы сигнализации и состояния вызываются клавишей «аварийные сигналы». Аварийный сигнал печатается принтером в тот момент, когда он поступает и когда восстанавливается нормальное состояние после квитирования (т.е. после подтверждения принятия оператором аварийной ситуации).

Система групповой сигнализации предполагает возможность круглосуточной работы МО без вахты. Когда в МО нет вахты, аварийные сигналы передаются в ходовую рубку, кают-компанию или в каюту вахтенного механика.

Управляющая вычислительная машина AS (рис. 82) осуществляет совместно с диспетчерской станцией функции контроля и управления СТС. УВМ является децентрализованной системой, действие которой основано на 16 разрядных микропроцессорах - INTEL 8086 и 8087. УВМ по имеющимся прикладным программам выполняют самостоятельные функции:

- измерение;
- управление цепями регулирования;
- пуск или останов двигателей;
- контроль, сигнализация и защита.

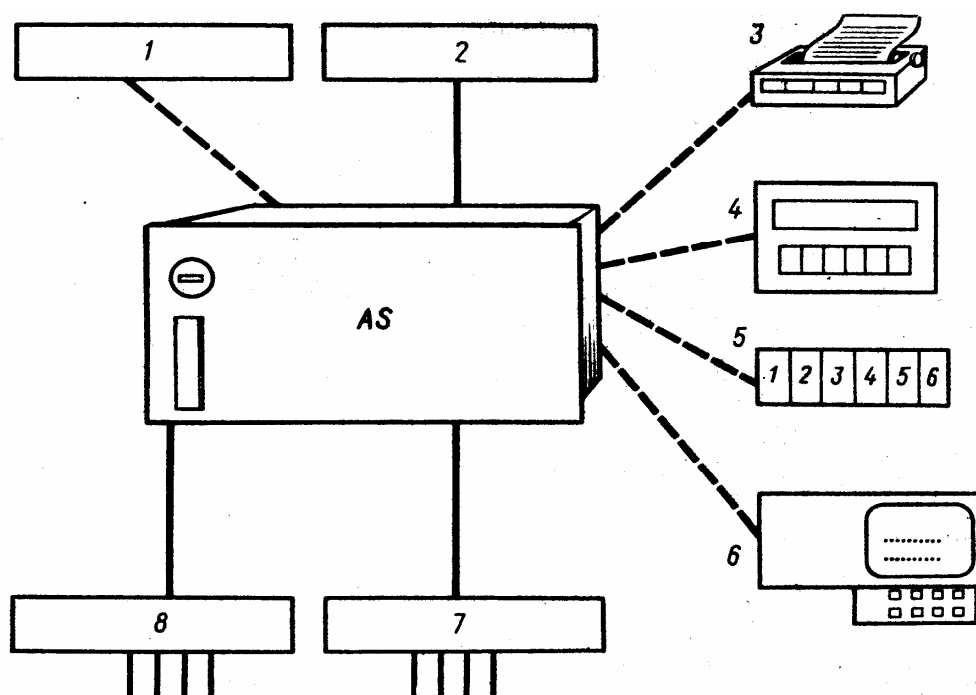


Рис. 82. Структурная схема управляющей
вычислительной машины AS:

1-дисковод; 2-диспетчерская станция; 3-принтер; 4-панель управления; 5-цифровая индикация; 6-терминал программирования; 7, 8 –выходы и входы

Через последовательные каналы передачи информации (последовательный интерфейс) УВМ сопряжены с диспетчерскими станциями и другими УВМ. Они могут работать без диспетчерских станций, т.е. в качестве самостоятельных автоматических систем.

При этом управление осуществляется с отдельных панелей управления (блоков М). К УВМ можно подключать дисковод, терминал для программирования, печатающее устройство и блоки цифровой индикации. В каркасе УВМ имеется 21 гнездо, в которые можно вставить основные платы и платы ввода-вывода. Если требуется увеличить количество плат, то подключают дополнительно один-два каркаса (рис.83, а).

Виды входных сигналов представлены на рис. 83, б.

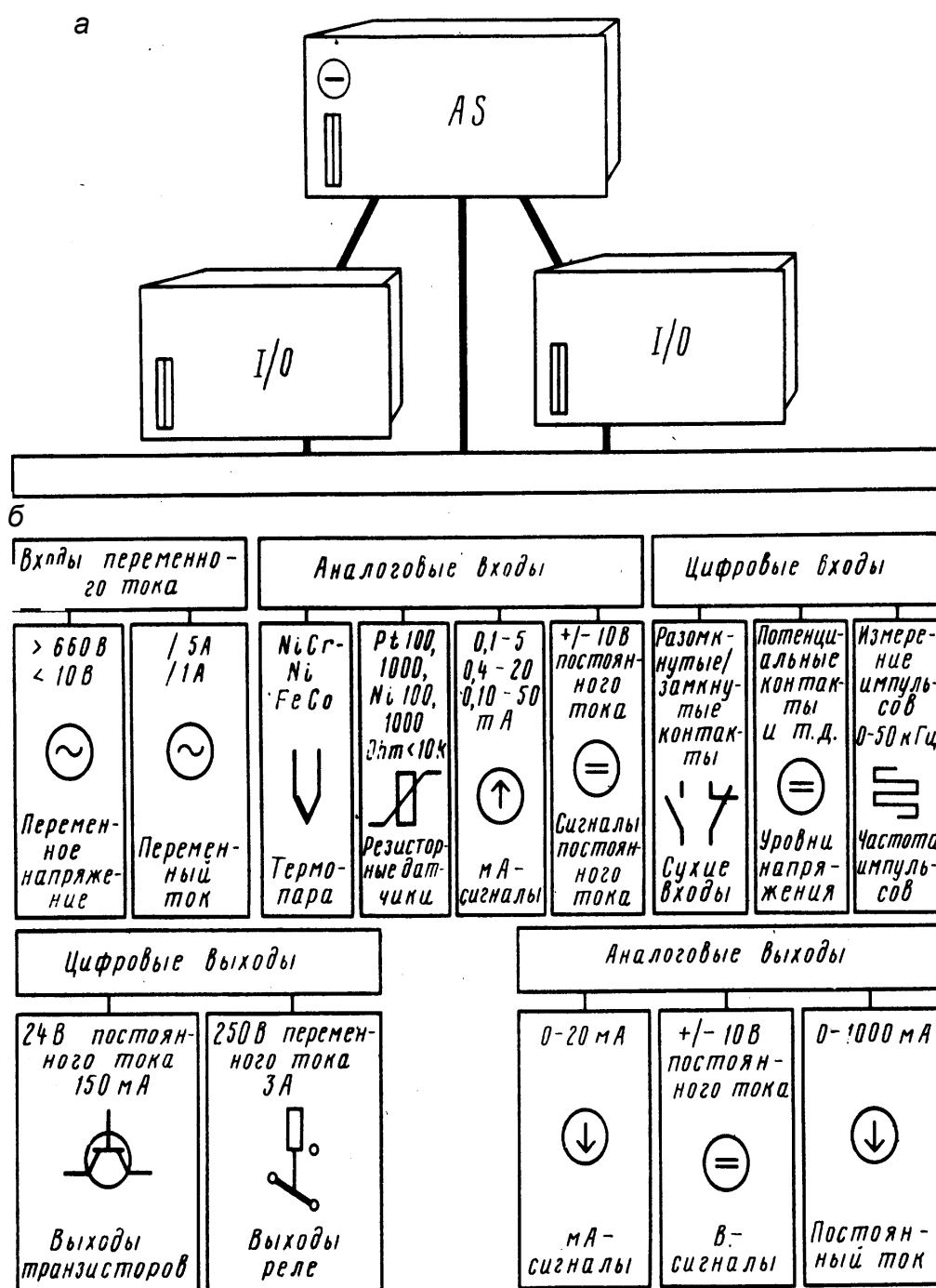


Рис. 83. Компоновочная схема УВМ:
 а - подключение дополнительных кардасов;
 б - виды входных сигналов в станцию

С целью повышения надежности работы в систему Селма встроена диагностическая система, которая контролирует неисправности ЗУ, отдельных плат, приборов и линий связи.

Сообщения о неисправностях выводятся на экран дисплея в виде специальных страниц диагностики и распечатываются на принтере.

Для отыскания более сложных неисправностей предусмотрена специальная диагностическая программа.

На рис. 84, 85 соответственно показаны типы цифровых и аналоговых входов и выходов и их количество для УВМ без расширенных возможностей за счет дополнительных каркасов.

Таким образом, возможны самые различные комбинации и комплектации системы «Селма-2» для решения конкретных задач по требованию заказчика под данную судовую энергетическую установку.

Возможности системы «Селма-2» также могут быть расширены за счет внесения в программные блоки других алгоритмов, условий, коэффициентов.

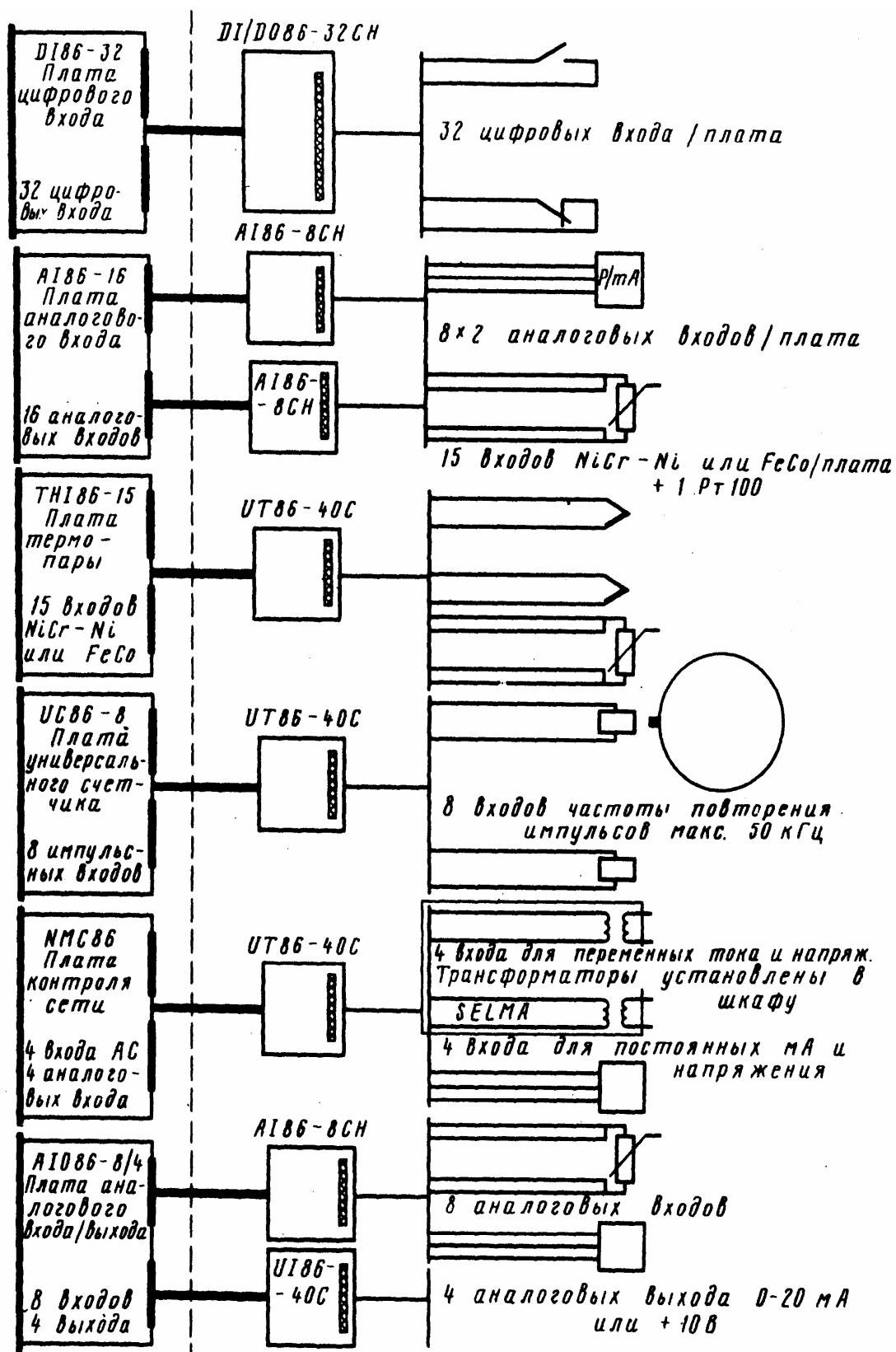


Рис. 84. Схема цифровых и аналоговых входов

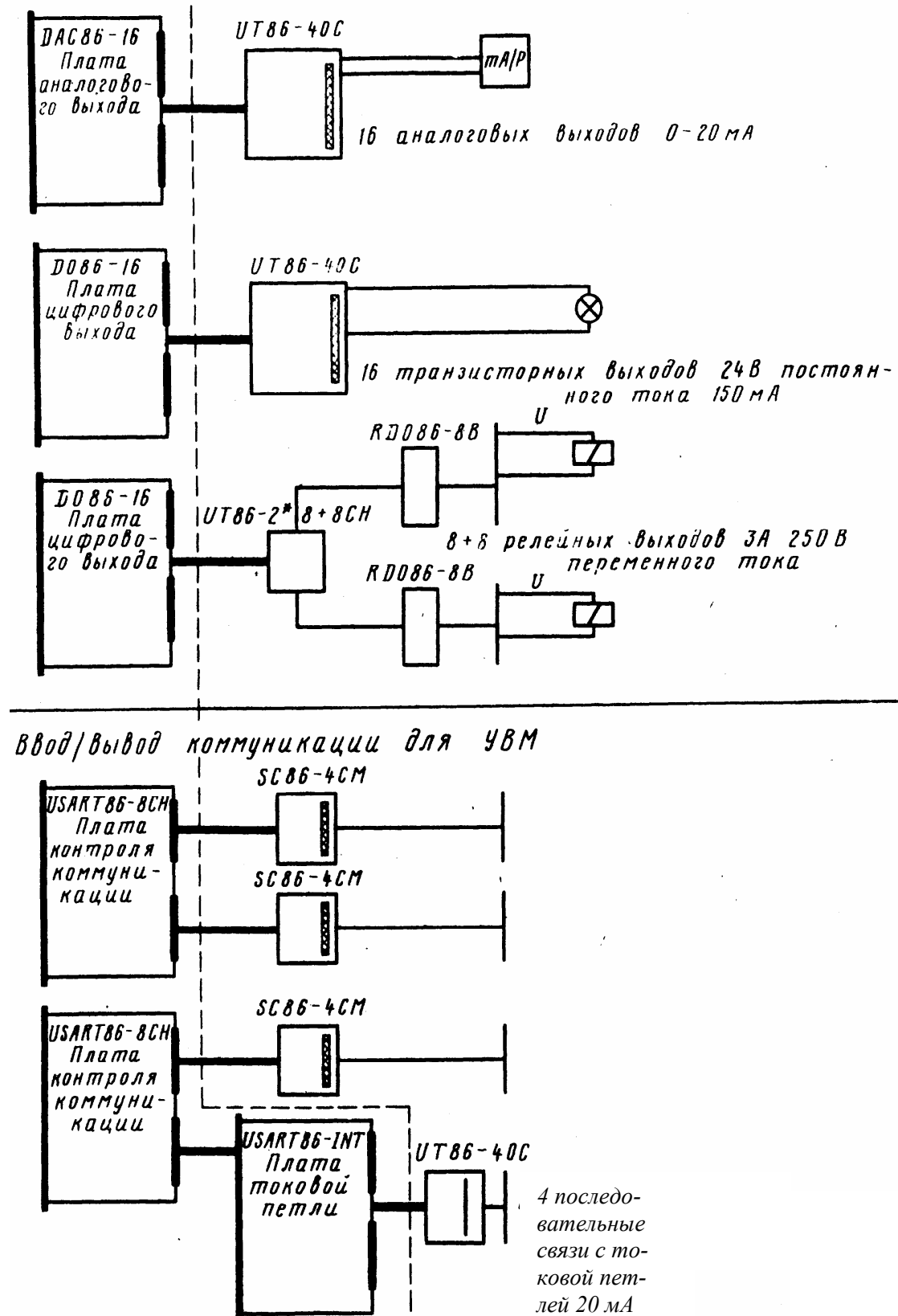


Рис. 85. Схема цифровых и аналоговых выходов

§ 8. 4. Другие микропроцессорные системы управления

МПСУ типа Даматик разработано в конце 70-х годов для автоматизации производственных процессов. Система получила широкое применение на флоте. Это комплекс, состоящий из следующих подсистем:

- контроля и аварийной сигнализации;
- регулирования температуры;
- управления главными и вспомогательными двигателями;
- распределения электроэнергии;
- управления балластно-осушительной системой судна.

МПСУ Даматик в полной аналогии с системой Селма-2 состоит из периферийных устройств, диспетчерских станций и станций управления процессами (УВМ), схема МПСУ Даматик представлена на рис. 86.

В шкафе системы в зависимости от необходимости может находиться несколько диспетчерских станций. Там же находятся процессовые станции. Архитектура системы Даматик обеспечивает полную конфигурационную универсальность как по аппаратной части, так и по математическому обеспечению.

Имеется подсистема контроля и сигнализации. МПСУ Даматик обрабатывает информацию, которая распределена по нескольким управляющим станциям, включенным параллельно друг другу. Все станции подключены к одной шине, хотя каждая станция выполняет свою задачу. При необходимости возможно каждой системой управлять с МПУ через соответствующую УВМ.

Связь оператора с УВМ осуществляется со стандартного пульта, цветных видеомониторов, устройства печати аварийных параметров. Система легко расширяется введением дополнительного аппаратного обеспечения. Система децентрализована, поэтому выход из строя одной из станций имеет ограниченное влияние на работу остальных станций.

Устройство самодиагностики постоянно проверяет работоспособность всей системы и выдает аварийный сигнал при выходе из строя какого-либо блока. Для обеспечения

безопасной работы при выходе из строя самого процессора предусмотрена возможность подключения резервного.

В целом идеология системы Даматик аналогична МПСУ Селма, но позволяет существенно расширить возможности управления судовыми объектами, так как при необходимости она может быть централизована.

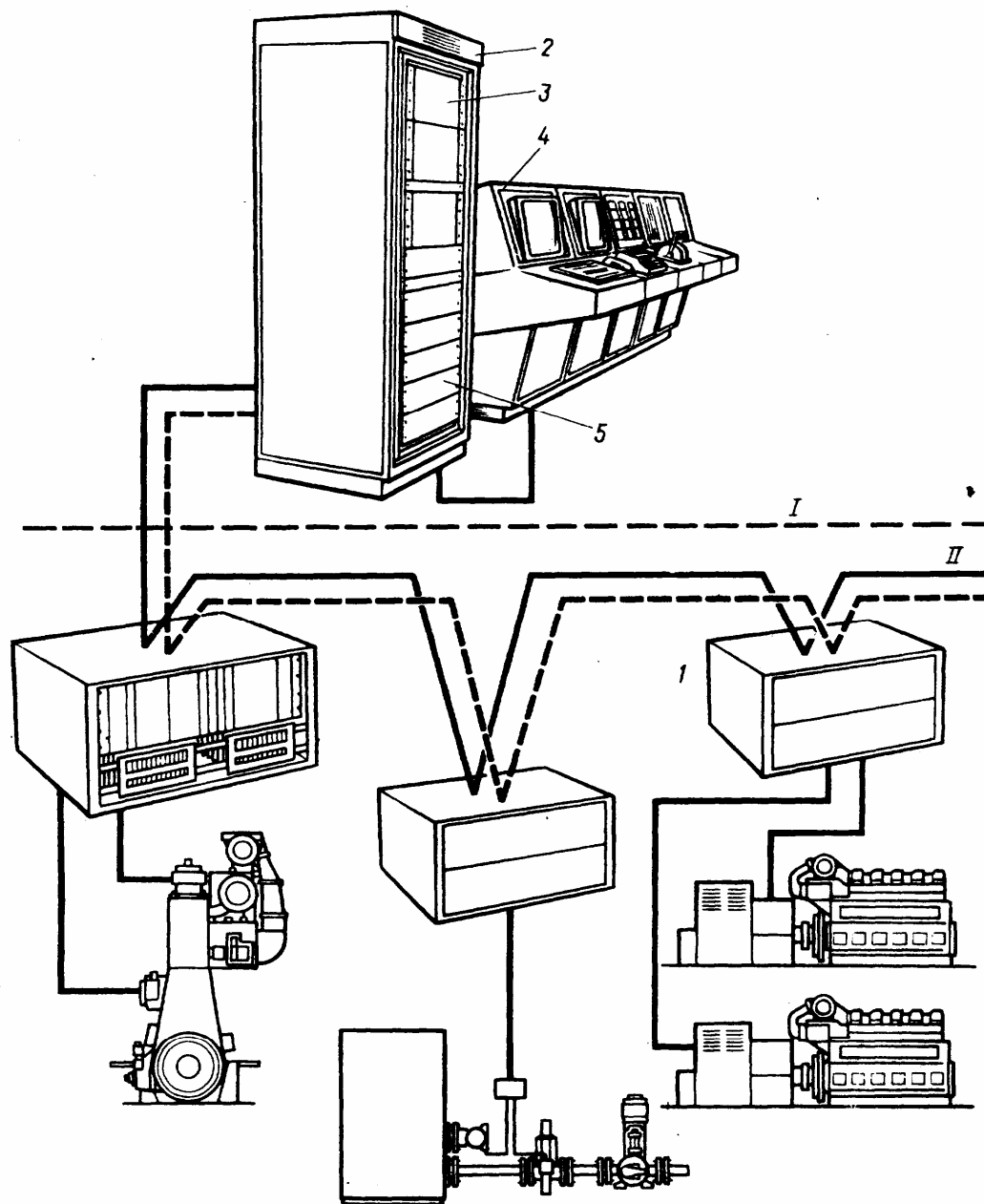


Рис. 86. Компоновочная схема МПСУ Даматик:

- 1-управляющие станции соответствующих систем с МПУ;
- 2-центральный шкаф системы; 3-диспетчерские станции;
- 4-пульт управления; 5-блок питания

МПСУ типа ASA-S предназначена для автоматизации судовой электростанции, состоит из двух микроЭВМ (GMR-обеспечивает работу генераторов, DMR - дизелей).

Система ASA-S выполняет следующие функции:

- Пуск дизель-генераторов. Предусматривается нормальный пуск (с предварительной смазкой в течение 5 с) и ускоренный (без предварительной смазки, применяемый только при обесточивании). Реализация программы пуска осуществляется по инициативе системы управления или по команде с пульта управления (только нормальный пуск). В случае неудачного пуска выполняется еще не более двух попыток пуска с интервалом 5 с. При достижении дизелем частоты начала работы на топливе предусматривается дополнительное возбуждение генератора.
- Остановка нормальная (с охлаждением агрегата на холостом ходу на номинальной частоте вращения в течение 90...120 с) и ускоренная (без охлаждения агрегата). Нормальная остановка осуществляется с разгрузкой агрегата до мощности порядка 0,1 от номинальной. Аварийная – без предварительной разгрузки. Реализация программы остановки осуществляется по инициативе системы управления при неисправностях, при недогрузке или по команде с пульта управления.
- Поддержание агрегата в готовности к немедленному пуску. Для этого предусматривается предварительная и дополнительная смазка дизелей. Предварительная смазка реализуется циклически (длительность 2 мин, интервал около 60 мин), дополнительная – при остановке (порядка 8 мин). Предусмотрено соединение систем охлаждения дизелей с целью поддержания агрегатов в горячем резерве. Может включаться электрический подогрев неработающих дизелей.
- Синхронизация и распределение нагрузки между параллельно работающими агрегатами, регулирование частоты. Наличие «Запроса синхронизации» контролируется через 0,8 с. Система управления реализует алгоритм адаптивной синхронизации, в процессе которой осущест-

вляется подгонка частоты ($\Delta f = 0,1 \dots 0,5 \text{ Гц}$) и контроль фазового сдвига до $0,7^\circ$. При распределении нагрузки ее неравномерность не превышает 10% номинальной мощности агрегатов.

- Подключение резервных агрегатов. Последовательность подключения-отключения агрегатов задается оператором. Требование подключения резервных агрегатов формируется с задержкой (20 с – при резервной мощности менее 20% номинальной, 6 с – при нагрузке на агрегате 105% и более номинальной мощности) и без задержки (при обесточивании, при неисправностях, в результате «опроса по мощности»). Требование отключения работающего агрегата формируется при соответствующих неисправностях без задержки времени, при низкой загрузке работающих дизель-генераторов (с задержкой 10 мин при нагрузке менее 30% номинальной мощности), при перегрузке (с задержкой 90 с при нагрузке более 105% номинальной мощности). Перед отключением агрегат разгружается, при этом сброс нагрузки осуществляется в две ступени с выдержками времени 45 и 54 с соответственно.
- Восстановление электроснабжения после обесточивания. Наличие признака обесточивания проверяется каждые 0,4 с. Программой вывода системы из обесточивания предполагаются остановка и блокировка всех работающих агрегатов, ускоренный пуск первого резервного агрегата и нормальный по необходимости пуск второго.
- Обеспечение необходимого резерва мощности перед пуском мощных потребителей. К мощным потребителям относятся электродвигатели с мощностью более 100 кВт. Немедленный запуск (деблокировка) разрешается при наличии резерва мощности не менее 150% от подключаемой нагрузки. Иначе пуск откладывается до ввода в работу необходимого количества агрегатов.
- Обнаружение неисправностей. Выполняется контроль:
 - 1) основных неисправностей путем циклического опроса параметров дизеля и генератора, перегрузки генерато-

ра, состояние выключателей и контакторов, выдается сигнализация о выходе параметров за установленные пределы;

- 2) времени прохождения команд управления, пуска-5 с, синхронизации-60 с, исполнения команды на остановку-30 с, достижения напряжения 80% номинального-10 с, блокирование датчика давления масла при пуске-20 с, интервала между очередными попытками пуска-5 с, прокачивания масла перед пуском-5 с и после остановки дизеля-8 мин.

Структурная схема связи системы ASA-S показана на рис. 87.

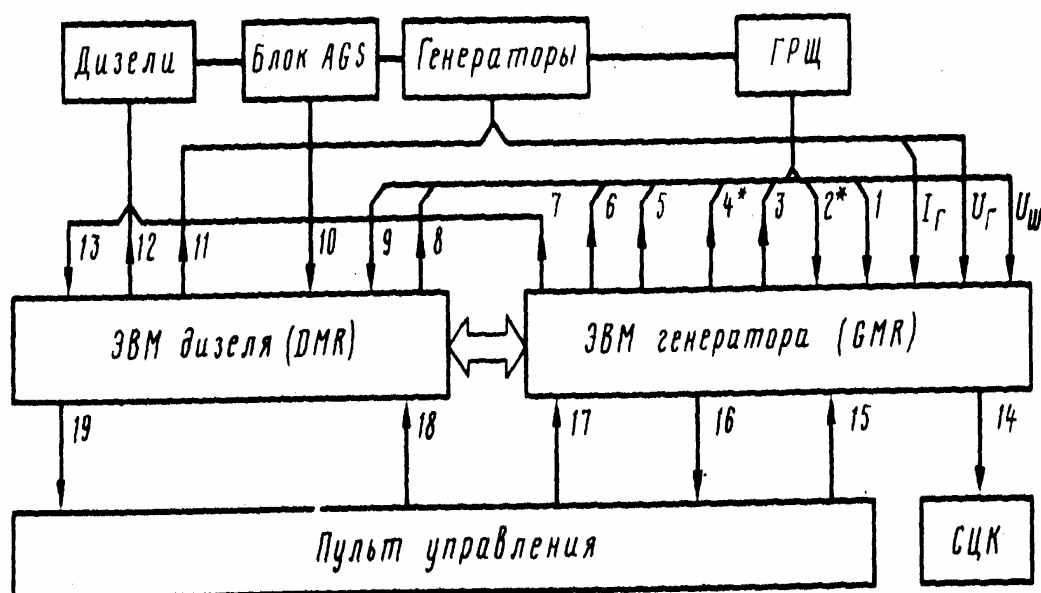


Рис. 87. Схема связей МПСУ ASA-S

На рис. 87 показаны следующие связи:

1, 3, 9- вспомогательный генератор включен (отключен); 2, 4-резервный ДГ включен (отключен); 5-нагрузки отключены; 6-разрешено включение нагрузок; 7-частота вращения увеличена (уменьшена); 8- ДГ отключен; 10-дизель работает на топливе; 11-дополнительное возбуждение включено; 12-системы смазывания и обогрева включены; 13-неисправности; 14-деблокирование есть (нет); 15-опрос нагрузки, индикация эффективной и резервной мощности; 16-

индикация недогрузки, программы синхронизации, сигнализация о неудачной синхронизации или общих неисправностях; 17- включена (отключена), регулирование частоты и распределение мощности; 18-коммутационное состояние ДГ; 19-неисправность, восстановление электроснабжения; СЦК-система централизованного контроля.

МПСУ типа Геапас фирмы ДМТ (Германия) представляет собой комплексную систему контроля и управления судовым оборудованием, они выпускаются в различной конфигурации согласно требованиям заказчика.

Система обеспечивает выполнение следующих функций: управления судовой электростанцией; контроль и управление генераторными агрегатами; обеспечение одиночной или параллельной работы; синхронизацию работой дизель-электрических агрегатов; распределение активной нагрузки; пуск и остановку резервных агрегатов; управление частотой вращения, синхронизацию валогенератора и ДГ; подключение питания с берега; обеспечение параллельной работы с вало- и утилизационным турбогенератором; защиту генератора и самоконтроль управления.

Система построена по децентрализованному принципу управления судовой электростанцией, т.е. для управления каждым генератором предусмотрен свой блок управления DSG 822 (для валогенератора, турбогенератора и дизеля). По желанию и по условиям блоки могут быть использованы в качестве локальных средств управления. Их монтируют либо непосредственно у ДГ, либо в панели ГРЩ, либо в консоли пульта управления в ЦПУ (рис. 88).

Система имеет широкий набор интерфейсных устройств, что позволяет создавать сложные системы разнообразного применения. Для управления параллельной работой вало- и дизель-генератора предусмотрена специальная панель

ВАТ 403. Для подключения берегового питания предусмотрена в блоке управления LSG 822 предусмотрена специальная панель.

Централизация управления и контроля требует соединения блоков управления отдельных агрегатов с системой контроля и управления типа Геамар-100 ISL.

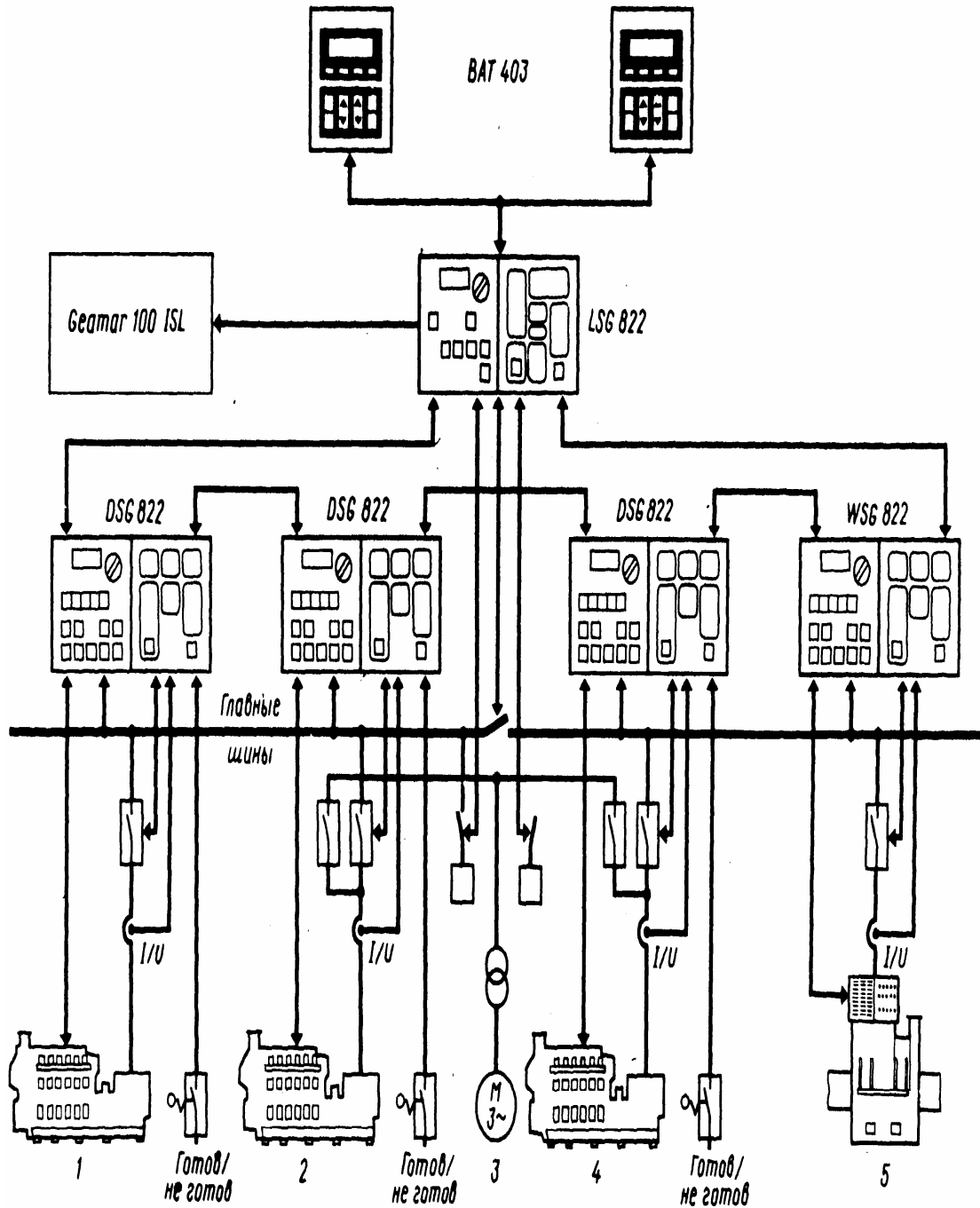


Рис. 88. Структурная схема системы Геопас

Состояние электроэнергетической системы изображается на дисплее центральной системы управления в виде цветных диаграмм и графиков, что позволяет оценить состояние системы и осуществить ручное вмешательство в процесс ее функционирования.

§ 8.5. Электронные регуляторы универсального применения

Для регулирования различных по роду процессов в судовых установках широкое применение получили так называемые электронные регуляторы. Они могут быть использованы для регулирования частоты вращения, температуры в системах охлаждения воды и масла двигателей и различных теплообменных аппаратов, давления воздуха и масла и т.п. Сам регулятор представляет унифицированный электронный блок, в который подается входная координата соответствующего регулируемого параметра в виде аналогового электрического сигнала, а на выходе формируется управляющий сигнал по полному закону регулирования, воздействующий на серводвигатель регулирующего органа. Имеется стабилизированный источник питания.

На рис. 89 представлена структурная схема электронного регулятора.

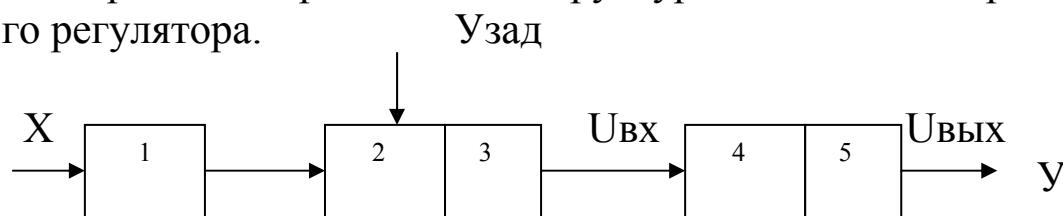


Рис. 89. Структурная схема электронного регулятора:
1-датчик-преобразователь; 2-измерительный блок; 3-блок-формирователь закона регулирования; 4-усилитель;
5-исполнительный механизм

Непосредственно на объекте устанавливаются блоки 1, 4, 5, а блоки 2 и 3 (собственно сам электронный регулятор) установлены вне объекта, в месте, где минимальны вредные воздействия на регулятор, например вибрации и температу-

ры. Свойства регулятора описываются зависимостью $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$.

Упрощенная принципиальная схема электронного регулятора представлена на рис. 90.

При регулировании частоты вращения в электронный регулятор вводится аналоговый электрический сигнал от генератора постоянного тока, приводимого в работу коленчатым валом. Входной сигнал составляет величину от 10 до 50 мА, поэтому на сопротивлении 100 Ом происходит падение напряжения 1...5 В. Питание электронного регулятора осуществляется от судовой сети с частотой тока 50...60 Гц при потребляемой мощности 14 ВА. Эталонное напряжение $U_{\text{эт}}$ подается от блока питания через выпрямитель и стабилизатор. Через потенциометр R_3 реализована функция задания режима.

В точках А и В возникает сигнал рассогласования, что является выходным сигналом измерителя $U_{\text{и}}$ (от 0 до 5 В). К т. А и В подключен показывающий прибор, по которому производится согласование схемы и уставки нуля (от 0 до 5 В). При выбранной уставке задания (R_3) на выходе измерителя напряжение пропорционально $U_{\text{вх}}$, таким образом, чувствительный элемент (измеритель вместе с датчиком) является статическим пропорциональным звеном.

Вход в блок-формирователь закона регулирования производится через реверсивный переключатель Π_1 , который изменяет знак сигнала $U_{\text{и}}$, таким образом, что электронный регулятор можно ставить как на стороне подвода энергии, так и на стороне отвода ее.

Для получения желаемого закона регулирования предусмотрена параллельно основной дифференцирующая цепь, а также цепь обратных связей как ЖОС, так и ГОС.

Изодромная связь (ГОС) вводит в закон регулирования интегрирующую составляющую, т.е. РС – цепочку.

Цепь дифференцирования – $C1-R_6-R_4$. Потенциометр R_6 служит для настройки постоянной времени дифференцирования и соотношения между величинами основного (пропорционального) сигнала и сигнала дифференцирования.

Диоды D_1 и D_2 (стабилитроны) выполняют роль пороговых ограничителей сигнала на вход первого усилителя.

ЖОС состоит из цепочки R_8 и R_9 . Изменением R_8 настраивают коэффициент статической передачи $K_{жос}$ и, следовательно, коэффициент усиления регулятора K_R .

ГОС состоит из цепочки R_8 - C_3 . Самостоятельно ГОС не настраивается. Для введения в закон регулирования настраиваемой ГОС убирают перемычку КД и при этом включается цепочка C_2 - R_7 (регулировка с помощью R_7).

На выходе регулятора установлен переключатель Π_2 , выполняющий следующие функции:

- «автоматическое регулирование» - сервомотор привода рейки ТНВД управляется регулятором;
- «ручное управление» - сервомотор управляется сигналом ручного задатчика R_{10} ;
- «баланс» - согласуется $U_{вых}$ с выходным сигналом ручного задатчика U_p .

Питание усилителей, модуляторов, демодуляторов, частотных генераторов (на схеме не показано) осуществляется от двух трансформаторов через выпрямитель и стабилизаторы напряжения.

Достоинство электронных регуляторов заключается в следующем:

- они универсальны, могут быть использованы для автоматического регулирования частоты вращения, температуры, давления и т.п.;
- гибки и просты в осуществлении связей между элементами, взаимозаменяемы;
- легкость суммирования сигналов позволяет осуществить П, И, ПИ, ПИД- законы регулирования;
- малые размеры дают возможность размещения их на любом расстоянии от объекта;
- возможно решение вопроса замены благодаря унификации регуляторов.

Недостатки электронных регуляторов связаны с показателями надежности (они уступают традиционным приборам).

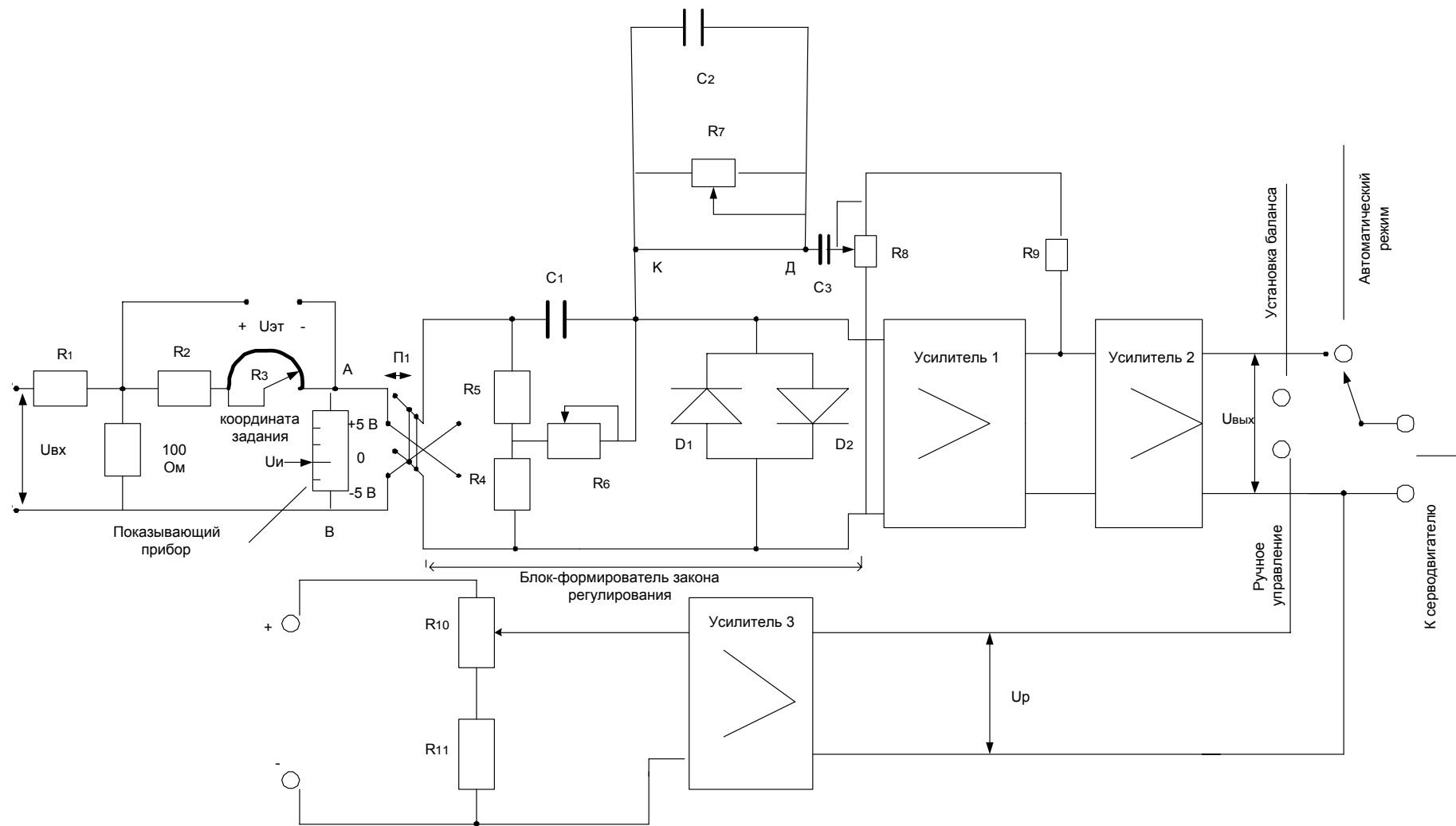


Рис. 90. Упрощенная принципиальная схема электронного регулятора

Глава 9. Постановка задачи оптимального управления судовыми техническими средствами

§ 9.1. Общее представление о процессах управления

Главная задача автоматизации судов – увеличение производительности труда судового экипажа при одновременном повышении безопасности эксплуатации. Системы автоматизированного управления СЭУ построены по принципу 3-х ступенчатой иерархической структуры: ходовая рубка – ЦПУ – местные посты управления. Для контроля функционирования СТС используются системы централизованного контроля. Управление на дистанции главными и вспомогательными двигателями, а также вспомогательными механизмами и судовыми системами обеспечивается соответствующими системами ДАУ.

Управление СЭУ состоит из определенных операций по изменению режимов работы систем и механизмов.

Алгоритм функционирования автоматической системы управления представляет собой точное предписание, определяющее процесс преобразования исходной информации, поступающей от датчиков или с пульта управления в управляющее воздействие на объекты управления.

Как правило, процессы регулирования САР описывают с помощью дифференциальных уравнений, а процессы управления – с помощью уравнений алгебры Буля (логических уравнений). Сам процесс математического описания поведения системы управления называется алгоритмизацией [11, 12].

Принято представлять весь процесс управления в виде отдельных элементарных операций (A_i – математических операторов), которые записываются в строку и нумеруются слева направо в порядке их выполнения. Если естественный ход зависит от получаемой информации, то после оператора ставится логическое условие P_i , которое может принимать два значения: 1- при его выполнении; 0 – если оно не вы-

полняется. В первом случае происходит переход к следующему оператору, во втором – к тому оператору, на который указывает стрелка $\overset{s}{\uparrow}$ с его порядковым номером, у оператора, которому передается управление, также ставится стрелка $\overset{i}{\downarrow}$ с номером того логического условия, от которого произошел переход. Запись алгоритма имеет следующий вид:

$$A_1 A_2 \dots A_{i-1} P_i \overset{s}{\uparrow} A_{i+1} \dots A_{s-1} \overset{s}{\downarrow} A_s A_{s+1} \dots$$

Алгоритм читается так: выполнить оператор A_1 , затем A_2 и далее до A_{i-1} , проверить полученный результат по условию P_i . Если $P_i=1$, то перейти к реализации следующего оператора A_{i+1} , иначе (при $P_i=0$) выполнить оператор A_s и A_{s+1} .

Для использования математического аппарата логических схем алгоритмов (ЛСА) функционирования СЭУ вводятся следующие обозначения входных и выходных данных, операторов и логических условий:

S_n^l и S_k^l - операторы начала и конца процесса управления ($l=1, 2, 3 \dots n$ – индексы номера алгоритма в общей схеме управления);

$A_i[f(x_1, x_2, \dots, x_n)]$ - оператор арифметических и логических вычислений (здесь $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - расчетная зависимость, x - аргумент, принимающий различные значения для непрерывных и дискретных функций);

$B_i[T_{nk}(\theta); P_{nk}(y); \dots]$ - оператор ввода информации от датчиков (здесь T и P – вид датчиков, например, температуры и давления), n - номер датчика, k - вид двигателя, системы, механизма, на котором установлен датчик, $(\theta), (y)$ - текущие значения параметров;

$C_i[F_i \approx \alpha \cdot (nB_{nk} \wedge \dots \vee R_{nk})]$ - оператор выдачи управляющих воздействий на исполнительные органы (здесь F_i - двоичная функция, определяющая состояние управляющего воздействия по поступающим сигналам). Адрес исполнительного органа обозначают тремя последовательными знаками: $B, C, \dots$ - тип исполнительного органа (например, клапан, система

сигнализации); n - номер исполнительного органа; k - вид двигателя, системы, механизма, в которых установлен исполнительный орган. Перед адресом указывается род привода (э-электрический, п-пневматический). Для обозначения открытия (закрытия) исполнительного органа используют знаки $\alpha : (\beta :)$;

$Z_i(f_i \rightarrow < a >)$ - оператор запоминания промежуточных результатов;

$M_i(\delta : \mathcal{G}_i^k \neq 1)$ - оператор воздействия на средства представления информации, например, “сигнализировать, что i - клапан k - системы не открылся”;

$Я_i$ - условный останов (пауза).

Логические условия:

$P_i(f_i \bullet a)$ - проверка результатов выполнения оператора (здесь f_i - результат расчета, логическое заключение; $\bullet$ - знаки условия: $<$, $>$, $=$ и т.д.; a - постоянная величина, равная 1 или 0);

$q(\Delta t \geq t_{зад})$ - контроль времени (учет реального масштаба времени).

Алгоритм функционирования можно представить в виде граф-схемы, если принять следующую интерпретацию его функциональных элементов. Конечное множество преобразователей $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ соответствует действию при управлении (управляющие воздействия, логические заключения, вычисления, сигналы оповещения) и обозначается в виде прямоугольников, внутри которых записаны операторы. Начало и конец алгоритма условно обозначаются овалами.

Пример определения коэффициента полезного действия компрессора газотурбинного двигателя с последующей оценкой его технического состояния приведен на рис. 91.

Конечное множество распознавателей $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ определяет направление следования процесса управления и обозначается ромбическими фигурами, внутри которых записаны логические условия. От преобразователей отходит

стрелка к следующему элементу граф-схемы, от распознавателей – две стрелки, соответствующие выполнению «Да» и невыполнению «Нет» логического условия.

Алгоритм предусматривает следующие операции:

1. Определение с помощью первичных преобразователей информации текущих значений давлений (p_1, p_2) и температур (T_1, T_2) воздуха до и после компрессора и переход к п. 2.
2. Определение суммарных значений отдельных параметров по десяти измерениям ($n=10$) и переход к п. 3.
3. Проверка окончания числа измерений: если $n=10$, то переход к п. 4; если $n<10$, то при истечении отведенного для измерений времени ($\Delta t = \Delta t_{зад}$) переход к п. 1 для повторного измерения параметров.
4. Расчет средних значений измеренных параметров и переход к п. 5.
5. Вычисление степени сжатия воздуха π^* и переход к п. 6.
6. Определение удельной работы сжатия в компрессоре и переход п. 7.
7. Вычисление КПД компрессора и переход к п. 8.
8. Проверка значений КПД компрессора: если расчетное значение больше или равно эталонному, то проверка заканчивается; если $\eta < \eta_{эт}$, то осуществляется переход к п. 9.
9. Оповещение обслуживающего персонала о снижении КПД путем включения сигнализации и регистрации результатов расчета.

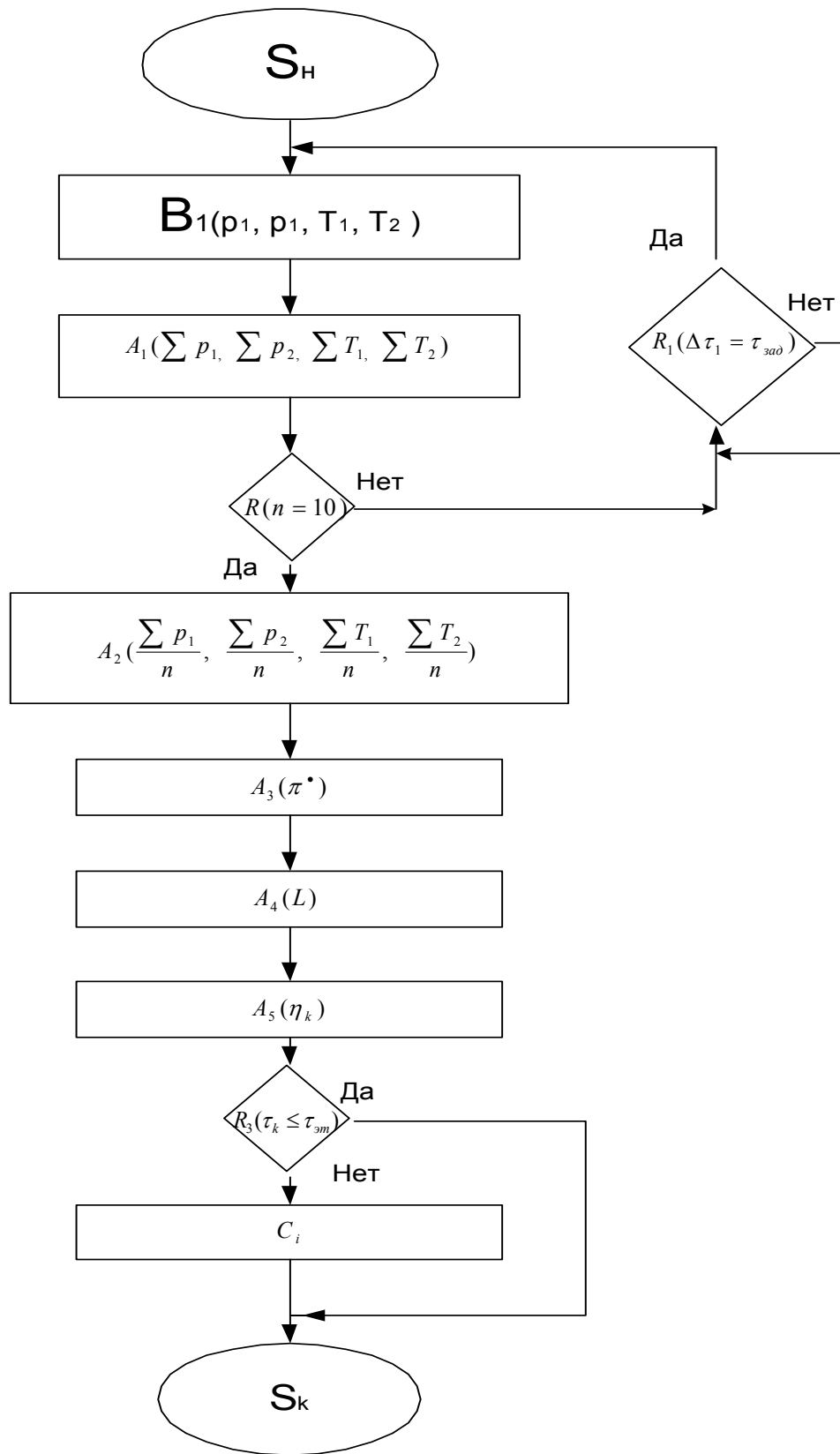


Рис. 91. Граф-схема определения КПД компрессора
высокого давления

§ 9. 2. Эргатические системы управления судовыми объектами

Необходимой и основной частью управления судовыми техническими средствами является судовой специалист (оператор), поэтому все судовые системы управления следует называть эргатическими системами. В эргатической системе управления человек-оператор, средства автоматизированного управления, главный двигатель, движитель и корпус судна, судовые системы и механизмы составляют единую замкнутую динамическую систему [11]. Структурная схема эргатической системы управления представлена на рис. 92.

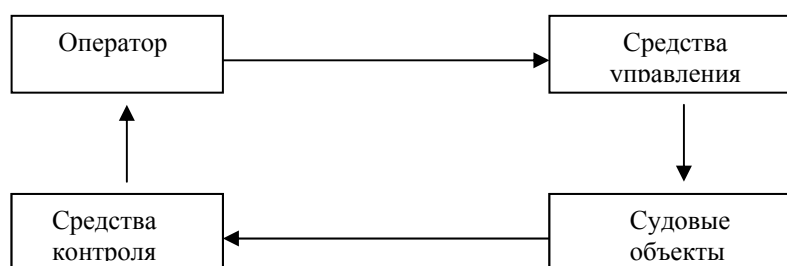


Рис. 92. Структурная схема типичной эргатической системы управления

Динамические и алгоритмические свойства систем автоматики и оператора накладываются на динамику пропульсивного комплекса и требуют исследования движения судна как эргатической системы.

По мере дальнейшего повышения степени автоматизации судов вплоть до комплексной их автоматизации показатели надежности, экономичности и безопасности все в большей мере определяются не столько техническим состоянием основного оборудования, сколько эффективностью автоматизированной системы управления. Поэтому взаимодействию судового механика со средствами автоматизации следует

уделять большее внимание, обеспечивая постоянный рост профессионального мышления и компетентности.

Системы автоматизированного управления строятся по принципу трехступенчатой иерархической структуры (рис. 93).

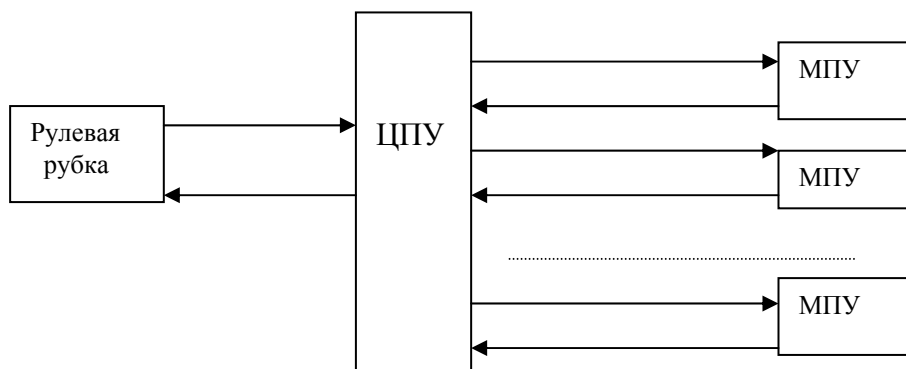


Рис. 93. Структурная схема управления судовой энергетической установкой

Система управления позволяет вести дистанционное автоматизированное управление (ДАУ) из рулевой рубки или из ЦПУ следующими технологическими процессами:

- ДАУ главными двигателями;
- ДАУ судовой электростанцией;
- ДАУ насосами охлаждения и смазки, вспомогательными и утилизационными котлами, сепараторами масла и топлива, воздушными компрессорами;
- ДАУ судовыми системами;
- ДАУ швартовными и буксирными лебедками, насосами и клинкетам грузовых систем танкеров, системами пожаротушения;
- Централизованный контроль параметров МКО и СТС;
- Автоматизированную сигнализацию и регистрацию контролируемых параметров и диагностирование основных механизмов.

Минимальный уровень функционирования согласно требований Регистра РФ и других классификационных обществ должен обеспечиваться с местного поста управления.

§ 9. 2. Критерий оптимальности

Вопросы целесообразности выбора той или иной конструктивной схемы СЭУ или ее элементов, выбор режимов эксплуатации и соответственно настроечных и регулировочных параметров, оценка эффективности вариантов перевозки пассажиров и грузов и т.п. решаются на основании точных анализов, в основе которых положены так называемые критерии оптимальности [8, 11].

Чаще всего эти критерии имеют экономический характер, когда оценка производится, например, по максимальному доходу эксплуатации судна, минимальным издержкам за назначенный период времени, по отношению затрат к прибыли, по капитальным затратам и срокам окупаемости, по экономии топлива и масел и т.д.

Критерии могут базироваться на технологические факторы, когда в основе принятия решения речь идет о минимизации процесса, например, переходного процесса при регулировании частоты вращения главных или вспомогательных двигателей, поддержанию максимального КПД СЭУ, обеспечению минимального времени реверсивности и т.п.

Лучшему варианту принятия решения всегда соответствует минимальное или максимальное значение показателя качества функционирования системы.

Практически невозможно обеспечить эффективное управление при одновременном выполнении нескольких различных по сущности критериев. Поэтому, как правило, ранжируют критерии по их значимости, один из них принимают в качестве основного (глобального), остальные считаются вторичными в виде каких-либо налагаемых ограничений. Практически это компромиссный метод решения задачи управления.

Решение подобных задач носит системный характер, когда структурно задачу разделяют на уровни, вводят межуровневые связи в виде цепочки «цель - целевая функция - критерий» в соответствии с рис. 94.

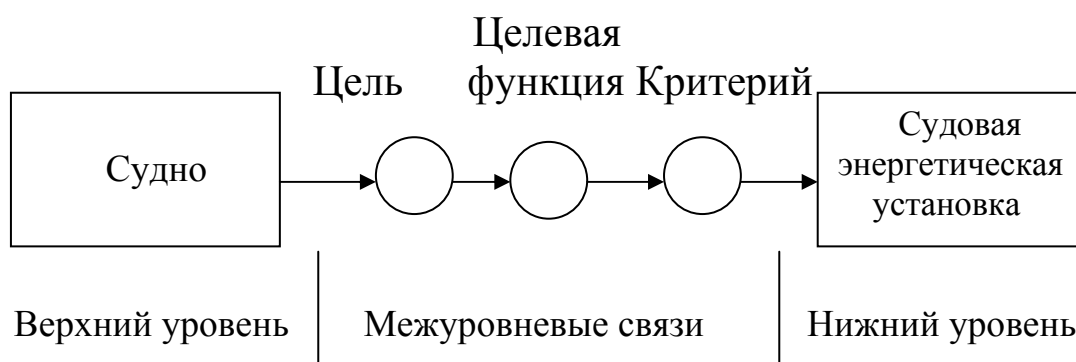


Рис. 94. Схема межуровневых связей в системе судно – СЭУ

Целью любого звена является логически сформулированный максимально возможный эффект использования. Например, цель для пароходства – максимальное снижение эксплуатационных расходов действующего флота, для судна – обеспечение КПД СЭУ, для механизма – обеспечение надежности и остаточного ресурса.

Целевая функция определяется набором параметров, от которых зависит обеспечение цели. Здесь необходимо учитывать весовую значимость параметров и выбирать наиболее существенные из них.

Критерий оптимальности двухуровневой структуры представляет собой математические условия минимального отклонения от цели верхнего уровня.

Принцип декомпозиции позволяет формировать различные варианты двухуровневых структур как функции взаимосвязей между отдельными элементами системы (рис. 95).

Рассмотрим декомпозицию (рис.95, б) «судно-СЭУ». Здесь верхним уровнем является «судно», а нижним – выделенная из него подсистема «СЭУ».

Целью эксплуатации судна является получение «максимального дохода», т.е. с точки зрения экономики прибыль в единицу времени с учетом взаимодействия судна с народным хозяйством региона. Должны быть учтены такие факторы, как потеря провозной способности, сбережение горюче-смазочных материалов, приращение чистой грузоподъ-

емности за счет уменьшения запасов топлива, потери от извлечения из оборота средств на время перевозок и т.п.

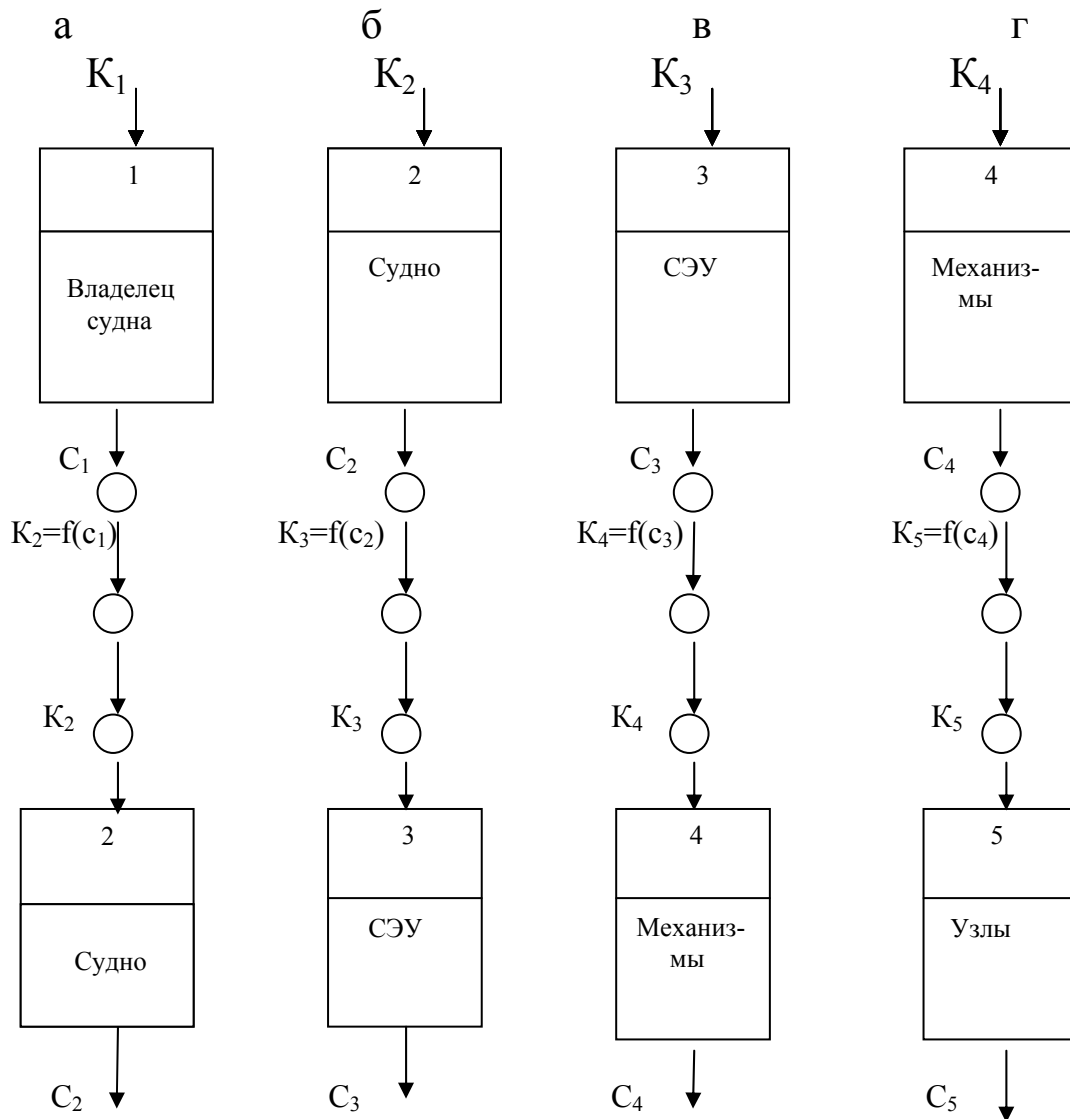


Рис. 95. Схемы декомпозиций:
С- цель; $K=f(c)$ – целевая функция; К- критерий

Целевая функция включает в себя время рейса, затраты на топливо, приращение чистой грузоподъемности, дальность рейса, продолжительность стоянок, стоимость груза, стоимость топлива на внутреннем и международном рынках, нормативные коэффициенты народнохозяйственной

эффективности, потери дохода от снижения стоимости, потенциальную возможность реализации сэкономленного топлива, условия фрахта.

Таким образом, целевая функция $K_3 = f(\mathcal{E})$, где $\mathcal{E}$ – цель или прибыль в единицу времени. Прибыль может быть оценена для каждого конкретного случая по известным выражениям [11] в зависимости от времени рейса, ходового времени, скорости судна и его грузоподъемности, коэффициента использования грузоподъемности, ставки фрахта, цены и затрат топлива, времени рейса при плановой скорости, стоимости груза, нормативного коэффициента эффективности, часового расхода топлива и других параметров.

По выражению для целевой функции рассчитывается зависимость экономического эффекта (прибыли) от скорости судна и определяется оптимальная скорость движения, при которой достигается максимальный экономический эффект. Безусловно, для этой декомпозиции определяющее значение имеет качество работы СЭУ, в частности, главных и вспомогательных двигателей.

Аналогично решается вопрос оптимального управления в отношении других декомпозиций.

§ 9. 3. Построение модели управления системы

Постановка задачи оптимального управления предполагает в первую очередь выбор тех независимых переменных, которыми определяется функционирование системы. Здесь необходимо соблюдать следующие правила:

- Разделить переменные на изменяющиеся в широком диапазоне и переменные, значения которых фиксированы и определяются внешними факторами. Например, в приведенном выше случае сопротивление движению судна меняется как функция скорости в большом диапазоне, а себестоимость судна и цена топлива фиксированы внешними факторами.

- Учитываются все переменные, которые влияют на функционирование системы, при этом в формулировке задачи должны отражаться важнейшие технико-экономические решения.
- Уровень детализации факторов, влияющих на работу системы, должен быть ограниченным, чтобы не перегружать задачу большим количеством несущественных деталей.

Следующий этап – выбор характеристического критерия для оценки функционирования системы. Математическое выражение критерия должно связывать независимые переменные и прочие факторы со степенью достижения цели. Математическое представление системы (чаще это упрощенное выражение) называется моделью системы. Математические модели позволяют в отличие от эксперимента получать более полные результаты при значительно меньших затратах средств и времени. Тем более, что эксперимент в ряде случаев сопряжен с риском, а также не всегда возможен.

Структура модели, как правило, включает основные уравнения материальных и энергетических балансов, уравнения математической физики, описывающих процессы системы. Дополнительно на эти процессы накладываются ограничения в виде неравенств, которые определяют области изменения независимых переменных и границы функционирования системы. При последующем анализе функционирования автоматизированной системы управления (АСУ) и особо для автоматизированных систем регулирования (АСР) выполняются следующие операции:

- Устанавливаются границы модели. Создается принципиальная схема с целью изучения взаимодействия элементов и узлов системы.
- Принципиальную схему расчленяют на типовые элементы по входным и выходным параметрам.

- Составляется структурная схема, причем для АСР на одном уровне, для АСУ – в виде двухуровневой структуры.
- Выбирают характеристический критерий, выбирают и анализируют независимые переменные. На структурную схему наносят лишь те переменные, которые существенно влияют на работу системы.
- Составляется модель, состоящая из системы уравнений, описывающих типовые звенья структурной схемы. Следует выделить коэффициенты уравнений, которые зависят от настроечных факторов.
- Вносятся все ограничения характеристик системы в виде неравенств, учитываются условия замыкания структурной схемы путем перемены знаков на противоположные в местах замыкания.
- Выполняется математический эксперимент на модели с целью выявления наилучшего варианта с применением методов оптимизации.

Таким образом, задачи оптимального управления в общем случае сводятся к системному анализу конкретной системы, выделению соответствующих декомпозиций, к постановке цели для выбранной декомпозиции, формированию целевой функции в виде математического выражения, нахождению критерия оценки эффективности декомпозиции и способа отыскания оптимума тем или иным способом и, наконец, выработка и принятие оптимального решения. Математическая модель может использоваться при этом для текущего принятия управляющего воздействия при изменении параметров режима или внешних условий работы.

Глава 10. Эксплуатация систем судовой автоматики

Регуляторы и элементы систем судовой автоматики в значительной мере определяют технические и экономические показатели судовых энергетических установок. В процессе эксплуатации необходимо внимательно следить за работой и состоянием самих регуляторов и объектов регулирования, соблюдать сроки и объемы профилактических осмотров, ремонтов. Обслуживающий персонал должен быть ознакомлен с устройством и особенностями конструкции регуляторов и объектов, знать соответствующую информацию об элементах судовой автоматики по техническим инструкциям и ТУ к изделиям.

Проверку работы и правильности статической настройки элементов судовой автоматики в эксплуатации производят периодически. Это позволяет поддерживать установленные параметры на требуемом уровне.

§ 10. 1. Общий подход к проверке параметров работы и статических характеристик систем судовой автоматики

В первую очередь необходимо знать структурную и функциональную схемы САР, места отбора регулируемого параметра, способы воздействия и фиксации исполнительных органов. У места отбора импульса должен быть включен измерительный прибор, а у регулирующего органа – измеритель его положения: у регуляторов давления, например, со скрытым регулирующим органом должен быть включен манометр, позволяющий (пусть и косвенно) судить об интенсивности регулирующего действия на процесс. Должен быть продуман метод измерения или оценка условия нагрузки автоматизированного агрегата. На рис. 96 приведена структурная схема для контроля статических характеристик системы автоматического регулирования температуры предварительного подогрева тяжелого топлива в танках [17, 18].

В обследование средств автоматизации входят: проверка их рабочих характеристик, оценка качества работы, установление (при необходимости) причин ненормальной работы и их устранение. В точках 1...4 должны быть установлены соответствующие средства измерения. Например, перемещение регулирующего органа или выходные координаты регулятора возможно оценить либо по манометру (т.1), либо по перемещению штока клапана. Нагрузка определяется количеством работающих потребителей. Результаты обследования фиксируются в соответствующей судовой документации.

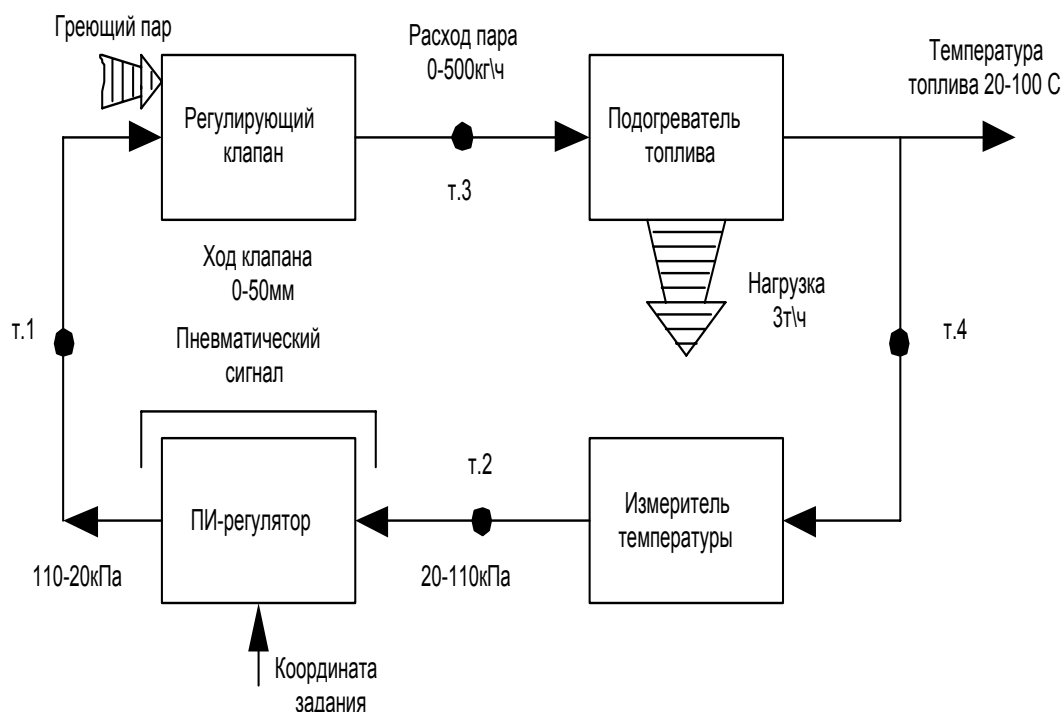


Рис. 96. Структурная схема САР температуры подогрева тяжелого топлива

§ 10. 2. Установление характеристик САР и ее элементов

Регулируемый параметр не должен выходить за пределы зоны пропорциональности, указанной в паспорте автоматизированного объекта. Как правило, достаточно установить значения параметра при минимальной, средней и наибольшей нагрузках.

Проверки выполняются в определенной последовательности:

1. После наружного осмотра элементов САР проверяется наличие и исправность всех приборов или указателей, контролирующих значение регулируемого параметра (y), значение внешней нагрузки (λ) и воздействие регулирующего органа (x) на процесс. Последнее устанавливают либо по величине регулируемого потока (например, расхода воздуха, топлива, питательной воды в барабан котла), либо по параметрам этого потока (давление, температура), либо по положению регулирующего органа (клапана, рейки, заслонки). Предпочтение отдается непосредственному измерению потока.

2. Проверяются приборы и параметры цепи регулирования. Для регуляторов непрямого действия проверяют соответствие параметров вспомогательной энергии паспортным данным. Сопоставляется действительное положение настроечных приспособлений с данными рекомендуемой регулировки (если приспособления снабжены шкалами настройки). При отсутствии шкал правильность настройки определяют по предельным значениям регулируемой величины. При крайних значениях x регулируемой величины регулирующий орган должен быть либо полностью открыт, либо закрыт. При хорошем состоянии объекта и нормальной работе автоматики достаточно убедиться в том, что при данной нагрузке положение регулирующего органа соответствует статическим характеристикам САР, указанным в паспорте.

3. Устанавливают регуляторную характеристику, для этого задают различные нагрузки от минимальной до номинальной. В специальном бланке фиксируют: дату и время измерения, положение настроечных приспособлений, значение нагрузки (или косвенного ее показателя), значение регулируемой величины, положение регулирующего органа, параметр вспомогательной энергии, выходные сигналы основных звеньев цепи регулирования.

Измерения производят спустя некоторое время после изменения нагрузки. Величина этого интервала должна обеспечить выход объекта на установившийся режим работы. Главное – обеспечить стабильность нагрузки на объект.

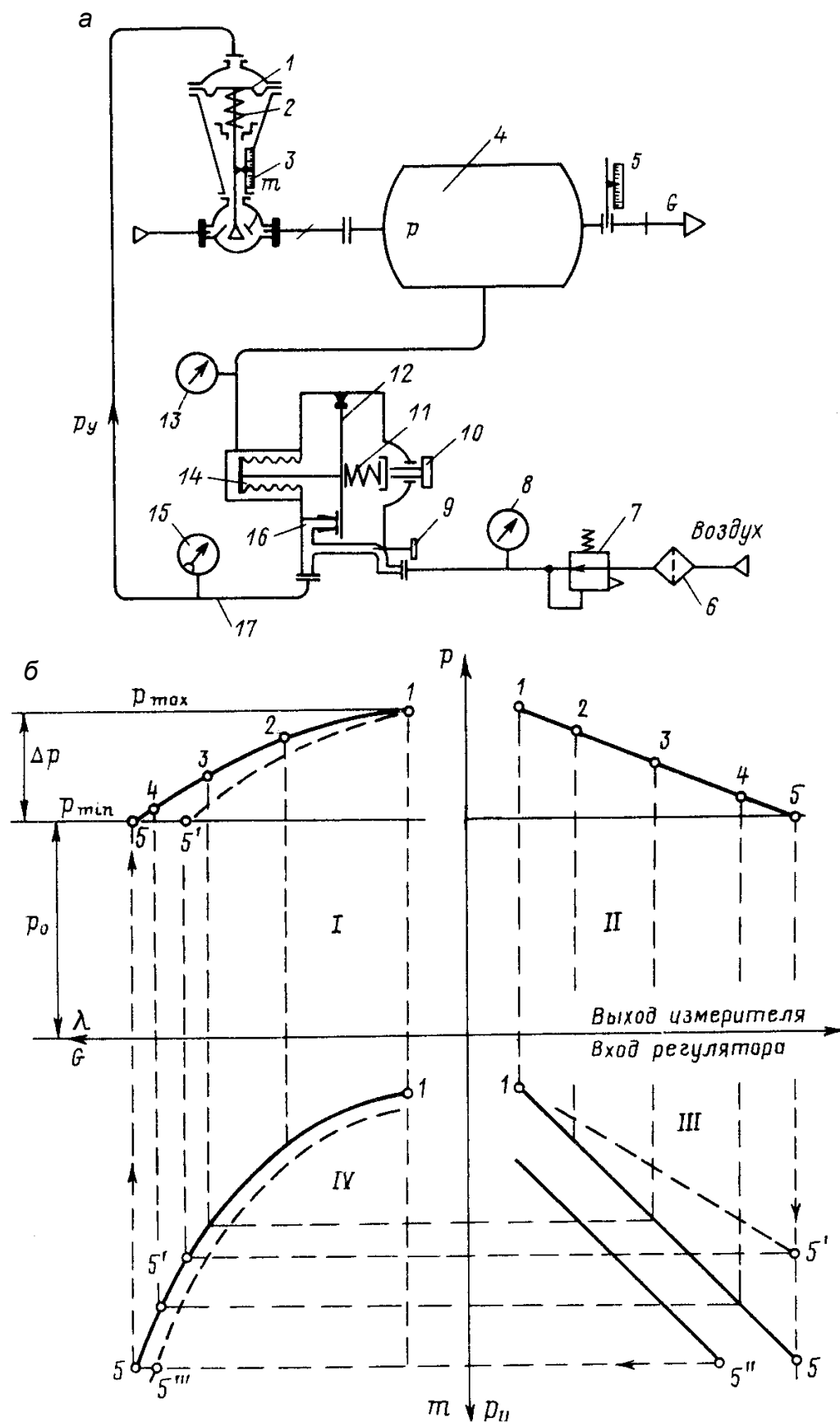
Наиболее полные проверки исправности и правильности настроек каждого звена делают при разомкнутом состоянии системы, т.е. работа сводится к снятию статических характеристик каждого элемента и контролю соответствия его сигналов структурной схеме с учетом зоны нечувствительности.

Пример настройки регулятора давления в САРд сжатого воздуха

На рис. 97, а представлена САР давления сжатого воздуха.

Давление в резервуаре 4 передается по импульсной трубке к измерительному элементу 14. Сильфон передает усилие на рычаг 12, деформируя при этом пружину 11, которая снабжена устройством для измерения координаты задания 10. Свободный конец рычага 12 изменяет проходное сечение усилительного элемента сопла-заслонки 16. Сжатый воздух постоянного давления после фильтра 6 и редукционного клапана 7 поступает через регулируемый дроссель 9 в канал, сообщающийся через трубопровод 17 с камерой мембраны 1 исполнительного механизма и с соплом-заслонкой 16.

В зависимости от давления и, следовательно, сжатия пружины 11 в полости мембраны 1 устанавливаются различные давления, которым соответствуют определенные положения регулирующего клапана.



Приступая к проверке настройки регулятора, следует убедиться что:

- шток регулирующего клапана снабжен шкалой 3, определяющей положение регулирующего органа;
- шток клапана 5 снабжен шкалой (внешняя нагрузка, определяющая расход воздуха из резервуара);
- на магистрали питающего воздуха установлены исправный манометр 8, фильтр 6 и настроенный на заданное давление редукционный клапан 7;
- исправны манометры 13 и 15 на входе в регулятор и на выходе;
- предельным значениям командного давления в магистрали 17 соответствуют крайние положения регулирующего клапана («открыто» или «закрыто»);
- настроечные приспособления – винт 10 и дроссель 9, находящиеся в рабочих положениях.

Тронув пальцем рычаг 12, убедимся в том, что изменение давления по манометрам 13 и 15, а также движение штока клапана происходят плавно и в требуемом направлении. После этого и до окончания снятия статических характеристик положения настроечных приспособлений должны сохраняться неизменными.

Измерения для получения статических характеристик проводят при различных положениях клапана 5, определяющих расход G через резервуар.

Для каждого значения расхода (от минимального до максимального) при установившихся режимах фиксируют положение клапана 5, давление p в резервуаре и на входе в регулятор, положение m регулирующего клапана по шкале 3, давление p_y на выходе из регулятора.

По полученным данным строят характеристику регулирования (регуляторную характеристику) в виде зависимости давления в резервуаре от расхода G (или положения клапана 5). Если такая характеристика удовлетворяет требованиям эксплуатации и соответствует паспортным данным, то на этом проверку заканчивают. Иначе следует проанализировать другие данные, полученные при проверке. Строятся

совмещенные статические характеристики (рис. 97, б). Анализ этих характеристик позволяет выявить причины неполадок.

Откорректировать рабочие характеристики можно за счет изменения:

- настройки регулятора, при этом линия 1-5 в третьем квадранте сместится эквидистантно в новое положение 5'';
- ширины зоны пропорциональности клапаном 9, при этом изменится степень неравномерности регулятора, а его характеристика получит новый угловой наклон, например, 5'. Это вызовет изменение степени неравномерности САР (линия 1-5' в квадранте I);
- натяжение пружины 3 сервомотора. Это сместит характеристику сервомотора в положение 5''' в квадранте IV.

Каждому воздействию будет соответствовать новое положение регуляторной характеристики $\rho = p(\lambda)$, где λ - относительное изменение нагрузки.

Воздействуя на настроечные параметры, приводят регуляторную характеристику в полное соответствие с паспортной.

Более правильная настройка САР осуществляется путем размыкания системы и снятия статических характеристик каждого элемента с контролем зоны нечувствительности и соответствия входных и выходных сигналов структурной схеме САР.

§ 10. 3. Устранение неисправностей САР

В эксплуатации СЭУ часто выявляется несоответствие реальных характеристик и показателей переходного процесса САР и ее элементов паспортным. Необходимо установить место и причины неисправности или нарушения настройки какого-либо звена системы. Это возможно выполнить путем анализа характеристик звеньев контура регулирования. Характеристики элементов (см. например, рис. 97) могут отличаться от заданных при первоначальной настройке вследствие ряда причин (остаточная деформация

или разрушение сильфона, заедания и прихваты в передаче из-за несвоевременной смазки, засорение дросселя, порыв мембраны и т.п.). Могут изменяться статические характеристики, например, загрязнение рабочей поверхности теплообменных аппаратов приводит к снижению коэффициента теплопередачи и увеличению запаздывания между регулирующим воздействием и регулируемым параметром.

Характеристики отдельных элементов возможно определить при неработающей САР, когда входное воздействие удастся каким-либо образом имитировать.

Главное, до начала проверки правильности настройки или ее корректировки необходимо убедиться в том, что настроечные приспособления регуляторов находятся в нужных положениях.

Часто достаточно убедиться визуально, что звено правильно реагирует на входное воздействие.

Настройки элементов САР, при которых устанавливается соответствие входных и выходных величин каждого звена, как правило, взаимосвязаны. На рис. 98 представлен алгоритм проверки правильности настройки системы автоматического регулирования.

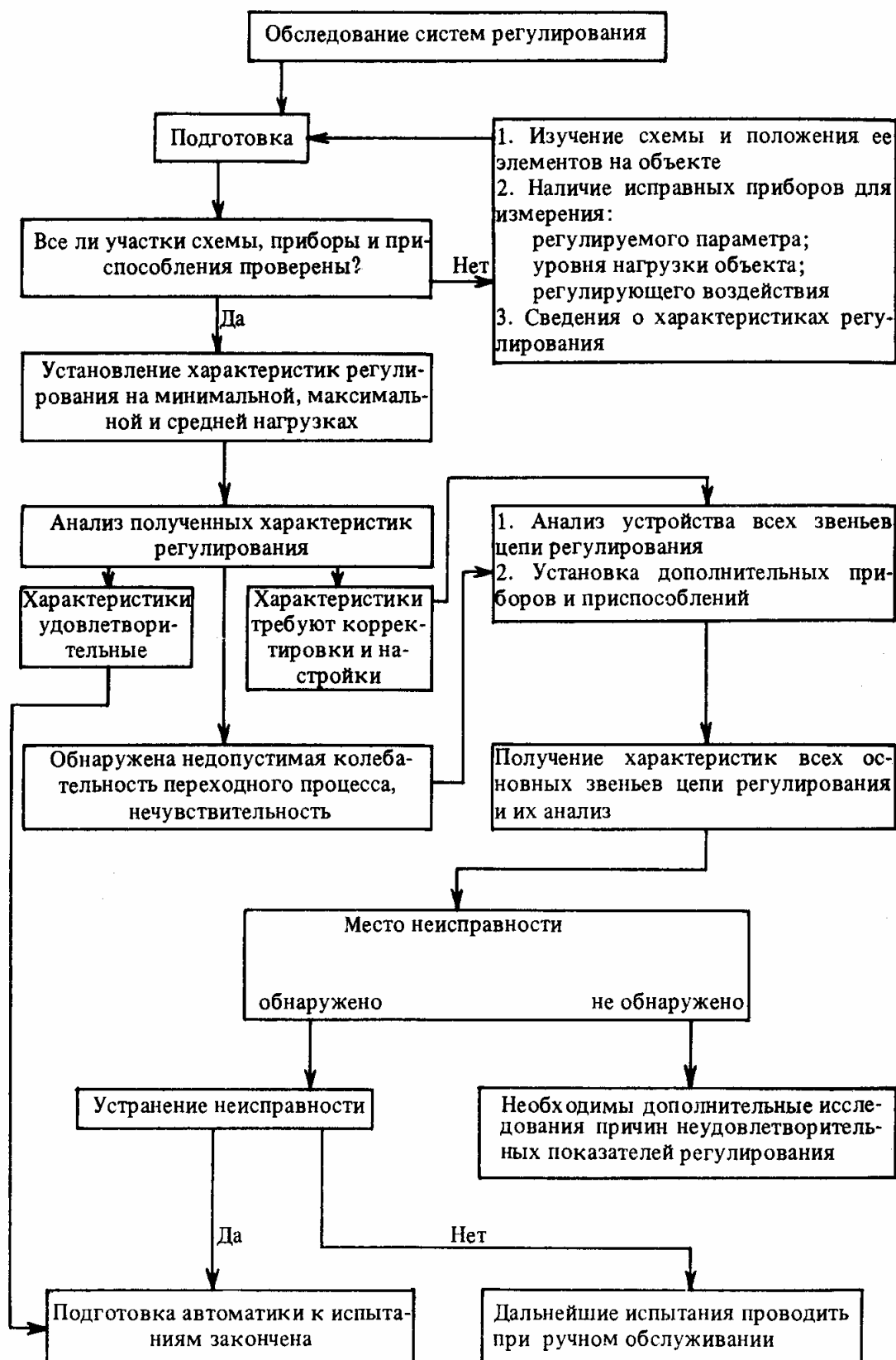


Рис. 98. Алгоритм проверки правильности настройки САР

§ 10. 4. Отдельные способы оптимальной настройки автоматических регуляторов

Наличие информации о переходном процессе САР позволяет обеспечить оптимальную настройку замкнутой системы регулирования. Такая информация может быть получена обслуживающим персоналом в условиях эксплуатации СЭУ. Это либо переходная функция разомкнутой системы, либо характеристика колебательного режима, созданного в САР при определенных условиях.

О п р е д е л е н и е п а р а м е т р о в н а с т р о й к и по локальным элементам кривой переходной функции разомкнутой системы.

Экспериментальная кривая $\xi = f(t)$ получена путем внесения скачкообразного возмущения входной величины λ (см. рис. 99). Значения параметров настройки регулятора, обеспечивающие декремент затухания переходного процесса $\chi = 0,25$, могут быть определены по максимальной скорости изменения регулируемой величины ξ и эффективно-му запаздыванию.

Эту скорость находят как наклон касательной ab в точке перегиба Ω , а эффективное запаздывание z устанавливают по расстоянию от момента возмущения при $t = 0$ до точки пересечения касательной с осью абсцисс. Также определяют величину подкасательной U и ординату S точки перегиба.

Должны быть известны величина возмущения $\Delta\lambda_0$, а также шкала $Y_{шк}$ регулятора, фиксирующая изменения регулируемой величины или другое базовое значение выходной переменной, по отношению к которому вычисляют ее отклонение в процентах.

Располагая значениями z и U в единицах времени, S и $Y_{шк}$ в единицах регулируемой величины и возмущения $\Delta\lambda_0$ в процентах, находят две вспомогательные величины

$$S\% = \frac{S}{Y_{шк}} \cdot 100 \quad \text{и} \quad N = \frac{S\%}{U} . \quad (59)$$

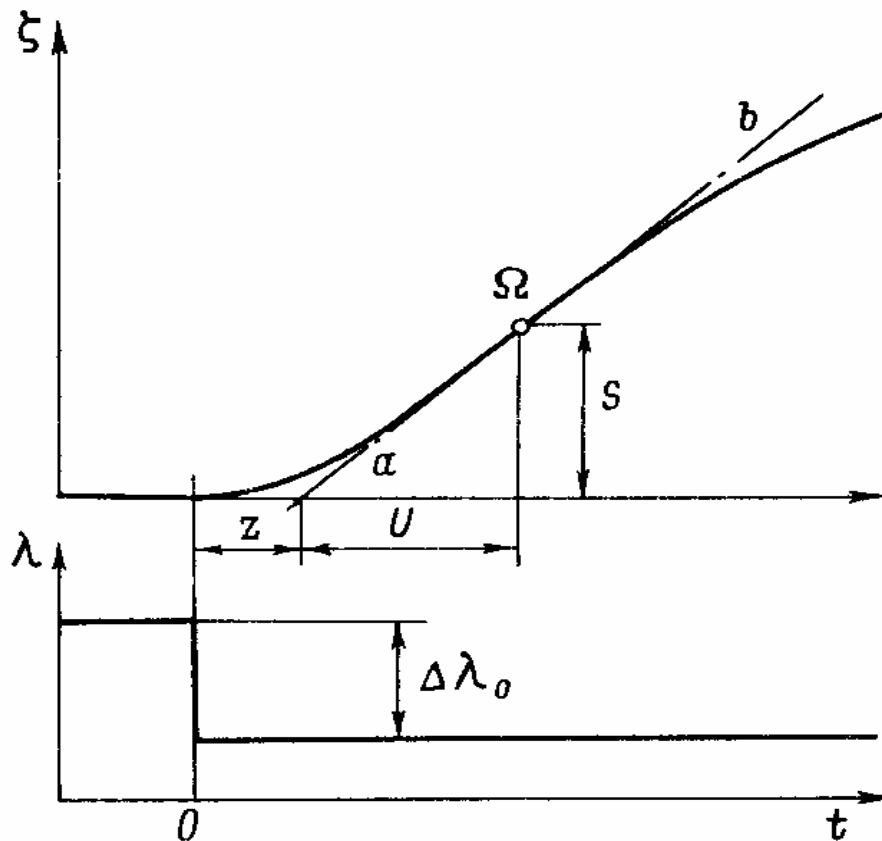


Рис. 99. К определению максимальной скорости изменения регулируемой величины и участка запаздывания по переходной функции разомкнутой системы

Далее рассчитывают параметры настройки:

для П-регулятора $K_R = \frac{\Delta\lambda\%}{z \cdot N};$

для ПИ-регулятора $K_R = \frac{\Delta\lambda\%}{1,1 \cdot z \cdot N}$ и $T_u = \frac{z}{0,3};$

для ПИД-регулятора $K_R = \frac{1,2 \cdot \Delta\lambda\%}{z \cdot N};$
 $T_u = 2 \cdot z; \quad T_o = 0,5 \cdot z.$

Определение параметров настройки регуляторов по характеристикам замкнутых систем.

Для П-регуляторов возможно обеспечить близкую к оптимальной настройку САР, используя результаты исследования замкнутой системы. Переходные процессы здесь однозначно определяются отношением коэффициента усиления регулятора K_R к критическому K_R^{kp} , соответствующему границе устойчивости. при этом реализуются два метода настройки, основанные на характеристиках переходных процессов либо в форме незатухающих колебаний (метод незатухающих колебаний при $\frac{K_R}{K_R^{kp}} = 1$), либо метод зату-

хающих колебаний при декременте затухания $\chi_z = 0,25$. Если регулятор имеет ПИД закон регулирования, то во время эксперимента постоянную времени интегрирования устанавливают равной бесконечности, а постоянную времени дифференцирования - равной нулю.

Метод незатухающих колебаний заключается в том, что в САР, оставленной только с П-составляющей закона регулирования экспериментально устанавливают критические значения коэффициента усиления K_R^{kp} при частоте незатухающих колебаний ω_{kp} (используется при этом устройство изменения степени неравномерности статической характеристики регулятора, $K_R = \frac{1}{\delta}$).

Оптимальные параметры настройки определяют на основе теории по формулам:

для П-регулятора $K_R^{onm} = 0,5 \cdot K_R^{kp}$;

для ПИ-регулятора $K_R^{onm} = 0,45 \cdot K_R^{kp}$ и $T_u^{onm} = 0,83 \cdot T_{np}$;

для ПИД-регулятора $K_R^{onm} = 0,6 \cdot K_R^{kp}$; $T_u^{onm} = 0,5 \cdot T_{np}$;

$$T_\delta^{onm} = 0,125 \cdot T_{np}.$$

Период колебаний в незатухающем процессе T_{np} определяют из диаграммы переходного процесса. При проведении эксперимента всякий раз при изменении K_R (путем изменения степени неравномерности регуляторной характеристики) в САР вносят незначительное толчкообразное возмущение. При достижении незатухающих колебаний определяют T_{np} .

Метод затухающих колебаний основан на использовании характеристик переходной функции с декрементом затухания $K_z = 0,25$.

Декремент затухания – это отношение последовательных положительных отклонений регулируемого параметра (в данный момент времени к предыдущему) после внесения единичного возмущения в систему. Этот метод применим тогда, когда не удастся вызвать незатухающие колебания регулируемого параметра.

Проведя подготовительные операции, в результате которых объект остается с одним П-регулятором, начинают ступеньками увеличивать K_R . После каждого такого изменения САР сообщают небольшое толчкообразное возмущение по нагрузке. Когда декремент затухания окажется примерно равным 0,25, измеряют период T_b этих колебаний. Оптимальная настройка ПИД-регулятора состоится при

$$T_u^{opt} = 0,67 \cdot T_b \quad \text{и} \quad T_d^{opt} = 0,17 \cdot T_b.$$

Далее, после установки постоянных T_u^{opt} и T_d^{opt} уточняют настройку K_R . Для этого, изменяя наклон статической характеристики, восстанавливают декремент затухания до значения 0,25.

Вышеприведенные частные способы оптимальной настройки САР не исчерпывают возможный в эксплуатации арсенал известных подходов к этой важнейшей проблеме: обеспечения высокой эффективности использования судовых энергетических установок.

Заключение

В учебном пособии рассмотрены основные принципы функционирования систем автоматического регулирования судовых технических средств и технологических процессов.

Несмотря на внедрение новых современных технологий, базирующихся на использовании микропроцессорной техники, представленные в книге теоретические основы автоматики по-прежнему остаются незыблемыми. Например, для широко применяемого регулятора частоты вращения ВРН-50 механического типа движение описывается системой уравнений типовых звеньев (колебательного или апериодического звена второго порядка, интегрирующего звена, изодромного элемента, звена запаздывания и т.д.). Современный электронный регулятор состоит из аналогичных типовых звеньев и описывается аналогичными уравнениями движения не смотря на то, что в элементах регулятора происходят электрические процессы. Будущее безусловно за электронными системами управления, но на сегодняшний день механические системы по-прежнему обладают определенными преимуществами и составляют представительное большинство в судовой технике.

В дальнейшем при переходе на электронные системы управления все равно останутся такие механические элементы как датчики, сигнализаторы, измерители частоты вращения, гидравлические и пневматические приводы и усилители, следящие системы и т. п.

Таким образом, системы управления будущего – это оптимальное объединение и использование положительных сторон механических, электрических и электронных элементов.

Особое внимание следует уделять микропроцессорным системам управления. Сегодня они полностью вытеснили другие системы управления. Использование компьютерной техники предоставляет судомеханикам неограниченные возможности по оптимальному использованию судовых технических средств.

Список литературы

1. Алексеев Н.А., Ушаков В.М. Эксплуатация судовых микропроцессорных систем: Учебное пособие для вузов. М.: Транспорт, 1994. 208 с.
2. Автоматизация судовых энергетических установок: Справочное пособие / Под ред. Р.А. Нелепина. Л.: Судостроение, 1975. 534 с.
3. Бабилов М.А., Косинский А.В. Элементы и устройства автоматики: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1973. 154 с.
4. Автоматизированные системы управления судовых энергетических установок// Методические указания к лабораторным занятиям для студентов специальности 2405.01/ Сост. Г.Б. Горелик. Хабаровск.: Изд-во Хабар.гос. техн. ун-та, 1999. 36 с.
5. Основы судовой автоматики: программа и методические указания к изучению курса для студентов заочной формы обучения специальности 2405.01./ Сост. Г.Б. Горелик. Хабаровск.: Изд-во Хабар.гос. техн. ун-та, 2001. 24 с.
6. Горелик Г.Б. Автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками: Методические указания по курсовому проектированию для студентов заочной формы обучения специальности 2405.01./ Сост. Г.Б. Горелик. Хабаровск.: Изд-во Хабар.гос. техн. ун-та, 2001. 21 с.
7. Исаков Л.И. Устройство и обслуживание судовой автоматики: Справочник. Л.: Судостроение, 1989. 293 с.
8. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. М. : Машиностроение, 1989. 615 с.

9. Кутьин Л.И., Исаков Л.И. Комплексная автоматизация судовых дизельных и газотурбинных установок. Л.: Судостроение, 1984. 387 с.
10. Кутьин Л.И. Автоматизация судовых и газотурбинных установок: Учебное пособие для вузов. Л. : Судостроение, 1973. 122 с.
11. Ланчуковский В.И., Козьминых А.В. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок. М.: Транспорт, 1990. 335 с.
12. Левин М.И. Автоматизация судовых дизельных установок. Л.: Судостроение, 1969. 465 с.
13. Онасенко В.С. Судовая автоматика. Учебник: М.: Транспорт, 1988. 272 с.
14. Печененко В.И., Козьминых Г.В. Автоматика регулирования и управления судовыми силовыми установками. М. : Транспорт, 1973. 214 с.
15. Печененко В.И., Козьминых Г.В. Основы автоматики и комплексная автоматизация судовых пароэнергетических установок: Учебное пособие. М.: Транспорт, 1979. 262 с.
16. Сыромятников В.Ф. Эксплуатация систем автоматического регулирования судовых силовых установок. М.: Транспорт, 1975. 272 с.
17. Сыромятников В.Ф. Основы автоматики и комплексная автоматизация судовых пароэнергетических установок: Учебник М.: Транспорт, 1983. 312 с.
18. Сыромятников В.Ф. Наладка автоматики судовых энергетических установок: Справочник. Л.: Судостроение, 1989. 351 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Основные понятия, терминология и задачи судовой автоматики	5
§ 1.1. Общие вопросы судовой автоматики, терминология.....	7
§ 1.2. Структура и виды задач судовой автоматики	9
Глава 2. Статика САР	20
§ 2.1. Объект регулирования и его статическая характеристика.....	20
§ 2.2. Статические характеристики наиболее часто применяемых элементов.....	25
§ 2.3. Статическая характеристика системы автоматического регулирования	33
§ 2.4. Анализ статики систем автоматического регулирования и синтез САР.....	35
Глава 3. Измерительные устройства в судовой автоматике.....	40
§ 3.1. Измерение давления.....	41
§ 3.2. Измерение температур.....	45
§ 3.3. Измерение уровня жидкости... ..	50
§ 3.4. Измерение частоты вращения	54
§ 3.5. Измерение перемещений.....	56
Глава 4. Усилительные и регулирующие органы	58
§ 4.1. Структурная схема усилительного органа.....	58
§ 4.2. Гидравлические усилители.....	59
§ 4.3. Пневматические усилители	63
§ 4.4. Регулирующие органы	66
Глава 5. Типовые элементарные звенья систем судовой автоматики	68
§ 5.1. Идеальное звено (звено нулевого порядка)	70
§ 5.2. Аперiodическое звено (однoемкoстнoе, первого порядка)	72
§ 5.3. Аперiodическое звено (двухъемкoстнoе, 2-го порядка).....	80

§ 5.4. Колебательное звено (двухъёмкостное, 2-го порядка).....	87
§ 5.5. Интегрирующее звено.....	88
§ 5.6. Дифференцирующее звено.....	90
§ 5.7. Звено чистого запаздывания.....	91
§ 5.8. Анализ соединений типовых звеньев (структурные схемы и уравнения САР).....	92
Глава 6. Устойчивость систем автоматического регулирования и качество переходных процессов.....	97
§ 6.1. Общие представления об устойчивости САР.....	97
§ 6.2. Теоремы Ляпунова об устойчивости линеаризованных систем.....	101
§ 6.3. Условия и критерии устойчивости.....	102
§ 6.4. Критерии устойчивости САР.....	104
§ 6.5. Качество процесса регулирования.....	117
Глава 7. Виды регулирующих воздействий (законы регулирования).....	119
§ 7.1. Релейное регулирование.....	119
§ 7.2. Пропорциональное регулирующее действие (пропорциональные регуляторы).....	120
§ 7.3. Интегральное регулирующее воздействие (интегральные регуляторы).....	124
§ 7.4. Пропорционально-интегральное регулирующее воздействие (пропорционально-интегральный регулятор).....	126
§ 7.5. Регулирующее воздействие по производной....	128
§ 7.6. Пропорционально-дифференциальное регулирующее воздействие.....	128
§ 7.7. Пропорционально-интегрально- дифференциальное (ПИД) регулирование.....	132
Глава 8. Микропроцессорные системы управления и комплексной автоматизации судов.....	136
§ 8.1. Понятия и терминология, общие требования к МПСУ.....	137

§ 8.2. Алгоритмы МПСУ	140
§ 8.3. Микропроцессорная система управления «Селма-2»	149
§ 8.4. Другие микропроцессорные системы управления.....	161
§ 8.5. Электронные регуляторы универсального применения.....	168
Глава 9. Постановка задачи оптимального управления судовыми техническими средствами.....	172
§ 9.1. Общее представление о процессах управления.....	172
§ 9.2. Эргатические системы управления судовыми объектами.....	177
§ 9.3. Критерий оптимальности.....	179
§ 9.4. Построение модели управления системы.....	182
Глава 10. Эксплуатация систем судовой автоматики.....	185
§ 10.1. Общий подход к проверке параметров работы и статических характеристик систем судовой автоматики.....	185
§ 10.2. Установление характеристик САР и ее элементов.....	186
§ 10.3. Устранение неисправностей САР.....	191
§ 10.4. Отдельные способы оптимальной настройки автоматических регуляторов.....	194
Заключение.....	198
Список литературы.....	199