Библиотека СОК

Министерство образования и науки Российской Федерации

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.И. НОВИКОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Часть 2

АНАЛОГОВЫЕ РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И РЕАЛИЗАЦИЯ АСР

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2006

УДК 621.311.22.002.5+621.183](075.8)
Н 731

Рецензенты: вед. инженер ЗАО «СибКоТЭС» *М. Н. Г. Мац*,
канд. техн. наук, доцент *О.А. Вихман*

Работа выполнена на кафедре тепловых электрических станций

Новиков, С.И.
Н 731 Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования. Ч. 2. Аналоговые регулирующие устройства и реализация АСР : учеб. пособие / С.И. Новиков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – 84 с.

В работе приведены конструктивные схемы аналоговых регулирующих устройств, используемые при создании АСР. Рассмотрены способы реализации АСР на аналоговых устройствах разных структур: РПИБ, Каскад, Контур, АКЭСР.

Пособие предназначено для студентов специальности «Автоматизация теплоэнергетических установок» (220301) и может быть полезно наладочному и эксплуатационному персоналу малой и большой энергетики.

УДК 621.311.22.002.5+621.183](075.8)

© С.И. Новиков, 2006

© Новосибирский государственный технический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 4
1. Общие этапы наладки автоматических систем регулирования 6
2. Статическая настройка регулирующих устройств 10
3. Аналоговые регулирующие устройства отечественного производства 20
4. Динамическая настройка типовых структур АСР 44
5. Реализация ОПН РУ АСР 54
6. Реализация типовых структур теплоэнергетических АСР на аналоговых технических средствах 59
Заключение 82
Использованная литература 82

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация технологических процессов теплоэнергетических установок играет определяющую роль в обеспечении экономичной и безопасной работы и мощных энергоблоков, и небольших котельных установок. Почти полвека определяющую позицию занимали технические средства автоматизации, построенные на аналоговой элементной базе, прошедшей долгий путь развития от использования электронных ламп до введения больших интегральных схем. С помощью этих средств были реализованы высокоэффективные системы регулирования (АСР) отдельных параметров технологических процессов. Эти технические средства до сих пор не утратили своего значения. Но сами по себе даже совершенные устройства еще не могут обеспечить высокой эффективности процессов, они должны быть настроены. Эта настройка должна быть оптимальной, т.е. в каком-то смысле наилучшей. В качестве критерия оптимальности могут быть выбраны разные показатели. За критерии качества регулирования АСР в теплоэнергетике приняты следующие:

- динамическая ошибка должна быть меньше заданной для данной АСР в определенном режиме;
- квадратичная интегральная оценка переходного процесса должна быть минимальной;
- степень затухания переходного процесса должна быть не менее заданной.

Настоящая работа посвящена принципам построения отечественных аналоговых регуляторов, реализации с помощью этих регуляторов типовых структур АСР, методам расчета параметров статической и динамической настройки аналоговых регуляторов, обеспечивающим необходимое качество регулирования. В работе приведены примеры расчета настроек регуляторов для реальных теплосиловых установок.

В основу работы положены лекции, читаемые студентам специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов» (220301) на факультете энергетики НГТУ, и 40-летний опыт работы автора по пуску и наладке тепловых электростанций в Сибирском отделении ОРГРЭС – Сибтехэнерго.

Автор выражает благодарность студентам группы АТЭ-11 и особенно А.Ю. Рейценштейн из группы АТЭ-21 за подготовку работы к изданию.

Автор заранее благодарит за все замечания и предложения и надеется, что работа окажется полезной не только студентам, но и инженерам, специализирующимся в области проектирования, наладки и эксплуатации автоматических систем регулирования теплоэнергетических процессов.

1. ОБЩИЕ ЭТАПЫ НАЛАДКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Процесс наладочных работ по вводу автоматических систем регулирования независимо от автоматизируемого технологического цикла, установки вводимой АСР может быть разделен на несколько этапов. Одним из важнейших этапов этого процесса является анализ проекта АСР, который проводится представителями наладочной организации по материалам проекта. Анализу подвергаются как стратегические цели создания АСР (принципиальная работоспособность, возможность реализации структуры АСР на выбранных технических средствах), так и тактические (отсутствие ошибок в соединениях, выбор датчиков и т.д.). Анализ проводится на базе опыта наладочной организации, «ноу-хау» специалистов. Чем грамотнее проведен анализ проекта, тем быстрее будет введена АСР, тем большей будет эффективность ее функционирования.

На рис. 1.1 приведен алгоритм наладки АСР. Анализ проекта составляет содержание предварительного этапа. Второй этап ввода АСР назван подготовительным, он содержит операции по проверке элементов АСР:

- регулирующего и вспомогательных устройств;
- заборных устройств, импульсных линий;
- регистрирующего устройства (если предстоит определение динамических характеристик объекта регулирования).

В ходе этапа определяются характеристики первичных измерительных преобразователей (датчиков), регулирующих органов, продуваются импульсные линии, проверяется функционирование схемы дистанционного управления регулирующим органом, работа блокировок и ввод сигналов из схемы технологических защит и правильность монтажа схемы автоматического воздействия на регулирующий орган. Если неизвестны динамические характеристики объекта регулирования, принимается решение о необходимости определения динамических характеристик объекта.

Алгоритм наладки АСР



Рис. 1.1 (см. также с. 8)

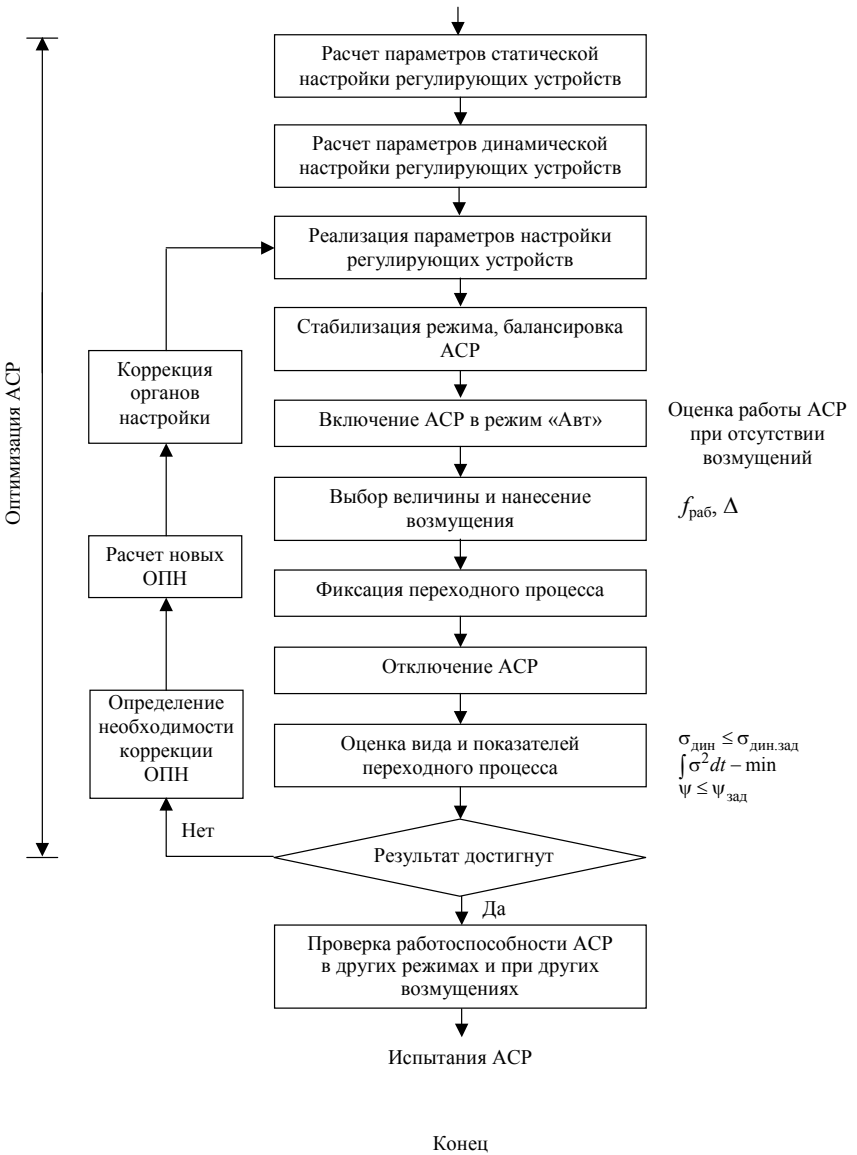


Рис. 1.1. (окончание)

После обработки результатов испытания (кривых разгона объекта регулирования), с использованием данных предварительной проверки датчиков, регулирующего устройства, исполнительного механизма и регулирующего органа, проводятся расчеты параметров статической и динамической настройки регулирующего устройства (регулятора, контроллера). По данным расчета и проверки регулирующего устройства выполняется реализация параметров настройки (установка нужных величин настроечных параметров). После этого проводятся опыты пробного включения АСР в работу в автоматическом режиме. Эта операция выполняется в режиме работы основной технологической установки без каких-либо возмущений. Затем проводится проверка отработки небольших возмущений (чаще всего со стороны регулирующего органа): в состоянии баланса АСР она выводится в режим ручного управления, дистанционно перемещается регулирующий орган на выбранную величину (обычно 5...10 % по указателю положения), АСР переводится в режим автоматического управления, фиксируется (записывается) с помощью системы регистрации переходный процесс. Полученная запись переходного процесса обрабатывается с целью получения показателей этого процесса:

- динамической ошибки σ_1;
- площади под кривой переходного процесса (квадратичной интегральной оценки) $\int_0^\infty \sigma^2 dt$;
- степени колебательности переходного процесса $\psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1}$.

Полученные результаты сравниваются с требованиями, предъявляемыми технологическим процессом. Описанные выше операции составляют содержание этапа оптимизации АСР. При неудовлетворительных результатах отработки возмущений анализируются причины, и процесс повторяется до получения желаемого результата.

После получения нужного результата при этом возмущении проверяется отработка АСР других возмущений (в частности, возмущения задатчиком).

Заключительным этапом работы по вводу АСР являются приемосдаточные испытания с участием заказчика.

В алгоритме не показаны работы по оформлению эксплуатационной документации (инструкции по эксплуатации, исполнительные принципиальные схемы, монтажные схемы и акт приемки-сдачи). Алгоритм может несколько изменяться, отдельные работы могут быть исключены.

В настоящем пособии рассмотрены вопросы расчета статических параметров настройки, реализации, проверки их на конкретных видах аналоговой аппаратуры АСР. Приведены примеры расчета и реализации параметров динамической настройки и их коррекции.

2. СТАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Под статической настройкой АСР принято понимать следующие операции:

- настройку измерительных цепей используемых в АСР параметров технологического процесса;
- обеспечение статической точности регулирования;
- отстройку (ликвидацию) пульсаций сигналов;
- определение соотношения сигналов;
- настройку диапазона задатчика.

Все перечисленные операции не связаны с динамикой технологического процесса, кроме операций ликвидации пульсации сигналов измеряемых параметров, используемых в АСР. Эта операция отнесена к статической настройке АСР скорее условно, она может быть выделена в отдельный пункт подготовки АСР к включению. Следует отметить, что использование тех или иных средств ликвидации пульсации сигналов сказывается на динамических характеристиках совокупности «объект регулирования–первичный измерительный преобразователь», сигнал которого приведен ко входу регулирующего устройства (узлу сравнения сигналов, используемых в данном регулирующем устройстве). Рассмотрим методы подавления пульсаций сигналов.

2.1. ЛИКВИДАЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ СИГНАЛОВ

Природа пульсаций сигналов параметров технологических процессов котло- и турбогенераторов может быть объяснена турбулентностью потоков рабочих сред, нестационарностью режимов на границе раздела рабочих сред, сложением колебаний потоков от вентиляторов (дутьевых, дымососов, мельниц-вентиляторов). Пульсация характеризует колебания параметра с некоторой амплитудой A и частотой ω (периодом T) около среднего значения. Значения A и ω можно выявить, наблюдая по показаниям контрольно-измерительных приборов или самопишущих регистраторов.

Стремление ограничить пульсации связано с использованием электрического исполнительного механизма постоянной скорости. Электрический двигатель, используемый в исполнительном механизме, имеет определенную допустимую частоту включения (чаще всего повторность включения ПВ = 40 %, т.е. 40 % времени двигатель работает, а 60 % остывает от нагрева протекавшими токами нагрузки и пусковыми). Этим объясняется ограничение числа включений электродвигателя 6 раз в минуту в стационарных режимах (изменение нагрузки менее 2...3 %) работы оборудования.

Пульсация сигналов отдельных параметров имеет различные амплитуду и период. Например, на котлоагрегате ТП-82 при измерении первичными измерительными преобразователями индукционного типа расходов пара, воды и уровня в барабане котла по вольтметру переменного тока получены следующие результаты: по расходу пара – амплитуда 7...10 мВ и период 3,5...4 с; по расходу воды – амплитуда 10...12 мВ и период 1,5...2 с; по уровню – амплитуда 12...15 мВ и период 2...3 с. Измерения проведены в стационарном режиме.

Достаточно часто пульсации сигналов превышают сигналы изменения параметров, что создает значительные трудности при автоматизации поддержания параметров технологического процесса стабильными.

На котле производительностью 560 т/ч при сжигании газа пульсация факела составляла 60...120 Гц; при сжигании мазута – 80...100 Гц; битуминозного угля – 20...60 Гц; бурого – 1...3 Гц.

Приведенные примеры показывают важность разработки методов подавления или уменьшения пульсаций.

Одним из простейших способов подавления пульсаций сигналов является электрический фильтр низких частот, состоящий из *RC*-цепи, где *R* представлено в виде переменного сопротивления (рис. 2.1).

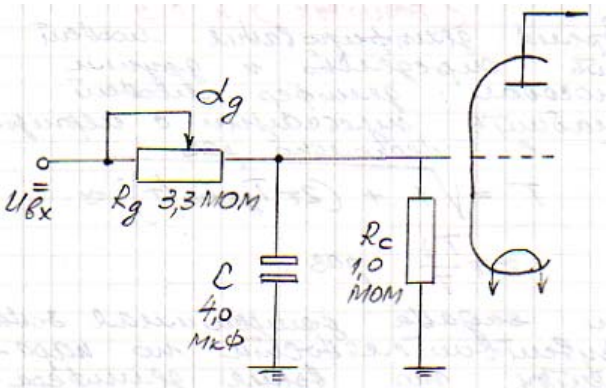


Рис. 2.1

Такой фильтр использовался в серийной аппаратуре ЭР-54, РПИК, РПИБ-62, Р25 («Контур-1»), он предполагал фильтрацию пульсаций параметров после узла суммирования и, следовательно, подавлял пульсации суммы всех сигналов, исходя из худшего по амплитуде пульсации сигнала, ухудшая динамические характеристики сигналов. Демпфер в несколько раз может ослабить их.

Передаточная функция демпфера:

$$W_{д}(s) = 1/(T_{д}s + 1),$$

где $T_{д} = 1{,}32\alpha_{д} \pm 0{,}04$; $\alpha_{д}$ – положение ручки потенциометра «Демпфер», $\alpha_{д}^{max} = 10$ дел.

При известных амплитуде A и частоте пульсации ω, задаваясь желаемым уровнем снижения амплитуды пульсаций N (раз), положение ручки «Демпфер» определяют из выражения:

$$\alpha_{д} = (N^2 - 1)^{1/2}/1{,}32\omega.$$

Время демпфирования может быть определено и другим способом: демпфер может ослабить пульсации с периодом T в несколько раз:

$$T = (1 + (2\pi T_{\text{демп}}/T)^2)^{1/2} \approx 2\pi T_{\text{демп}}/T.$$

Если задана допустимая зона нечувствительности по параметру, то время демпфера:

$$T_{\text{демп}} \approx 0{,}5TA/\Delta\sigma,$$

где A, T – параметры пульсаций; $\Delta\sigma$ – нечувствительность по параметру.

Размерность A и $\Delta\sigma$ в единицах регулируемой величины.

Дальнейшая реализация $T_{\text{демп}}$ зависит от параметров RC-цепи, потенциометр по R обычно имеет 10 дел.

$R_{\text{д}}^{\max}$ – переменное сопротивление в аналоговой аппаратуре в делениях:

$$\alpha_{\text{д}} = 10T_{\text{демп}}\ [\text{с}]/\ R_{\text{д}}^{\max} C\ [\text{мкФ}].$$

Положение ручки потенциометра «Демпфер» в аппаратуре аналоговых регуляторов МЗТА имеет максимальное значение:

$$T_{\text{демп}} = 3{,}3\ [\text{МОм}]\cdot 4{,}0[\text{мкФ}] = 13{,}2\ \text{с}.$$

Однако в аппаратуре ЭР, РПИ усиление в электронном блоке производилось с помощью двойного триода на лампе 6Ж4П, входное сопротивление относительно сетки 1 МОм, и в случае использования демпфера с $\alpha_{\text{д}} > 5$ дел входной сигнал начинал теряться, что потребовало гашения комбинированным способом. Для этой цели используют совместно демпфер и зону нечувствительности.

Методика заключается в следующем. Вводят «Демпфер» на 1 дел и наблюдают за органом оценки пульсаций (например, по индикаторам выхода регулятора «Больше меньше»). При продолжающихся пульсациях вводят «Демпфер» на 1 дел и снова оценивают гашение пульсаций. При неудовлетворительных результатах продолжают вводить «Демпфер» до 5 дел. Если это не дало результата, возвращают «Демпфер» на одно деление, а ручку потенциометра «Зона нечувствительности» вводят на 0,5 дел. Наблюдая поведение индикаторов выхода регулирующего прибора, и при отсутствии положительного резуль-

тата продолжают поочередно вводить ручки потенциометров «Демпфер» и «Зона нечувствительности» в указанном соотношении 1:0,5 до 5 дел. «Демпфера» и 2,5 дел. «Зоны нечувствительности». Последняя попытка проводится при положении потенциометра «Зона нечувствительности» на 5 дел.

При неудачном исходе переходят к гашению пульсаций с помощью гидравлических демпферов, устанавливаемых в одной или обеих импульсных линиях. В простейшем случае демпфер представляет собой шайбу из красной отожженной меди, толщина шайбы варьируется. Если простейший демпфер не дает результата, в отверстие шайбы вставляется капилляр с изменяемой длиной и диаметром (рис. 2.2):

$$L_{\text{др}}/d_{\text{др}} = 0{,}7(L_{\text{имп.л}}\,\Delta P/d^2_{\text{имп.л}})^{1/2},$$

где $L_{\text{др}}$ – длина дросселя, мм; $d_{\text{др}}$ – диаметр дросселя, мм; $L_{\text{имп.л}}$, $d_{\text{имп.л}}$ – длина и диаметр импульсной линии; ΔP – номинальный перепад давления датчика, Па.

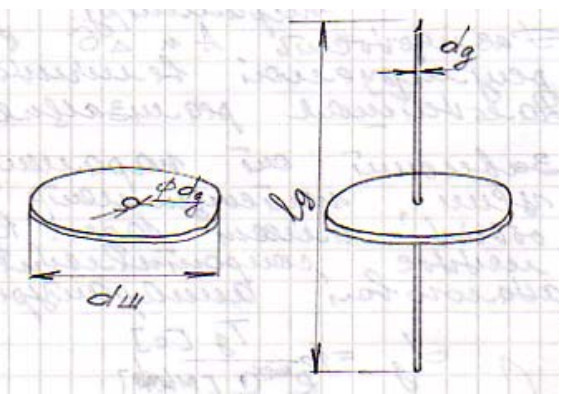


Рис. 2.2

Длина импульсных линий берется: суммарная в метрах, диаметр в миллиметрах. Гидравлические демпферы устанавливаются в импульсные линии под накидные гайки датчика. В качестве капилляра удобно использовать медицинские иглы, подбирая диаметр и длину. Длинная часть должна входить в импульсную линию, что позволяет избежать забивания шламом на длительное время.

2.2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Под статической точностью регулирования понимают точность поддержания регулируемого параметра при постоянной нагрузке и отсутствии возмущений на объект регулирования, она определяется зоной нечувствительности $\Delta\sigma$, измеренной в единицах регулируемого параметра.

2.2.1. В АСР стабилизации параметра принимают $\Delta\sigma$ равной половине допустимого отклонения регулируемого параметра $\sigma_{э\,max}$ при стационарном режиме, т.е. отклонение нагрузки менее 2...3 %

$$\Delta\sigma = 0{,}5\sigma_{э\,max}.$$

Например, в АСР разрежения вверху топки котла $\sigma_{э\,max} = 2$ кгс/м^2.

$$\Delta\sigma = 0{,}5 \cdot 2 = 1 \text{ кгс/м}^2.$$

2.2.2. При оценке статической точности в АСР, в которой регулируемый параметр может изменяться под действием задающего параметра, точность поддержания регулируемого параметра составляет 1...2 % от диапазона изменения

$$\Delta\sigma = 0{,}01...0{,}02\Sigma\sigma.$$

Например, для АСР воздуха и топлива $\Delta\sigma = 0{,}01...0{,}02\Delta V$.

$$\Delta V = V^{\text{рег}}\text{max} - V^{\text{рег}}\text{ мин}.$$

В АСР с жесткой обратной связью

$$\Delta H = 0{,}02...0{,}05\Sigma\Delta H_{\text{ст}}.$$

$\Delta H_{\text{ст}} = \pm 150$ мм. в. ст. в АСР уровня в подогревателях высокого давления; $\Delta H = 0{,}02 \cdot 300 = 60$ мм. в. ст.

В АСР, использующих регулирующие органы с импульсным выходом, выбранная статическая точность определяется соотношением между коэффициентом масштабирования сигнала регулируемого параметра m_σ и зоной нечувствительности Δ регулирующего устройства, определяемого положением ручки соответствующего органа на-

стройки, шкала которого оцифрована в процентах номинального значения входного сигнала

$$\Delta = \sigma\gamma_\sigma\Delta\sigma,$$

где Δ – [%]; σ – ед. рег. пар.; γ_σ – %/ед. рег. пар.

Если в регулирующем устройстве установлена Δ, может быть определено значение регулируемого параметра σ.

γ_σ – коэффициент преобразования первичного измерительного преобразователя.

2.3. НАСТРОЙКА СТАТИЧЕСКОГО СООТНОШЕНИЯ СИГНАЛОВ

При подаче на вход регулирующего устройства двух или больше сигналов необходимо обеспечить правильное соотношение сигналов, исходя из требований технологического процесса и задач АСР.

Учитывая схему организации измерения сигнала задающего параметра датчиком (первичным измерительным преобразователем), легче всего обеспечить нужные соотношения сигналов с помощью коэффициента масштабирования сигнала задающего параметра, исходя из равенства сигналов на входе в регулирующее устройство (РУ) при установке требуемого по технологии соотношения параметров в любой точке регулируемого диапазона при отсутствии сигнала задатчика.

Условие равенства сигналов на входе в РУ имеет вид:

$$K_{\text{рп}}K^{\text{д}}_{\text{рп}}\,\Delta\sigma_{\text{рп}} = K^{\text{д}}_{\text{зп}}\Delta\sigma_{\text{зп}}\,.$$

Коэффициенты преобразования датчиков известны из технической документации на датчик или могут быть определены экспериментально.

$\sigma_{\text{рг}}$, $\sigma_{\text{зп}}$ – соответственно регулируемый и задающий параметр, измеряемые в физических величинах. Диапазоны изменения регулируемого параметра $\Delta\sigma_{\text{рп}}$ и задающего параметра известны из режимной карты или другой технической документации. Если в схеме используется задающее воздействие, коэффициент масштабирования задающего воздействия $K_{\text{зв}}$ находят из условия равенства сигналов на входе в регулятор нижнего уровня

$$K_{\text{пп}}K^{\text{и}}_{\text{пп}}\,\Delta\sigma_{\text{пп}} = K_{\text{зв}}\,\Delta\sigma_{\text{зв}},$$

где $K_{пп}$ – коэффициент масштабирования; $K^{и}_{пп}$ – коэффициент передачи цели промежуточного регулируемого параметра; $\Delta\sigma_{пп}$ – диапазон изменения промежуточного регулируемого параметра; $\Delta\sigma_{зв}$ – диапазон задающего воздействия.

Задающее воздействие имеет место в каскадных АСР (со стабилизирующим регулятором, со следящим регулятором, с двумя корректирующими регуляторами).

Для схемы с устройством умножения условия равенства сигналов на входе в РУ нижнего уровня определяются выражением

$$K_{пп}K^{и}_{пп}\,\Delta\sigma_{пп}=0{,}01K_{зв}\,K^{и}_{зв}\,\Delta\sigma_{зп}\Delta\sigma_{зв},$$

где 0,01 – постоянный коэффициент множительного устройства.

Задающее воздействие $K_{зв}$ может быть двух видов:

- автоматическим, например, выходным сигналом корректирующего регулятора, изменяющимся в зависимости от $\sigma_{рп}$ и контролируемым по указателю выхода РУ с непрерывным выходным сигналом. Требуемый диапазон изменения этого сигнала может быть ограничен средствами выхода РУ;
- ручным $\sigma_{зр}$, задаваемым вручную оператором и контролируемым по шкале задатчика.

Диапазоны изменения этих воздействий должны быть равны.

Обычно принимают

$$\Delta\sigma_{зв}=\Delta\sigma_{за}=\Delta\sigma_{зр}=100\ \%.$$

В схеме с вводом возмущения коэффициент масштабирования сигнала $\sigma_{в2}$:

$$K_{пп}K^{и}_{пп}\,\Delta\sigma_{пп}=K_{в2}\,K^{и}_{в2}\,\Delta\sigma_{в2}.$$

После расчета значений коэффициентов масштабирования необходимо их проверить в нескольких точках регулируемого диапазона: на объекте устанавливают соответствующий режим и проверяют величину сигнала рассогласования на входе в регулятор. Если сигнал рассогласования больше зоны нечувствительности РУ, его уменьшают, корректируя положение органа масштабирования.

2.4. НАСТРОЙКА ДИАПАЗОНА ДЕЙСТВИЯ ЗАДАТЧИКА

Диапазон действия задатчика равен изменению сигнала задатчика при перемещении его из одного крайнего положения в другое и может быть измерен на входе в РУ вольтметром ($\Delta U_{зд}$) или выражен в процентах ($\Delta\sigma_{зд}$).

Диапазон действия задатчика настраивают по требуемому диапазону изменения регулируемого параметра, которое необходимо получить в результате изменения задания регулятору ($\Delta\sigma_{зд}$):

$$\Delta\sigma_{зд} = \sigma_{рп}^{max} - \sigma_{рп}^{min},$$

где $\sigma_{рп}^{max}$, $\sigma_{рп}^{min}$ – максимальное и минимальное значения регулируемого параметра, устанавливаемое задатчиком регулятора.

Необходимое изменение сигнала задатчика можно определить из условий:

$$\Delta\sigma_{зд} = K_{рп} K_{рп}^{и} \Delta\sigma_{зд}$$

или

$$\Delta U_{зд} = 0{,}01 U_{ном} \Delta\sigma_{зд}.$$

В аппаратуре ГСП диапазон действия задатчика ($\Delta U_{зд}$ или $\Delta\sigma_{зд}$) может быть постоянным или его можно изменять с помощью масштабирования.

При отсутствии органов масштабирования сигнала задатчика $\Delta\sigma_{зд}$ при известном значении $K_{рп}$ может быть найдено из приведенных выше выражений.

Цена деления шкалы задатчика в единицах измерения регулируемого параметра равна:

$$Z = \Delta\sigma_{зд}/n,$$

где n – число делений шкалы задатчика.

Если по желанию операторов необходимо изменить цену деления задатчика, следует определить $K_{рп}$ по желаемой величине $\Delta\sigma_{зд}$ и проверить зону нечувствительности.

Обычно $\Delta\sigma_{зд}$ по величине определяется технологическим значением и допустимым диапазоном изменения регулируемого параметра, с учетом удобства цены деления. Не следует задаваться очень боль-

шим значением $\Delta\sigma_{зд}$, так как при этом снижается точность установки заданного значения регулируемого параметра.

Если аппаратура регулирования имеет органы масштабирования сигнала задатчика, рекомендуется следующая очередность настройки органа масштабирования:

- задаются значением $\Delta\sigma_{зд}$;
- по приведенным выражениям определяют $\Delta U_{зд}$; при среднем положении задатчика и выведенных в нулевые положения органах настройки всех коэффициентов масштабирования, кроме коэффициента масштабирования сигнала задатчика $K_{зд}$;
- подбирают настройку органа масштабирования $K_{зд}$, чтобы при повороте ручки задатчика из среднего положения в одно и другое крайнее положение изменение напряжения на выходе измерительного устройства составляло половину $\Delta U_{зд}$ разных знаков (симметричное изменение).

Существует экспериментальный метод настройки выбранного диапазона действия задатчика $\Delta\sigma_{зд}$:

- определяют цену деления задатчика;
- при среднем положении ручки задатчика и при текущем значении $\sigma_{рп}$ балансируют измерительное устройство регулятора;
- перемещая регулирующий орган дистанционно, изменяют регулируемый параметр на возможно большее значение $\Delta\sigma_{рп}$ и определяют положение ручки задатчика, соответствующее новому значению $\Delta\sigma_{рп}$:

$$\Delta n = \Delta\sigma_{hg}/Z,$$

где Z – изменение числа делений поворота ручки задатчика от среднего положения;

- устанавливают ручку задатчика в требуемое положение и напряжение небаланса на выходе измерительного устройства компенсируют изменением $U_{зд}$;
- проверяют балансировку измерительного устройства при первоначальном значении $\sigma_{рп}$ и среднем положении ручки задатчика (при необходимости повторяют две последние операции), затем проверяют симметричность действия задатчика.

3. АНАЛОГОВЫЕ РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Объекты регулирования теплоэнергетических процессов представляют регулируемые участки технологических процессов подготовки рабочих сред для генерации и перегрева пара с целью получения тепла и электроэнергии для обеспечения потребителей.

На рис. 3.1 показана структурная схема автоматической системы регулирования (АСР) одного из этих регулируемых участков.

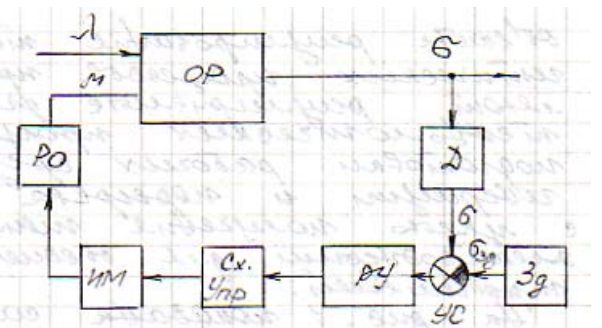


Рис. 3.1

На рисунке: ОР – объект регулирования; Д – датчик (первичный измерительный преобразователь); Зд – задатчик; РУ – регулирующие устройство; Сх. упр. – электрическая схема управления; ИМ – исполнительный механизм; Ро – регулирующий орган; УС – устройство суммирования; σ – регулируемый параметр; $\sigma_{зд}$ – задающий параметр; λ – возмущение; μ – регулирующее воздействие.

Выходным параметром такой АСР σ может быть давление, расход, уровень, температура и т.д. С целью контроля протекания технологических процессов эти параметры должны быть измерены и показаны оператору, ведущему эти процессы. Учитывая, что одной из выходных величин общего технологического процесса является электроэнергия, целесообразно использовать ее в качестве вспомогательной энергии для изменения положения регулирующих органов. Этому способствует то обстоятельство, что большинство рабочих сред на тепловой электростанции не отличается агрессивностью и взрывоопасностью. Это предопределило использование в качестве привода регули-

рующих органов исполнительных механизмов, состоящих из электрического двигателя и редуктора. Управление исполнительным механизмом осуществляется с помощью электрических сигналов через схему управления. Следовательно, выработку управляющих сигналов удобно производить с помощью регулирующих устройств электрического типа, учитывая, что все необходимые операции по выработке управляющих сигналов очень просто выполнять с помощью электрических схем.

Измерение неэлектрических параметров технологических процессов просто и удобно производить электрическими методами.

Таким образом, вся главная обратная связь АСР может быть реализована с помощью электрических схем.

Это и предопределило создание электрических регулирующих устройств. Московский завод тепловой автоматики и ВТИ в 1948–1953 гг. разработали и внедрили в производство серию электрических устройств, формирующих определенные законы регулирования. Создатели этой серии, получившей название ЭР-54 (Е.П. Стефани и др.), были удостоены Сталинской Государственной премии. Практически 50-летний опыт использования электрических аналоговых (в отличие от используемых в настоящее время цифровых) регуляторов подтвердил правильность технологических решений в этой области. Электрические регуляторы успешно внедрены в теплоэнергетике, металлургии, химической промышленности и других отраслях хозяйства.

Пятидесятилетний успешный опыт внедрения позволил усовершенствовать эту аппаратуру и создать гамму электрических устройств, решившую все вопросы реализации созданных к этому времени технологических структур автоматизации теплоэнергетических процессов.

На рис. 3.2 представлена гамма электронных регулирующих устройств, выпускавшаяся московскими заводами МЗТА и «Комета».

Датчики (ПИП)	ДМ, ДММ	ЧМ	МДМ, ДТТ, ИБМ	ТХА, ТЖК, ТС
Формирующие	ЭР-III-59	ЭР-Т-59	ЭР-Т2-59	
сигналы приборы	ЭР-С-59	ЭР-ПИ-59	ЭКП-3/6	
Служебные при-		ЭОС-И-58	РП	
боры	ЭД-Т-58	ЭОС-Т-58	ЭСП	
Вспомогательные	ЗРУ	БПУ, РУП,		
приборы		ДУП	СНЭ-120-1	

Рис. 3.2

На рис. 3.6 показана структурная схема релейного регулятора, у которого исполнительный механизм не охвачен обратной связью. Передаточная функция регулятора при учете релейной характеристики как линейного звена может быть представлена как ПД-функция, которая в последовательном соединении с И-звеном (исполнительный механизм) дает ПИ-закон регулирования.

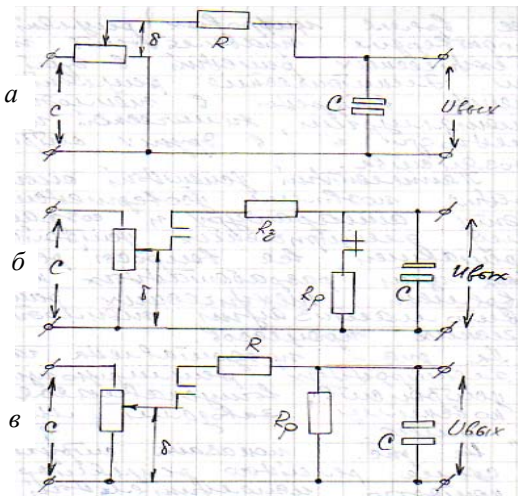


Рис. 3.3

С учетом принятой структуры в ПД-звене передаточная функция описывается обратной связью в виде апериодического звена.

Невозможность получения небольших значений коэффициента усиления регулятора при больших временах интегрирования вызвала появление схем обратной связи с полностью или частично независимыми цепями заряда и разряда конденсатора *C*. Такие схемы показаны на рис. 3.3, *б*, *в*. Приведенная на рис. 3.3, *а* схема имеет $T_1 = RC$, а если учесть последовательно включенное интегрирующее звено (исполнительный механизм), передаточная функция регулятора будет

$$W(p) = \frac{K_1}{1 + \dfrac{K_1 \delta_р}{T_и p + 1}} \frac{1}{T_{им} p} = \frac{K_р (T_и p + 1)}{T_и p} \frac{1}{(1+S)\left(\dfrac{S T_и}{S+1} p + 1\right)},$$

где $K_{\text{р}} = \dfrac{T_{\text{и}}}{\delta_{\text{р}} T_{\text{им}}}$; $S = \dfrac{1}{K_1 \delta_{\text{р}}} = \dfrac{T_{\text{им}} K_{\text{р}}}{T_{\text{и}} K_1}$ – балластное звено имеет коэффициент усиления $1/(1 + S)$ и постоянную времени $ST_{\text{и}}/(1+S)$, т.е. при увеличении времени интегрирования увеличивается и коэффициент пропорциональности (усиления) регулятора.

Схемы рис. 3.3, *б*, *в* отличаются только НЗ контактом реле, отключающим сопротивление разряда $R_{\text{р}}$ при заряде конденсатора C.

Разряд в обеих схемах только через сопротивление $R_{\text{р}}$, передаточная функция обратной связи при разряде конденсатора (когда реле отключено) имеет вид:

$$W_{\text{р}}(p) = \frac{1}{T_{\text{р}} p + 1},$$

где $T_{\text{р}} = R_{\text{р}} C$.

При заряде конденсатора передаточная функция цепи может быть записана в виде:

$$W_{\text{з}}(p) = \frac{\delta}{(1+\eta)(T_{\text{з}} p + 1)},$$

где $T_{\text{з}} = \dfrac{R_{\text{з}} C}{1+\eta}$; $\eta = \dfrac{R_{\text{з}}}{R_{\text{р}}}$.

Таким образом, для обеих схем рис. 3.3, *б*, *в* передаточные функции отличаются только параметрами:

$$W_{\text{з}} = \frac{\delta_{\text{р}}}{(T_{\text{з}} p + 1)},$$

что позволяет определить параметры настройки из выражений:

$$K_{\text{р}} = \frac{T_{\text{з}}}{T_{\text{им}} C \delta_{\text{р}}};$$

$$T_{\text{и}} = T_{\text{р}}.$$

Из этих зависимостей очевидно, что параметры настроек взаимно независимы. Независимые цепи заряда и разряда позволяют увеличить диапазоны изменения параметров настроек.

Изменение коэффициента пропорциональности выполняется не уменьшением доли напряжения в цепочке обратной связи ($C\delta_{\text{р}}$), а только изменением $T_{\text{з}}$. Значение $C\delta_{\text{р}}$ поддерживается всегда на максимальном уровне. Это позволяет уменьшить отклонение динамических характеристик регулятора от линейной модели.

В отечественных релейных ПИ-регуляторах цепи разряда и заряда конденсатора обратной связи и исполнительного механизма управляются одним и тем же релейным элементом.

В цепи обратной связи релейных элементов включается устройство, получившее название «Длительность импульса». Назначение его – отключение реле раньше того момента, когда напряжение на конденсаторе обратной связи в структурной схеме релейного ПИ-регулятора компенсирует величину входного сигнала.

На рис. 3.4 приведена схема обратной связи с устройством «Импульс».

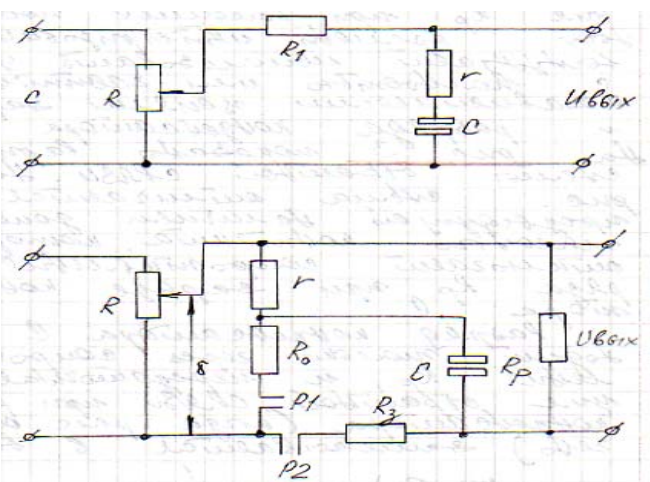


Рис. 3.4

Приближенно можно считать, что влияние устройства «Импульс» идентично уменьшению зоны возврата на величину

$$\Delta U \cong C\delta r\left(\frac{1}{R_0 + r} + \frac{1}{R_3 + r}\right),$$

при включении реле полный скачок напряжения:

$$\Delta U = \frac{C\delta r}{R_1 + r}.$$

Технический прогресс в области технических средств позволил усовершенствовать формирующие и измерительные блоки и устранить выявленные в процессе накопления опыта недостатки.

В блоке ЭР-54 использовалась поляризованное реле с так называемым электрическим нейтральным нулем. Поляризованное реле отличается небольшим потреблением и высоким быстродействием. Однако оно обладает одним существенным недостатком: настройка этого реле неустойчива. Реле было заменено сначала на кодовое реле в электронном формирующем блоке РПИК-62, затем в варианте бесконтактного блока РПИБ число ламп было уменьшено до одной; но был введен полупроводниковый каскад усиления в измерительную схему. Последняя выполнялась в виде отдельных измерительных блоков в соответствии с используемыми датчиками.

Использование других реле потребовало применение модулятора, а затем и триггера в качестве релейной схемы. Эти усовершенствования привели к созданию новой гаммы аппаратуры, которая приведена на рис. 3.5.

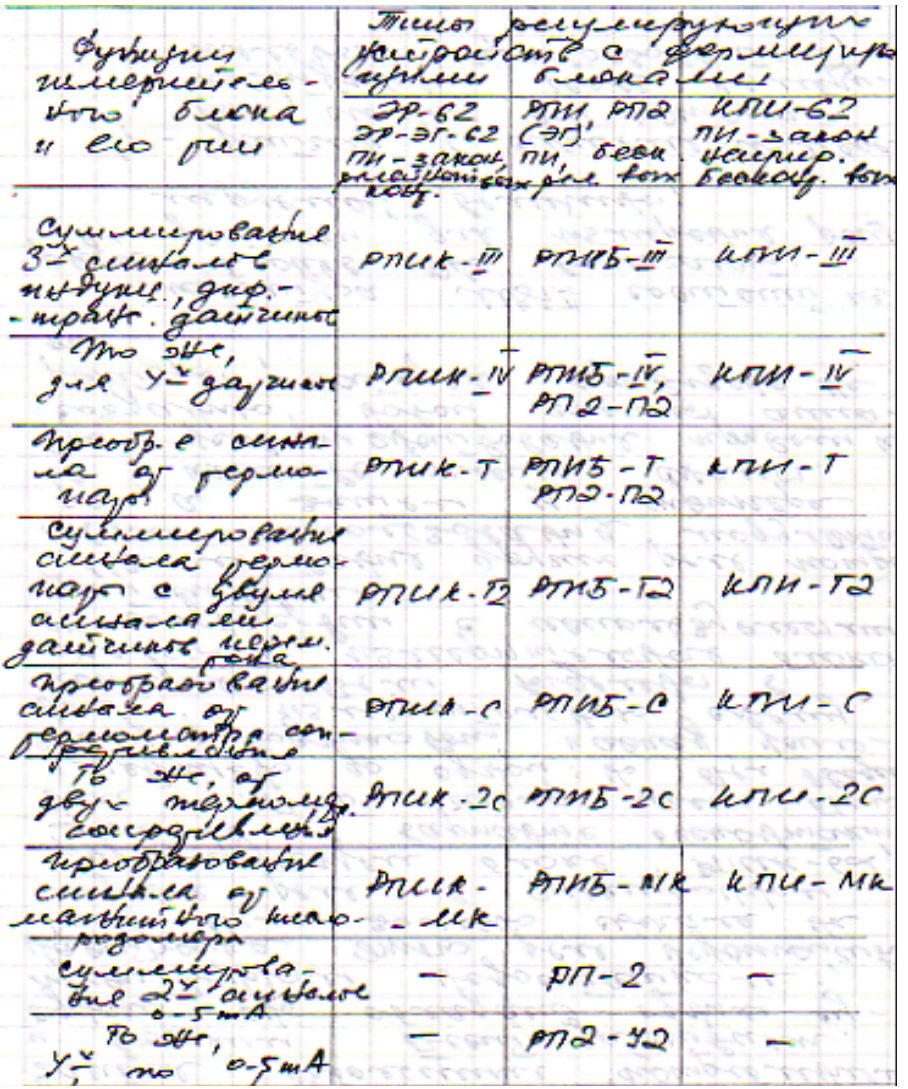
Аппаратура МЗТА состоит из ряда блоков. Она включает:

1 – датчики для измерения регулируемой величины;

1_1 – датчик в системе измерения, сигнал от которого поступает через измерительный преобразователь;

2 – измерительный преобразователь с унифицированным сигналом на выходе;

3 – измерительные блоки, выполняющие алгебраическое суммирование масштабированных сигналов от датчиков, сравнение с заданным



Функциональное назначение блока и его ГСП	Типы регулирующих устройств с формирующими блоками		
	ЭР-62 ЭР-ЭГ-62 ПИ-закон электропневмат.	РПИ, РП2 (ЭП), ПИ, бесконт.	КПИ-62 ПИ-закон интегр. бесконт.
Суммирование 3 сигналов пульс., дифф-трансф. датчиков	РПИК-III	РПИБ-III	КПИ-III
То же, для 4 датчиков	РПИК-IV	РПИБ-IV, РП2-П2	КПИ-IV
Преобр. сигнала от термопар	РПИК-Т	РПИБ-Т РП2-П2	КПИ-Т
Суммирование сигнала термопар с двумя сигналами датчика перем. тока	РПИК-Т2	РПИБ-Т2	КПИ-Т2
Преобразование сигнала от термометра сопротивления	РПИА-С	РПИБ-С	КПИ-С
То же, от двух термометров сопротивления	РПИК-2С	РПИБ-2С	КПИ-2С
Преобразование сигнала от магнитного газоанализатора	РПИК-МК	РПИБ-МК	КПИ-МК
Суммирование 2 сигналов 0-5 мА	—	РП-2	—
То же, 4 по 0-5 мА	—	РП2-Ч2	—

Рис. 3.5

значением регулируемого параметра и формирование сигнала ошибки в форме напряжения унифицированного вида в данной системе;

4 – формирующие блоки усиления сигнала ошибки и формирования выходного сигнала по заданному закону регулирования (рис. 3.6);

5 – исполнительные усилители выходного сигнала формирующего блока до уровня, достаточного для управления электродвигателем исполнительного механизма;

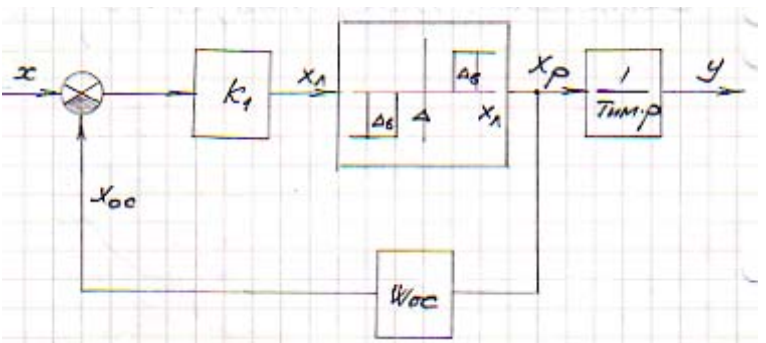


Рис. 3.6

6 – исполнительные механизмы для перемещения регулирующего органа;

7 – дополнительные блоки для расширения возможностей системы;

7_1 – задатчик регулятора;

7_2 – датчик обратной связи по положению регулирующего органа, который позволяет сформировать П-закон регулирования;

7_3 – указатель положения выходного вала исполнительного механизма;

7_4 – прибор для синхронизации положения двух исполнительных механизмов.

Схема взаимодействия блоков аппаратуры МЗТА и гамма дополнительных блоков приведены на рис. 3.7.

Номенклатура служебных блоков и номенклатура дополнительных блоков аппаратуры МЗТА показаны на рис. 3.8, 3.9.

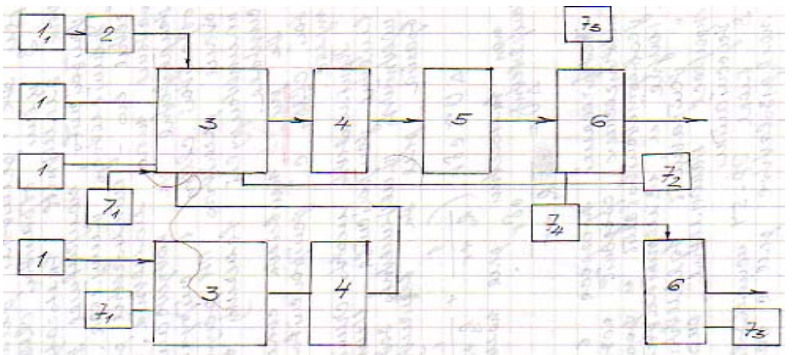
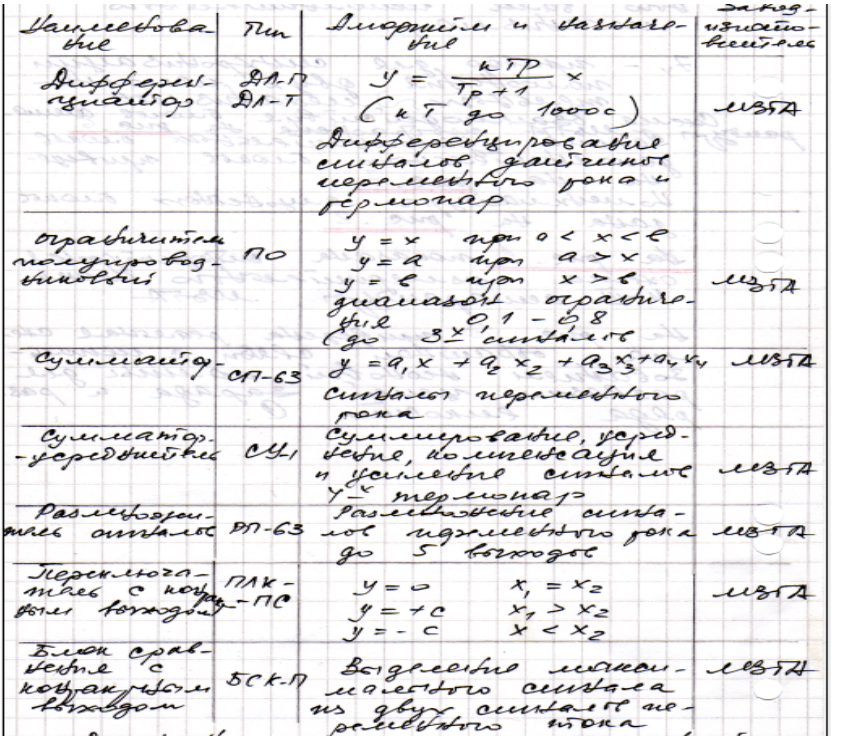


Рис. 3.7

Наименование	Тип	Назначение	Завод-изготовитель
Программный задатчик	ПД-44УМ-1	$y = f(t)$, выход 0-5 mA, время до 72 часов	ЭЧИМ
Указатель положения выходного исполнительного механизма	ИПУ ДУП-К ДУП-Б	Стрелочный прибор на лицевом операторе	МВТА ЭЧИМ
Задатчик регулятора	ЗР-1 ЗР-2 ЗР-3	Изменение задания оператору	МВТА
Блок управления регулятора	БУ21 БУ12	Импульсный сигнал, пропорциональный "Аб.", "Доп.", "Отк." (УВМ) переключатель типа БУ12 с указ. положения и сбоя с задатчиком	МВТА

Рис. 3.8



Наименование	Тип	Алгоритм и назначение	Завод-изготовитель
Дифференциатор	ДЛ-П ДЛ-Т	$y = \frac{kTp}{Tp+1} x$ (kT до 1000 с) Дифференцирование сигналов датчиков перемещения рука и термопар	МЗТА
Ограничитель полупроводниковый	ПО	$y = x$ при $0 < x < e$ $y = a$ при $a > x$ $y = e$ при $x > e$ диапазон ограничения до $3^{x}_{0,1-0,8}$ сигналов	МЗТА
Сумматор	СП-63	$y = a_1 x + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4$ сигналов перемещения рука	МЗТА
Сумматор-усреднитель	СУ-1	Суммирование, усреднение, компенсация и усиление сигналов $y-x$ термопар	МЗТА
Размножитель сигналов	РП-63	размножение сигналов перемещения рука до 5 выходов	МЗТА
Переключатель с конечным выходом	ПЛК-ПС	$y = a$ $x_1 = x_2$ $y = +c$ $x_1 > x_2$ $y = -c$ $x < x_2$	МЗТА
Блок сравнения с контактным выходом	БСК-П	Выделение максимального сигнала из двух сигналов перемещения рука	МЗТА

Рис. 3.9

На рис. 3.10 приведена реальная схема обратной связи с использованием неоновой лампы для развязки цепей заряда и разряда емкости *C*.

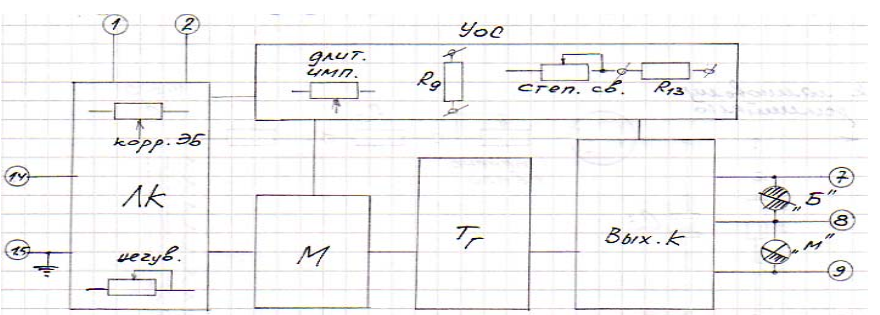


Рис. 3.10

На рис. 3.11 показана структурная схема измерительного блока И-III аппаратуры МЗТА.

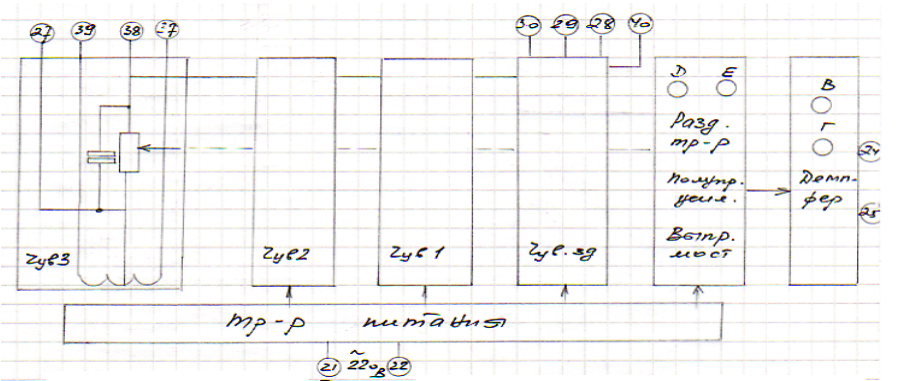


Рис. 3.11

3.1. АППАРАТУРА «КАСКАД» (МЗТА)

С началом внедрения Государственной системы приборов (ГСП), включавшего переход на унифицированный сигнал постоянного тока, потребовалось создать комплекс аппаратуры, работающей с унифицированным сигналом.

В системе Минприборостроения сразу две организации занимались разработкой штатных систем: Московский завод тепловой автоматики (МЗТА) и НИИтеплоприбор.

МЗТА разработал и начал выпускать в 1975–1976 гг. серию аппаратных средств регулирования «Каскад», основанную на применении транзисторных усилителей постоянного тока. Система ориентирована на использовании сигнала 0...5 мА как отдатчиков и нормирующих преобразователей, так и между отдельными блоками системы. Регулирующие блоки могут принимать сигнал 0...20 мА.

В состав системы входила следующая номенклатура:

- регулирующие блоки: аналоговый Р12, релейный Р21, импульсатор Р33;
- блоки ввода информации от датчиков: суммирования А01, измерительный И04; умножения А31, деления А32, извлечения корня А33;

• функциональные блоки: дифференцирования Д01, динамического преобразования Д03, ограничения Н02, аналого-релейный преобразователь Л02;

• служебные устройства; задающее токовое ЗУ05, потенциометрическое ЗУ; блоки управления аналогового регулятора БУ12, релейного – БУ21; устройство защитное В01; блоки указателей В12, согласующих приставок В21.

3.1.1. Блок регулирующий аналоговый Р12

Блок работает в комплекте с позиционерами как аналоговый регулятор или как корректирующий. Без них он имел три исполнения по скорости протекания процессов в объекте и формировал ПИД-закон регулирования с ограничением выходного сигнала $y(p)$:

$$y(p) = \frac{K_{\text{п}}}{1 + T_{\text{демп}} p} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}}} + T_{\text{д}} p \right) x(p) .$$

Все входы гальванически связаны, выход–вход – гальванически разделены. Регулятор имеет устройство безударного перевода из режима ручного управления.

Блок построен на усилителях УВ21, УВ22 и релейном элементе, для цепей обратных связей, формирующих закон регулирования (рис. 3.12).

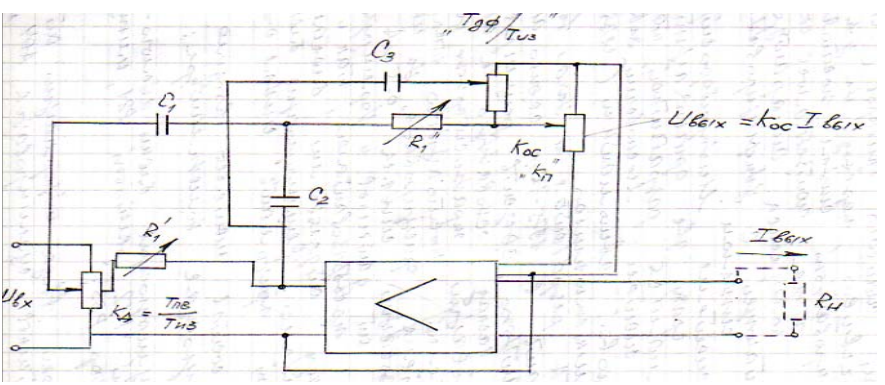


Рис. 3.12

3.1.2. Блок регулирующий релейный Р21

Формирует ПИ-закон регулирования:

$$y(p) = \frac{K_{\text{п}}}{1 + T_{\text{демп}} p}\left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} p}\right) x(p).$$

Взаимонезависимые параметры настройки:

$V_{\text{св}}$ – скорость связи;

$T_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования;

$\Delta_{\text{неч}}$ – зона нечувствительности;

$t_{\text{и}}$ – длительности импульсов.

Коэффициент пропорциональности регулятора:

$$K_{\text{р}} = \frac{1}{V_{\text{св}} T_{\text{им}}},$$

где $T_{\text{им}}$ – время полного перемещения выходного вала исполнительного механизма.

Функциональная схема блока Р21 содержит измерительную цепь, прямой канал из усилителя и трехпозиционного релейного усилителя, главную и дополнительную обратные связи, источник питания и сигнальные лампочки (рис. 3.13).

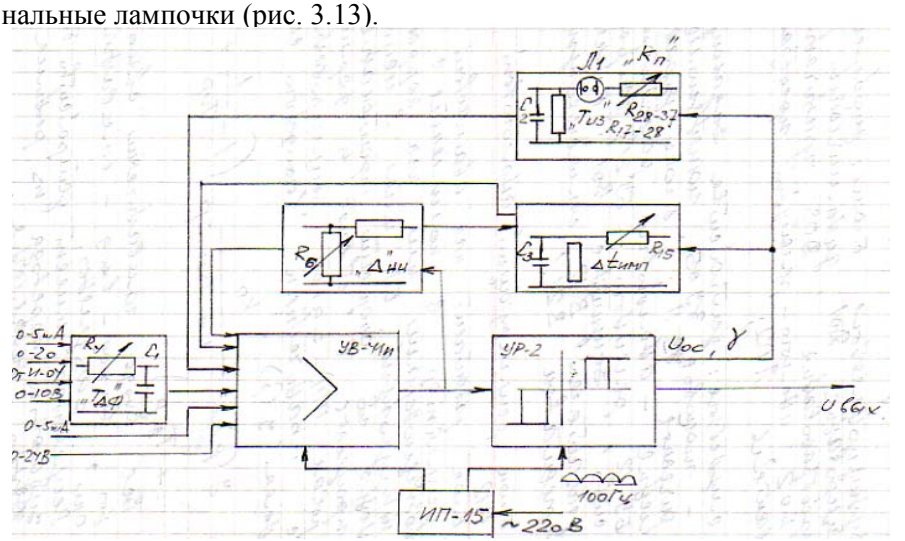


Рис. 3.13

Токовые сигналы преобразуются в сигналы напряжения, которые суммируются, и результирующий сигнал усиливается операционным усилителем и подается на трехпозиционный релейный усилитель, на выходе установлены тиристорные ключи.

3.1.3. Импульсатор Р33

Алгоритм действия импульсатора:

$$Q = t_{\text{и}} / T = K_{\text{п}}(K_1 x_{\text{вх1}} + x_{\text{вх2}}),$$

где Q – скважность выходных импульсов; K_1 – масштабатор; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности.

$$f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}} = \frac{1}{2t_{\text{и}}}.$$

В приборе имеется автоподстройка $K_{\text{п}}$.

Функциональная схема импульсатора содержит измерительную цепь, узлы гальванической развязки, которые питаются от генератора; операционный усилитель; выходной транзистор, сигнальную лампу, источник питания и блок реле.

Автоподстройка осуществляется замыканием одной из внешних пар зажимов 4-5, 6-7, 8-9.

3.1.4. Блок дифференцирования Д01

Блок выполняет операцию реального дифференцирования:

$$y(p) = \frac{K_{\text{д}}}{1 + T_{\text{демп}} p} \frac{T_{\text{др}} p}{1 + T_{\text{др}} p}.$$

Возможен режим только демпфера.

Функциональная схема Д включает измерительную цепь, операционный усилитель, источник питания и смещения (рис. 3.14).

Все входы и выходы гальванически связаны.

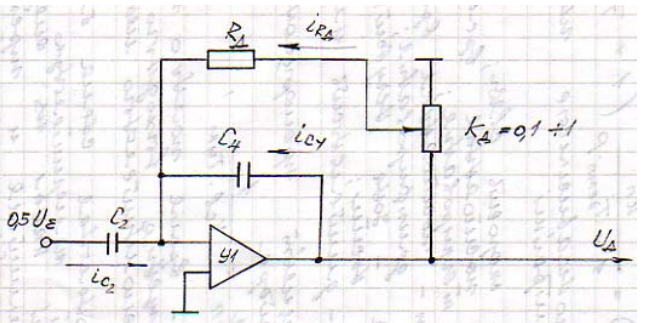


Рис. 3.14

3.1.5. Блок динамического преобразования Д03

В зависимости от настройки блок может быть:

- реальным дифференцирующим звеном:

$$y(p) = \frac{K_{\text{вх}} K_0 T_0 p}{1 + T_0 p} x(p);$$

- идеальным дифференцирующим звеном:

$$y(p) = K_{\text{вх}} T_0 p x(p);$$

- интегрирующим звеном:

$$y(p) = \frac{K_{\text{вх}}}{T_0 p} x(p);$$

- пропорциональным звеном:

$$y(p) = K_{\text{вх}} K_0 = K_{\text{п}}.$$

Блок имеет возможность демпфирования входного сигнала и ограничения выходного по нижнему и верхнему уровню.

Функциональная схема блока включает измерительную цепь, узел гальванического разделения, панель выбора закона преобразования, операционный усилитель, ограничитель, источник питания и блок реле для дистанционного изменения параметров настройки.

Имеется возможность трех ступеней автоподстройки коэффициента усиления K_0 и постоянной времени T_0.

Входы гальванически связаны между собой, а вход–выход разделены.

3.1.6. Аналого-релейный преобразователь Л02

Блок является логическим устройством, преобразующим аналоговый сигнал в релейный сигнал, соответствующий переключению контактов электромагнитного реле, либо в релейный сигнал напряжения постоянного тока.

Блок выполняет функцию сравнения одного аналогового сигнала с другим или сравнение аналогового или алгебраической суммы нескольких сигналов с сигналом встроенного задатчика:

$$(K_{\text{п}} X_{\text{вх1}} + X_{\text{вх2}} + X_{\text{вх3}}) < (X_{\text{зд}} + h),$$

где h – зона возврата.

При сумме сигналов больше $X_{\text{зд}}$ состояние выходных ключей изменяется: выходной сигнал по напряжению равен 24 В, выходные реле переключаются.

Функциональная схема включает измерительную цепь, узлы гальванического разделения и питающий их генератор, компаратор, узел задатчика, выходной усилитель, сигнальную лампу, выходные реле и источник питания.

Входы и выходы гальванически разделены.

3.1.7. Задающие устройства ЗУ11 и ЗУ05

ЗУ11 представляет собой потенциометр, реализующий поворот угла ручки потенциометра в изменение сопротивления. В ЗУ05 дополнительно имеется источник стабилизированного напряжения, транзисторный усилитель, источник питания. Выходной сигнал ЗУ05 – токовый сигнал.

3.1.8. Устройство защитное В01

Оно служит для защиты токовой цепи от разрыва линии при подключении к датчику более чем одного потребителя. Оно состоит из стабилитрона КС156 с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Пороговые напряжения стабилитрона –5,6 и 0,6 В. В стабилитроне ток при напряжении выше порогового (5,6 В) определяется параметрами внешней цепи, а ниже порогового – ток равен нулю.

3.1.9. Блок указателей В12

Блок содержит миллиамперметр с нулем в крайнем положении и вольтметр с нулем в середине шкалы.

Амперметр служит для измерения тока 0...5 мА, а вольтметр (микроамперметр ±20 мкА с добавочным резистором) – для контроля сигнала рассогласования на входе регулирующих блоков ±25 %.

3.1.10. Блок согласующих приставок В21

Он предназначен для согласования релейных блоков с активно-индуктивной нагрузкой. Блок содержит три приставки, гальванически развязанных, вход–выход одной приставки не изолирован. Приставки улучшают динамические свойства регулятора при включении на выход регулятора магнитных пускателей или усилителей.

3.2. КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ «КАСКАД-2» МЗТА

Совершенствование элементной базы в конструкциях средств регулирования, в частности переход от автогенераторных усилителей к операционным, к этому времени хорошо зарекомендовавших себя в аппаратуре для малых котельных «Контур-1», привело к созданию в середине 1990-х годов аппаратуры «Каскад-2», на операционных усилителях. Номенклатура приборов была значительно расширена.

В комплекс входят:

- функциональные блоки: регулирующий аналоговый с непрерывным выходным сигналом Р17 и его модификации Р17.1, Р17.2, Р17.3; регулятор с импульсным выходом Р27 и его модификация Р27.1, Р27.3, Р27.3, Р28 (с автоподстройкой;
- устройства ввода сигналов: суммирование и ограничение А05; ограничение и размножение А06;
- дополнительные блоки: вычислительных операций А35; аналого-релейного преобразования Л03 и его модификация Л03.1, Л03.3; динамического преобразователя Д05 и его модификация Д05.1, Д05.3, Д06 (с автоподстройкой), интегрирования Д07; нелинейных преобразований Н05.

3.2.1. Регулирующий аналоговый блок с непрерывным выходным сигналом Р17

Функциональная схема регулирующего модуля Р017.1 приведена на рис. 3.15.

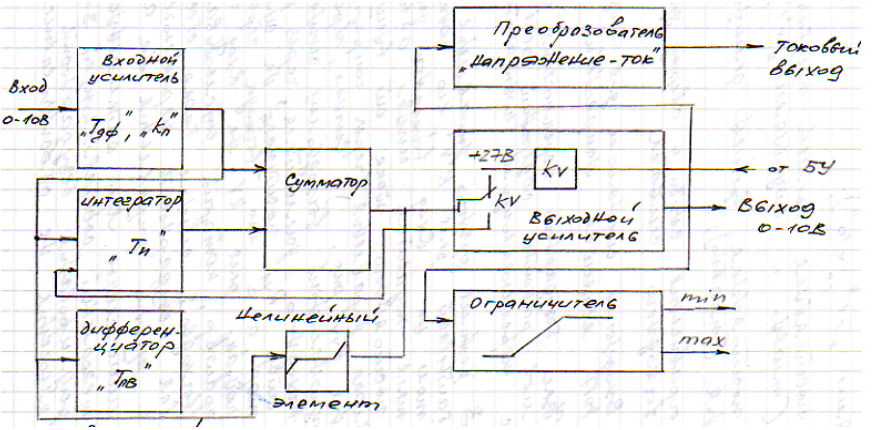


Рис. 3.15

Модуль включает входной усилитель, интегратор, дифференциатор, нелинейный элемент, сумматор, выходной усилитель, преобразователь напряжения в ток, ограничитель выходного сигнала и узел безударного переключения режимов работы. Основой модуля являются 8 операционных усилителей. Формирование ПИД-закона регулирования осуществляется параллельно включаемыми операционными усилителями с соответствующими обратными связями. Имеется возможность отключения П- и Д-составляющих. В модуле есть демпфер для гашения пульсации сигнала рассогласования, поступающего от измерительного модуля И00.1 (рис. 3.16).

Органы настройки регулятора:

- коэффициент передачи (плавно и ступенями «х1», «х10»);
- постоянная времени интегрирования (изодрома) (плавно и ступенями «х1», «х10»);
- постоянная времени предварения (плавно и ступенями «х1», «х10»);
- постоянная времени демпфирования (плавно);
- ограничение снизу и сверху уровня выходного сигнала.

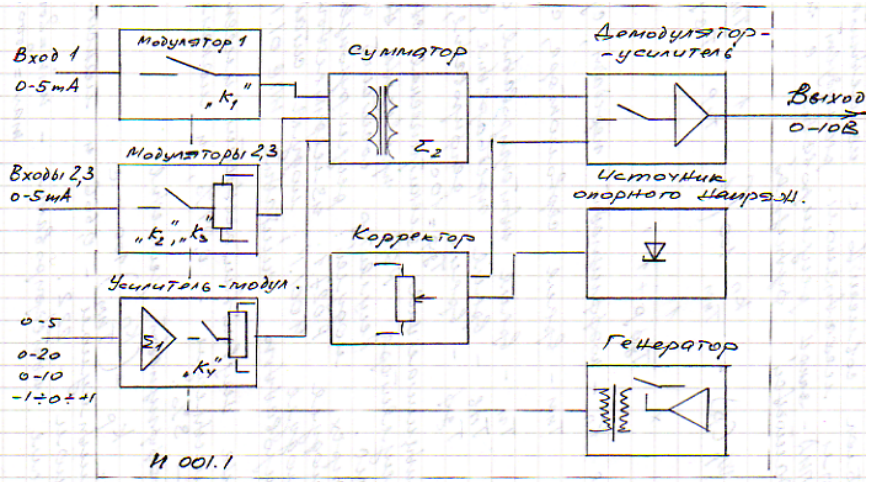


Рис. 3.16

Входным сигналом для модуля Р017 является напряжение 0...10 В.

Узел безударного переключения содержит реле KV с переключающим контактом.

В режиме ручного управления срабатывает реле KV, его контактом на вход выходного усилителя подается сигнал 0...10 В постоянного тока от внешнего блока управления (через сопротивление R_{44}). Сигнал, пропорциональный выходному сигналу выходного усилителя, через резистор R_{41} поступает на сумматор, а с его выхода через контакты реле KV – на вход интегратора, который отслеживает выходной сигнал блока, обеспечивая безударность переключения с ручного управления на автоматическое. При отключенной интегральной составляющей закона регулирования безударность переключения не обеспечивается

3.2.2. Регулирующий блок с импульсным выходом Р27

Блок совместно с исполнительным механизмом реализует ПИД-закон регулирования с передаточной функцией

$$W_{\text{р}}(p) = \frac{K_{\text{п}}}{T_{\text{им}}} 100 \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} p} + \frac{T_{\text{пв}} p}{T_{\text{пв}} p + 1} \right) \frac{1}{T_{\text{демп}} p + 1},$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент передачи, с/%; $T_{\text{им}}$ – время сервомотора, с; $T_{\text{и}}$ – время интегрирования, с; $T_{\text{пв}}$ – время предварения, с; $T_{\text{демп}}$ – время демпфирования, с

$$T_{\text{демп}} = 10 \text{ с}.$$

Принципиальная электрическая схема регулятора Р27 приведена на рис. 3.17. Регулятор состоит из трех модулей: регулирующего модуля Р027.1; измерительного модуля И001.1; модуля стабилизированного питания ИПС01.1.

Зона нечувствительности имеет минимум – 0,24 %, и максимум – 3 %.

Коэффициент усиления

$$K_{\text{р}} = \left(\frac{K_{\text{п}}}{T_{\text{им}}} \right) 100 ,$$

с минимумом – 0,666 и максимумом – 22,2.

Время интегрирования: min = 200 с, max = 2000 с.

Время предварения $T_{\text{пв}} \cong$ 4...400 с.

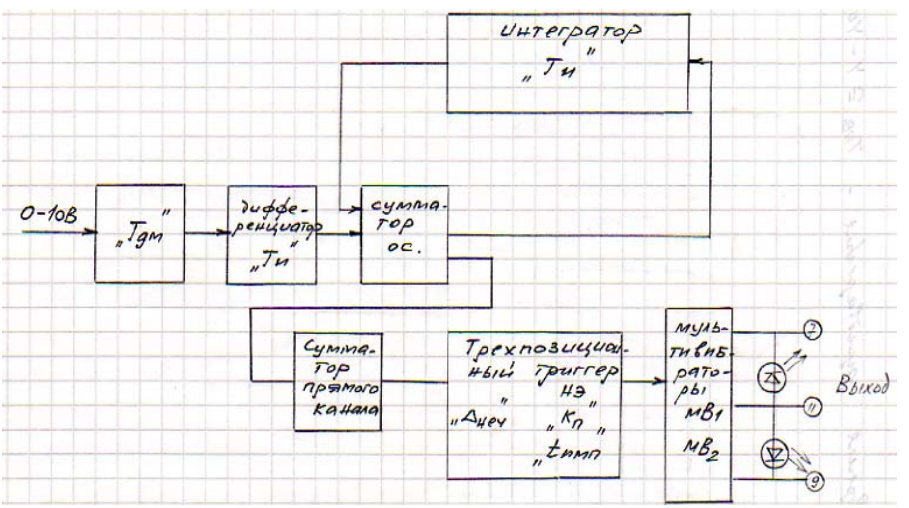


Рис. 3.17

3.3. АППАРАТУРА «КОНТУР-1»

Аппаратура предназначена для автоматизации объектов с относительно небольшим объемом автоматических регуляторов (котельные, газовые турбины и т. д.).

В состав аппаратуры входят регулирующие приборы Р25, корректирующие приборы К15, К16, К26.

Регулирующие приборы Р25 имеют три модификации по типу используемых датчиков:

– дифференциально-трансформаторные датчики с масштабированным входом (два), возможен ввод сигнала от дифференциально-трансформаторного датчика по положению исполнительного механизма; измерительный узел суммирования сигналов датчиков и задатчика. Прибор совместно с двигателем постоянной скорости формирует ПИ-закон регулирования. Выходные устройства прибора (ключи) позволяют управлять либо коммутационной аппаратурой, либо непосредственно однофазными асинхронными электродвигателями ограниченной мощности. На приборе имеется ключ режима управления исполнительным механизмом (режим «автоматический» или «ручной»). При ручном режиме управления используется возвратный ключ с положениями «Больше»–«Меньше». Выходные и входные цепи регулятора гальванически не связаны.

Прибор корректирующий К15 с модификациями К15.1, К15.2, К15.3 с законом ПИД-регулирования осуществляет безударное переключение режимов управления из автоматического в ручной и обратно.

Прибор К16 с модификациями К16.1, К16.3 осуществляет либо дифференциальный (Д), либо апериодический (А), либо пропорциональный (П) законы.

Приборы К26 модификаций К26.1, К26.3 осуществляют преобразование сигнала рассогласования в дискретный выходной сигнал в виде состояния выходных контактов.

Существуют приборы с показанием рассогласования и выходного сигнала с помощью стрелочных микроамперметров.

На рис. 3.18 показана блок-схема регулирующего прибора Р25 в части субблоков Р-012, Р-013 и регулирующего субблока Р-011.

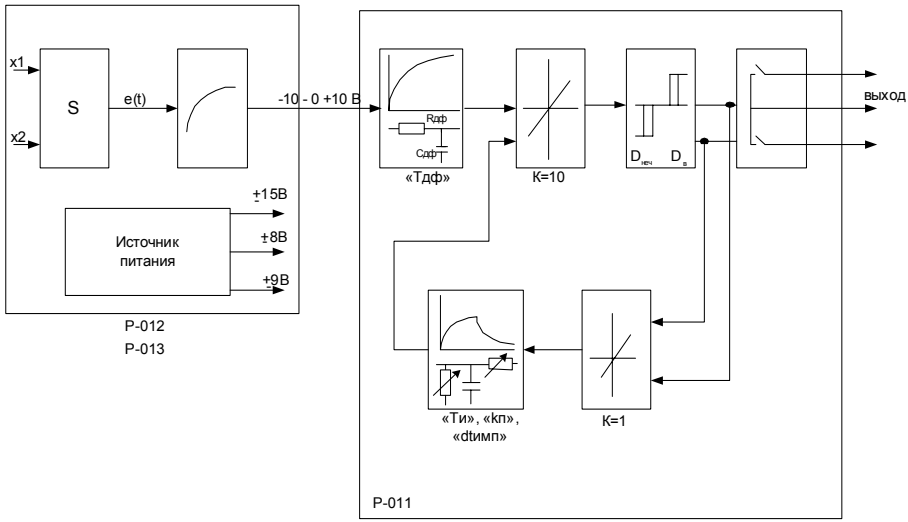


Рис. 3.18

3.4. АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ АКЭСР

Комплекс включает:

- регулирующие устройства: блоки импульсные РБИ1, РБИ2, РБИ3 и аналоговый РБА;
- блоки ввода–вывода информации: кондуктивного разделителя БКР-1, БКР-2, БКР-3;
- функциональные устройства: вычислительных операций БВО; нелинейных преобразований БНП-04; сигнализации БСГ; блок интегрирования БПИ; динамических преобразований БДП; блок селектирования БСЛ-04; блок сравнения 4 токовых сигналов БСЛ-04;
- устройства оперативного управления (ручного управления БРУ-1К, БРУ-2К, БРУ-3К, БРУ-У, задатчики ручные – РЗД, РЗД-К);
- источник группового питания БПГ.

По конструкции блоки комплекса подразделяются на приборные (с буквой П) и шкафные (с буквой Ш). Источник группового питания относится к шкафному варианту комплекса.

Блоки управления имеют соответственно одну, две, три кнопки. Блок БРУ-У имеет индикатор положения регулирующего органа.

3.4.1. Регулирующие импульсные блоки РБИ

Блоки выпускают в трех модификациях в зависимости от вида автоподстройки:

РБИ1 – без дистанционной подстройки параметров настройки;

РБИ2 – подстройка дискретная;

РБИ3 – подстройка аналоговая.

Входные сигналы – унифицированные ГСП,

выходной сигнал = –10 ÷ 0 ÷ +10 В.

Регуляторы имеют ПИ-закон регулирования.

Передаточная функция регулятора РБИ

$$W(p) = \frac{k_{\text{п}}}{T_{\text{демп}} p + 1}\left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} p}\right),$$

где коэффициент передачи регулятора $k_{\text{п}} = \dfrac{100}{V_{\text{св}} T_{\text{им}}}$; $V_{\text{св}}$ – «скорость связи» – скорость компенсации сигнала рассогласования сигналом отрицательной обратной связи.

3.4.2. Блок динамических преобразований БДП

Блок предназначен для динамических преобразований (интегрирования, дифференцирования, демпфирования) линейной комбинации входных сигналов.

y_0 при $P_{\text{б}} = P_{\text{м}} =$ «0» (режим хранения);

$y_0 + \dfrac{1}{T}\int_0^t x_3 dt$ при $P_{\text{б}} =$ «1», $P_{\text{м}} =$ «0» (режим интегрирования в прямом направлении);

$y_0 - \frac{1}{T}\int_0^t x_3 dt$ при $P_б$ = «0», $P_м$ = «1» (режим интегрирования в обратном направлении);

$y_1 = (\pm x_{11} \pm \alpha_{12} x_{12} - \alpha_{13} x_{13})C$.

Технические данные

$T_и$	5; 10; 15...50; 20; 40; 60...200; 50; 100; 150...500; 100; 200; 300...1000; 200; 400; 600; 2000; 500; 1000; 150...5000; 1000; 2000; 3000...10 000 с
α_{12} , α_{13}	0 ...1
$\alpha_н$, $\alpha_в$	0...100
Усиление	1 ± 0,5 %

3.4.3. Блоки прецизионного интегрирования БПИ, БПИ-21

Блоки предназначены для реверсивного интегрирования аналогового или широтно-модулированного импульсного сигнала с возможностью ограничения выходного сигнала или двухпредельной сигнализацией.

Имеются режимы хранения, прямого или/и обратного интегрирования.

Блок содержит интегратор аналогового сигнала, логическую схему управления интегратором, узел двухпредельной сигнализации и выходной кондуктивный разделитель.

Блок-схема показана на рис. 3.19.

По входным и выходным сигналам БПИ совместим с «Каскадом 1, 2», в которых нет интегрирующего блока.

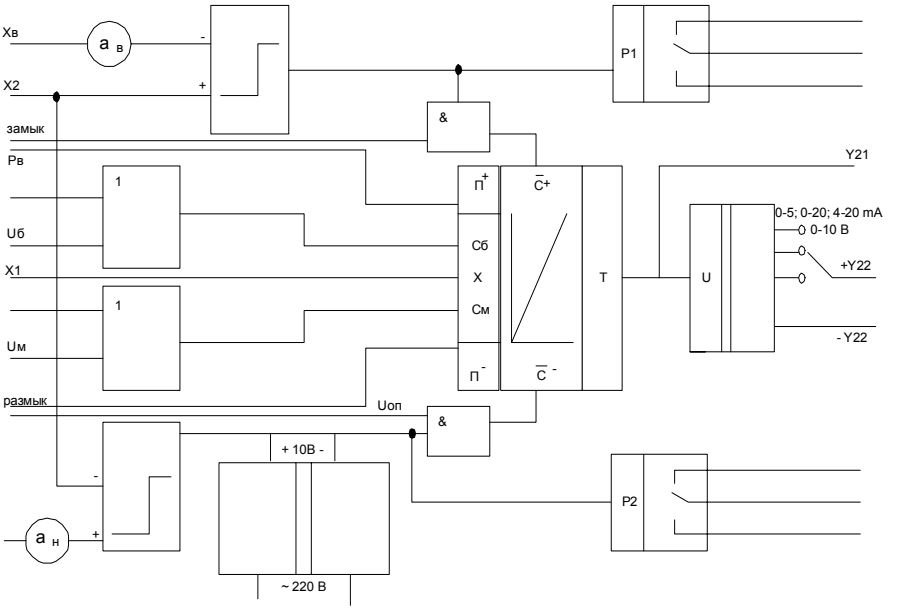


Рис. 3.19

3.4.4. Блоки БРУ-1К, -2К, -3К, -У

Эти блоки имеют двухобмоточное реле с шестью группами контактов (одна из которых задействована для световой индикации реле). Имеется возможность переключения реле от внешнего логического управления замыканием выводов, обмоток реле БРУ-У, дополнительно имеет микроамперметр измерения сигналов 0...5 мА или 0...10 В.

4. ДИНАМИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ТИПОВЫХ СТРУКТУР АСР

Методы поиска динамических параметров настроек рассмотрены подробно в ч. 1 пособия. Они могут быть расчетными (требуется знание динамики объекта) или экспериментальными (знание динамики объекта необязательно). Ниже приведены экспериментальные методы поиска настроек.

4.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПОСОБ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАСТРОЕК

Этот способ основан на зависимости переходных процессов от настроек АСР, изображенных на плоскости в области настроек.

Плоскость с областью настроек для АСР с ПИ-законом и статическим объектом приведена на рис. 4.1.

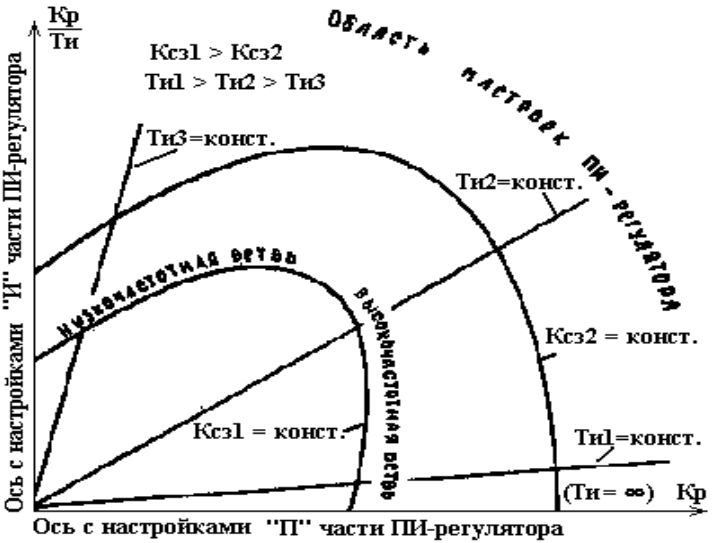


Рис. 4.1

1. Рассматриваются настройки, обеспечивающие $K_{сз} > 0$ ($K_{сз} = \psi$).

2. Область настроек АСР ограничена на плоскости осями $K_р$, $K_р/T_и$ и линией $K_{сз} = 0$.

3. Одним из показателей переходного процесса АСР является $K_{сз}$ (другие – $A1$, F, $t_{пп}$).

4. Заданное значение $K_{сз}$ можно обеспечить различными комбинациями $K_р$ и $T_и$, образующими на плоскости настроек линию $K_{сз}$ = конст.

5. Особенность расположения линии $K_{сз}$ = конст: наличие вершины, наличие вертикально падающей ветви к оси $K_р$, наличие слабонаклонной ветви к оси $K_р/T_и$.

6. Колебательность у переходных процессов с настройками для высокочастотной ветви более высокая, чем колебательность для настроек низкочастотной ветви.

7. На данной плоскости настройки располагаются вдоль прямых: перпендикулярные к оси $K_р$ ($K_р$ = конст, $T_и$ – изменяемая), проведенной из начала координат под углом к оси $K_р$ ($T_и$ = конст, $K_р$ – изменяемая). Причем, чем больше $T_и$, тем меньше угол к оси $K_р$.

Плоскость настроек используется для создания картины с переходными процессами АСР. Площадь области настроек зависит от объекта.

Область настроек ограничена линией настроек $K_р$ (П-часть ПИ-закона), линией настроек $K_р/T_и$ (И-часть ПИ-закона) и линией $K_{сз}$, где $K_{сз}$ изменяется в пределах от 0 до 1.

В данном разделе приняты несколько отличные условные обозначения, чем применявшиеся ранее:

$K_{сз}(\varphi)$ – степень затухания;

$R_{дин}$ (σ_1, σ_{max}) – динамическая ошибка;

F – площадь под кривой переходного процесса;

$t_{пп}$ – время переходного процесса.

4.1.1. Зависимость параметров A_1, $t_{пп}$, $R_{дин}$, F переходного процесса от настроек АСР в виде картины на плоскости настроек приведена в качестве справки на рис. 4.2. Из картины видно, что в центре имеется область настроек, при которых переходные процессы имеют наилучшие (меньшие) параметры A_1, $t_{пп}$, F.

Закономерности влияния настроек $K_р$, $T_и$ на переходной процесс АСР указаны на рис. 4.3.

Следующие закономерности послужили основанием для формулировки алгоритма экспериментального поиска динамических настроек:

1) переходные процессы, лежащие ниже и правее диагональной линии, приподняты над осью времени, (при этом $T_и$ больше оптимального);

2) высокочастотная ветвь $K_{сз}$ (рис. 4.3) почти вертикальная ($K_р$ – неизменная);

3) область оптимальных настроек лежит правее и ниже вершины ($K_{сз}$ = конст).

4.1.2. Алгоритмы рис. 4.4, 4.1 следует использовать как для экспериментального поиска настроек, так и при уточнении расчетных динамических настроек. Алгоритм может быть использован для АСР ПИ-законом регулирования и статическим объектом (для любой реализации аппаратуры – электрической, гидравлической, пневматической).

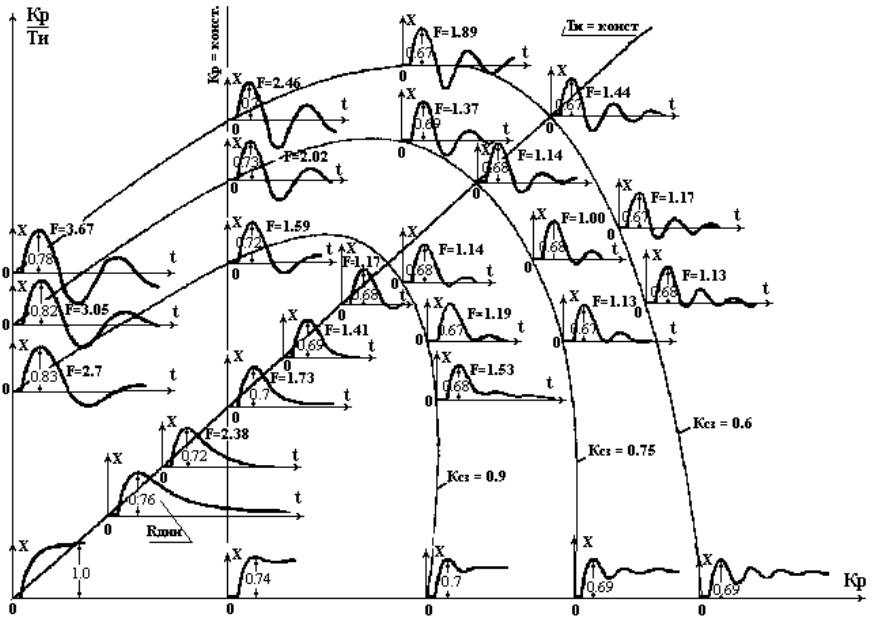

Кр
Ти
Кр = конст.
Ти = конст
F=1.89
F=2.46
F=1.37
F=1.44
F=2.02
F=1.14
F=1.17
F=3.67
F=1.59
F=1.00
F=1.14
F=1.13
F=3.05
F=1.41
F=1.19
F=2.7
F=1.73
F=1.53
F=2.38
Кзд
Кзс = 0.6
Кзс = 0.75
Кзс = 0.9
1.0
Кр

Рис. 4.2

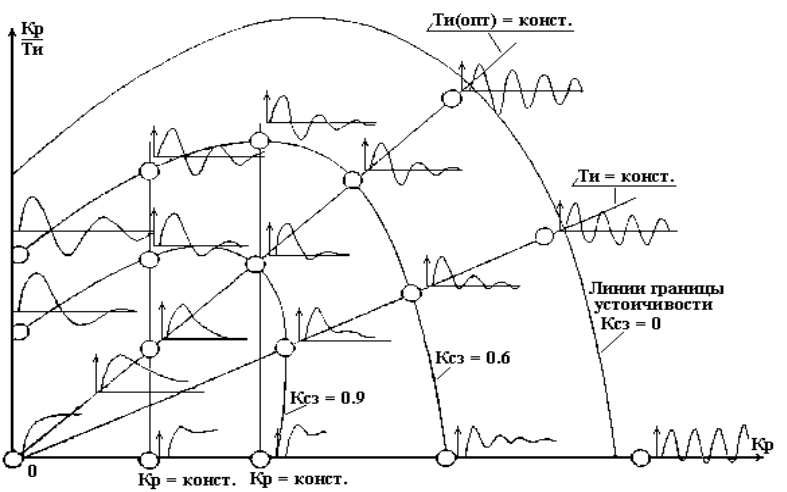
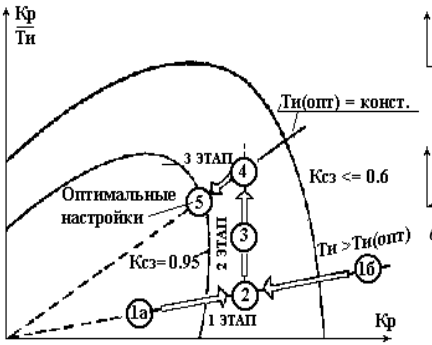
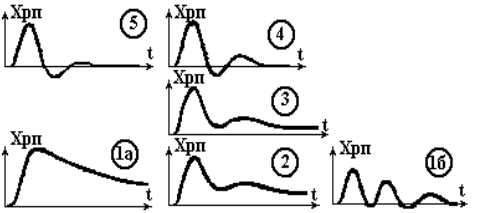

Кр
Ти
Ти(опт) = конст.
Ти = конст.
Линии границы
устоичивости
Кзс = 0
Кзс = 0.6
Кзс = 0.9
0
Кр = конст.
Кр = конст.
Кр

Рис. 4.3



а – этапы алгоритма поиска оптимальных динамических настроек АСР



б – переходные процессы АСР для настроек с точками 1-5 по рис. а)

Рис. 4.4

Оптимальные настройки обеспечивают критерий переходного процесса АСР: минимум площади переходного процесса при заданном $K_{сз}$.

Этапы алгоритма.

Этап 1. Устанавливается либо $K_р$ (больше или меньше оптимального), $T_и$ > оптимального. Должны быть получены переходные процессы по форме с настройками для точек 2а или 1б. Для получения переходного процесса следует нанести возмущение. Признак завышенного $T_и$ – наличие апериодической составляющей у переходного процесса (переходной процесс приподнят над осью времени). Изменением $K_р$ следует добиться переходного процесса с настройками для точки 2 ($1.0 > K_{сз} > 0.6$). Этап завершен.

Этап 2. $K_р$ – неизменная, уменьшением $T_и$ следует добиться исчезновения апериодической составляющей (переходные процессы для точек 3-4). $T_и$ оптимальная с настройкой для точки 4. Если при уменьшении $T_и$ уменьшается $K_{сз}$, значит, $T_и$ оптимальная пройдена. Этап завершен – определена оптимальная настройка $T_и$.

Этап 3. $T_и$ – неизменная, уменьшением $K_р$ следует добиться заданного $K_{сз}$ (переходной процесс для настроек с точкой 5). Этап завершен – определена оптимальная настройка $K_р$.

4.1.3. При изменении у объекта динамических характеристик от нагрузки динамические настройки следует изменять автоматически (использовать автоподстройку) либо устанавливать неизменные, компромиссные настройки.

Для одноконтурной АСР с объектом на рис. 4.5, *а* приведена картина рис. 4.5, *в* влияния характеристик объекта:

1) на область настроек;

2) значения оптимальных настроек;

3) показатели $A1$, $t_{пп}$, $R_{дин}$ переходного процесса при оптимальных настройках.

Закономерности влияния $K_р$, $T_и$ АСР со статическим объектом при возмущении регулирующим органом.

1. Настройки, лежащие в начале координат ($K_р = 0$, $K_р/T_и = 0$). Переходной процесс соответствует кривой разгона.

2. Настройки, лежащие на оси $K_р$ ($T_и = \infty$, $K_р$ – переменный). При увеличении $K_р$ $A1$, $K_{сз}$, апериодическая составляющая уменьшаются.

3. Настройки, лежащие вблизи оси $K_р/T_и$ ($K_р > 0$, $T_и$ – переменная). При уменьшении $T_и$ $A1$ и $K_{сз}$ уменьшаются; F – уменьшается, а затем увеличивается ($F – \infty$ при $K_{сз} = 0$ и $K_р/T_и = 0$).

4. Настройки, лежащие на линии $K_{сз}$ = конст ($K_р$ и $T_и$ – переменные). При изменении настроек вдоль линии $K_{сз}$ слева направо – частота колебаний увеличивается; $A1$, F уменьшаются, а затем увеличиваются. На каждой линии $K_{сз}$ = конст имеется участок настройками, обеспечивающими процесс регулирования с наименьшим F. Такие настройки лежат на линии $K_{сз}$ = конст правее и ниже ее вершины, на границе исчезновения апериодической составляющей.

5. Настройки, лежащие на линии $K_р$ = конст ($K_р$ не равно 0, $T_и$ – переменная). При уменьшении $T_и$ $K_{сз}$ уменьшается незначительно, исчезает апериодическая часть. При $T_и$ = оптимальной апериодическая часть равна 0. При $T_и <$ оптимальной $K_{сз}$ значительно уменьшается.

6. Настройки, лежащие на линии $T_и$ = конст ($T_и$ не равно 0, $K_р$ – переменная). При увеличении $K_р$ $A1$ и $K_{сз}$ уменьшаются; F – уменьшается, а затем увеличивается.

Рис. 4.5 следует использовать для примерного анализа работы АСР, если настройки неизменные, а изменяются характеристики объекта. Из рисунка видно, что при изменении характеристик объекта следует в первую очередь проверять настройки для нагрузки котлоагрегата, при которой динамические характеристики наихудшие. Проверять следует прежде всего $K_{сз}$, оно должно быть возможно меньшим (0.85 или 0.8), тогда при улучшении характеристик объекта $K_{сз}$ увеличится, АСР не потеряет устойчивость.

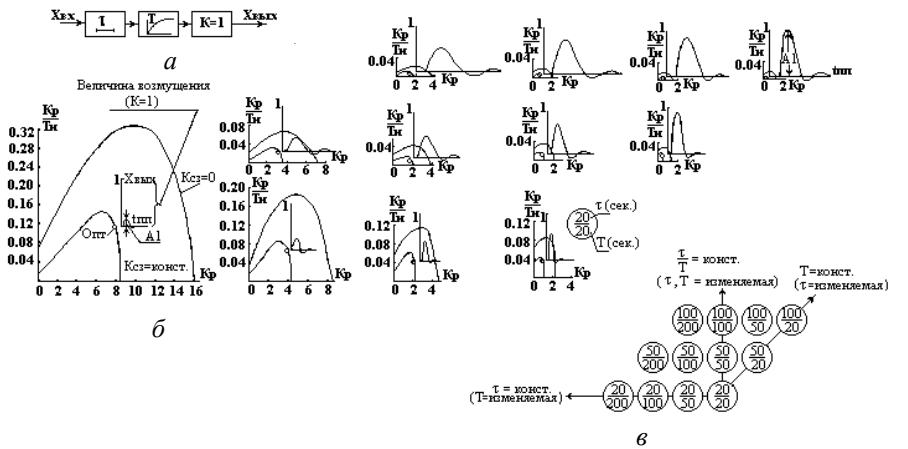


Рис. 4.5

Опт – оптимальные настройки (указаны кружком для каждого объекта). Модель объекта указана на рис. *а*. Серия областей настроек для разных объектов приведена на рис. *б*. Динамические характеристики для каждого объекта указаны на рис. *в*. Серия объектов подобрана таким образом, что можно проследить влияние изменения только τ, только T или τ/T. Все переходные процессы приведены для одинаковой величины возмущения, равной 1. Переходной процесс АСР показан относительно 1, принятой за отклонение $X_{вых}$ ($X_{рп}$) без работы АСР.

Закономерности:

1. Область настроек уменьшается при увеличении τ/T, при увеличении τ или при уменьшении T.

2. Оптимальная настройка $K_р$ уменьшается при увеличении τ/T (при увеличении τ или уменьшении T). Оптимальная настройка $T_и$ увеличивается при увеличении τ/T, если увеличивается τ. Оптимальная настройка $T_и$ уменьшается при увеличении τ/T, если T уменьшается.

3. Показатели $A1$, $R_{дин}$ увеличиваются при увеличении τ/T. Показатель $t_{пп}$ увеличивается при увеличении τ. Показатель $F_м$ увеличивается с увеличением τ/T.

Если настройки АСР неизменные, а характеристики объекта изменились, можно по рис. *б* определить примерный характер переходного процесса по изменению $K_{сз} = 0.9$ относительно оптимальных настроек.

4.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПОСОБ ПОИСКА НАСТРОЕК ДВУХКОНТАКТНОЙ АСР

4.2.1. Алгоритм работ при экспериментальном способе поиска оптимальных динамических настроек двухконтурной АСР с дифференциатором (например, АСР «Впрыск») указан на рис. 4.6.

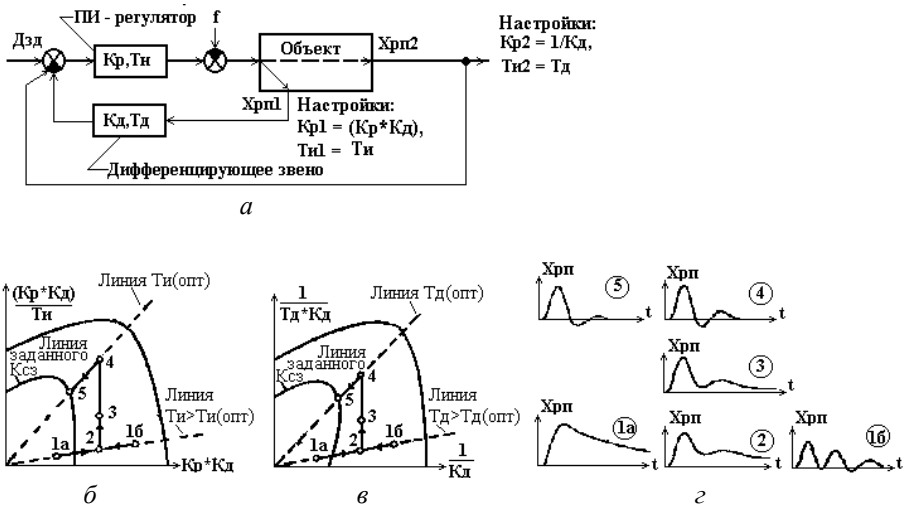


Рис. 4.6

Алгоритм:

1. Сначала настройки определяют для $X_{рп1}$, затем для $X_{рп2}$.

2. На основе трех этапов алгоритма должны быть получены последовательно процессы, изображенные на рис. 4.6, поз. 2*г*, 4*г*, 5*г*. Процесс 5*г* оптимален: минимум площади при заданном $K_{сз}$.

3. Настройка по $X_{рп1}$. Дифференциатор включается как усилитель, сигнал $X_{рп2}$ отключен. Возмущение – РО АСР. Изменением $K_{р1}$, $T_{и1}$ получают процесс 5*г*.

4. Настройка по $X_{рп2}$. Усилитель заменяют на дифференциатор, вводится сигнал по $X_{рп2}$. Возмущение – внешнее (топливом), задатчиком. Если возмущение РО АСР – регулятор включается на АВТ после окончания процесса по $X_{рп1}$. Изменением $K_{р2}$, $T_{и2}$ получают процесс 5*г*. При каждом изменении $K_д$ корректируют $K_р$, чтобы $K_{р1}$ было неизменным для $X_{рп1}$.

В каждом контуре регулирования АСР реализован ПИ-закон регулирования с соответствующими настройками $K_р$, $T_и$ (рис. 4.6, *а*).

4.2.2. Подробные пояснения этапов алгоритма поиска оптимальных настроек относительно одноконтурной АСР приведены на рис. 4.4.

4.2.3. Суть экспериментального способа поиска оптимальных настроек заключается в следующем:

1) подготавливается АСР для включения в работу. Устанавливаются настройки в исходные положения (статические в расчетные); устанавливаются необходимые режимы, перемычки на аппаратуре (при необходимости выполняется балансировка); включается в работу система регистрации; стабилизируются возмущения на объекте;

2) наносится возмущение определенной величины (ключом управления АСР, задатчиком);

3) АСР включается в работу (если возмущение задатчиком, то АСР включается в работу предварительно);

4) регистрируется переходной процесс АСР; по форме переходного процесса принимается решение об этапе изменения одной из динамических настроек;

5) АСР отключается, настройка изменяется, вновь наносится возмущение и далее работы повторяются до тех пор, пока не будут получены оптимальные настройки $K_р$ и $T_и$.

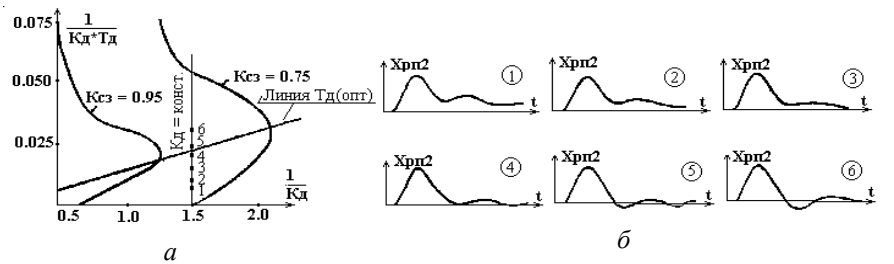
4.2.4. Каждый раз изменяется одна из настроек, в зависимости от результата, этапа:

1 этап – проводятся несколько опытов по п. 4.2.1 для подбора $K_р$ и $T_и$, чтобы получить $T_и$ больше $T_и$(опт). Критерий – переходной процесс колебательный ($K_{сз}$ – 0.97....0.7) и приподнят над осью времени (на рис. 4.6, *г* обозначение переходных процессов – 1а, 1б, 2);

2 этап – проводятся несколько опытов по п. 4.3.1 для уменьшения $T_и$ до значения $T_и$(опт). Критерий – переходной процесс пересек ось времени (на рис. 4.6, *г* обозначение переходных процессов – 2, 3, 4);

3 этап – проводятся несколько опытов по п. 4.2.1 для изменения (обычно уменьшения) $K_р$ до значения $K_р$(опт). Критерий – получить заданное $K_{сз}$, например 0.95 (на рис. 4.6, *г* обозначение переходных процессов – 4, 5).

4.2.5. В двухконтурной АСР, при близкой инерционности участков $X_{рп1}$ и $X_{рп2}$, характер расположения линии $K_{сз}$ на плоскости настроек может быть иным (рис. 4.7). Однако и в этом случае алгоритм обеспечивает поиск оптимальных динамических настроек (на рис. 4.7 обозначения переходных процессов 1-6).



а *б*

Рис. 4.7

4.2.6. При использовании экспериментального способа поиска настроек следует заранее определить величину возмущения относительно зоны нечуствительности АСР. У переходного процесса А3 должно быть большим $X_{рп}$ (неч).

Пример оценки величины возмущения:

1) задано – $K_{сз}$ = 0.9 (10А3 = А1); τ/T = 0.3 (при этом $R_{дин}$ = 0.4); $X_{вых}$ = А1/$R_{дин}$;

$$X_{рп}(\text{неч}) = 0.5\ ^\circ\text{C};\ \ \text{А3} > 0.5,\ \ \text{А3} = 0.6;$$

2) определим $X_{вых}$ = 10А3/0.4 = 25А3 = 25·0.6 = 15 °С.

Величина возмущения (без работы АСР) должно быть 15 °С по $X_{рп}$.

При работе АСР, при том же возмущении, отклонение $X_{рп}$ будет меньшим примерно на величину $R_{дин}$:

$$\text{А1} = X_{вых} \cdot R_{дин} = 15 \cdot 0.4 = 6\ ^\circ\text{C}.$$

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ОПН РУ АСР

Оптимальные параметры настройки регулирующих устройств автоматических систем регулирования теплоэнергетических процессов определяются расчетными или экспериментальными методами. Однако эти параметры настройки представлены в абстрактном виде: коэффициента усиления $K_р$, времени интегрирования $T_и$, времени предварения T_0, длительности импульса $t_{имп}$, зоны нечувствительности Δ. Представление параметров настройки в виде положения конкретных органов зависит от вида используемой аппаратуры. Каждый из видов аппаратуры имеет свои органы настройки со своими пределами изменения. В этой связи представляется целесообразным рассмотреть основные случаи реализации параметров статической и динамической настройкой для наиболее употребительных видов аппаратуры. Следует отметить, что элементная база приборов отличается низкой точностью (до ±20 %). Это может привести к большой ошибке при установке рассчитанных значений по шкале, поэтому завершающим этапом установки должна быть проверка достоверности установки настройки.

5.1. РЕАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ НА БЛОКЕ Р25

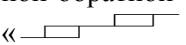
5.1.1. Реализация параметров статической настройки

Особенностью регулирующих блоков Р25 являются встроенные задатчики и блоки режимов управления. В блоках модификации 1 и 2 между клеммами 17 и 18 должна быть установлена перемычка. Однако имеется возможность включения выносных внешних задатчиков ЗУ11 (перемычку 17-18 следует снять), но при этом сигнал встроенного задатчика (у блоков модификации 1 и 2) уменьшается в два раза, диапазоны задатчиков одинаковы (у блока модификации 3 сигнал задатчика сохраняется). Сигналы встроенных задатчиков не масштабируются.

Следует отметить некоторые особенности блоков модификации 3, которые выпускаются с настройкой для термопреобразователей градуировки $ХК_{68}$. Для работы с термопреобразователями других градуировок следует:

- установить перемычку на клеммы 19 и 20;
- по вольтметру на клеммы 12 («плюс») и 14 подстрочным резистором «$U_М$» установить напряжение 10,4 мВ для термопреобразователей $ХА_{68}$ и 1,54 мВ для $ПП_{68}$;
- по вольтметру на клеммах 11 и 14 («плюс») при отсутствии сигнала задания резистором «корректор» установить нулевое значение напряжения.

В коробке холодных спаев необходимо установить медные резисторы 10 Ом при работе с термопреобразователями $ХК_{68}$ и $ХА_{68}$ и 1,27 Ом для $ПП_{68}$.

На блоках Р25 статическая настройка выполняется при отключенной обратной связи РСБ (переключатель режима работы в положении «»). Из-за влияния на коэффициент передачи РСБ не следует устанавливать потенциометр «Зона нечувствительности» $\Delta > 2$ % (максимум 5 %). Следует проверить соответствие положения ручек и осей потенциометров.

Органы настройки, диапазоны их действия, способы определения параметров статической настройки приведены в табл. 1.

П р и м е р

Определить параметры статической настройки АСУ общего воздуха котла по схеме «пар–воздух». Регулятор – Р25.1.

Дано:

- регулировочный диапазон котла $\Delta\sigma_{зп} = 100$ т/ч;
- перепад давления на воздухоподогреватели (изменение расхода воздуха): $\sum\sigma_{рп} = 500$ Па $= 50$ кгс/м^2;
- зависимость расхода воздуха от нагрузки – линейная.

Коэффициенты передачи измерительных цепей определены экспериментально: $K^{и}_{рп} = 0{,}1\ \%/\text{Па} = 1\ \%\cdot\text{м}^2/\text{кгс}$, $K^{и}_{зп} = 0{,}4\ \%\ \text{ч/т}$.

В схеме используется выносной задатчик ЗУ с диапазоном $\Delta\sigma_{зд} = 20\ \%$. .

Зона нечувствительности (точность поддержания) регулируемого параметра:

$$\Delta\sigma_{рп} = 0{,}02\sum\sigma_{рп} = 0{,}02\cdot 500 = 10\ \text{Па}\ (1\ \text{кгс}/\text{м}^2).$$

Положение потенциометра «Зона»:

$$\Delta = K_{рп}K^{и}_{рп}\Delta\sigma_{рп} = 0{,}4\cdot 0{,}1\cdot 10 = 0{,}4\ \%\ (\text{при}\ \ 0 < K_{рп} < 1);$$

$$K_{рп} = \frac{\Delta\sigma_{зд}}{K^{и}_{рп}\sum\sigma_{рп}} = \frac{20}{0{,}1\cdot 500} = 0{,}4;$$

$$K_{зд} = \frac{K^{и}_{рп}K_{рп}\sum\sigma_{рп}}{K^{и}_{зд}\sum\sigma_{зд}} = \frac{0{,}4\cdot 0{,}1\cdot 500}{0{,}4\cdot 100} = 0{,}5.$$

Из предыдущих уравнений

$$\sum\sigma_{рп} = \sum\sigma_{зд}\ .$$

Цена деления задатчика: $Z = \dfrac{\sum\sigma_{зд}}{100\ \%} = 5\ \text{Па}/\%\ (0{,}5\ \text{кгс}/\text{м}^2\cdot\%)$.

Реализация статической настройки проверяется следующим образом:

- установить потенциометр «Зона» в положении минимума (Δ = 0,5 %);
- установить потенциометр в расчетное положение и сбалансировать ИСБ;
- отстранить пульсации с помощью «Демпфер»;
- проверить равенство сигналов по расходу воздуха и пара в нескольких точках регулировочного диапазона и, при необходимости, подкорректировать $K_{зп}$.

5.1.2. Реализация параметров динамической настройки на блоке Р25

Параметры динамической настройки устанавливают при режиме работы РСБ в положение «ПИ» и положении потенциометра «Импульс» – 1 с (при возникновении автоколебаний на выходе прибора уменьшают $t_и$).

Коэффициент усиления ПИ-регулятора $K_р$ устанавливают на блоке РСБ потенциометром «$К_{П-63}$», шкала которого оцифрована для времени полного входа исполнительного механизма $T_{им}$ = 63 с, для другого времени сервомотора следует скорректировать положение потенциометра:

$$K_{П-63} = K_р \frac{T_{им}}{63}.$$

Постоянная времени интегрирования $T_и$ реализуется переключателем «$Т_и$» («грубо», «х10») и потенциометром «$Т_и$» («плавно»).

Следует отметить, что в блоках Р25 уменьшение времени импульса потенциометром «Импульс» при неизменном положении потенциометра «$Т_и$» уменьшает $T_и$ (особенно заметно при малых значениях $T_и$). Это важно при реализации П-закона регулирования с помощью жесткой обратной связи и для регулирующих устройств в АСР с малоинерционными объектами.

Коэффициент усиления П-регулятора устанавливается на ИСБ одним из потенциометров «К» (чаще тем, на который подключен датчик жесткой обратной связи – $К_{ЖОС}$) с последующим уточнением пробным сигналом. Важно подчеркнуть, что закорачивание гнезд «ОС» и «ОТ» недопустимо.

П р и м е р

Установить найденные расчетным путем для ПИ-закона регулирования на регулирующем приборе Р25 $K_р$ = 6,5 и $T_и$ = 70 с при времени исполнительного механизма $T_{им}$ = 30 с, расчетном значении зоны нечувствительности Δ = 1 %.

Регулирующее воздействие фиксируется по положению выходного рычага исполнительного механизма МЭО. Определить численные значения установленных параметров настройки.

Коэффициент усиления $K_{\text{П-63}}$ регулятора при $T_{\text{им}} = 30$ с равно

$$K_{\text{П-63}} = K_{\text{р}} \frac{T_{\text{им}}}{63} = 6,5 \frac{30}{63} = 3,1 .$$

Устанавливается потенциометр «$К_{\text{П-63}}$» в положение «3» дел.; потенциометр «$Т_{\text{и}}$» в положение «7 с» и переключатель «$Т_{\text{и}}$» – в положение «х10»; потенциометр «Зона» – «1 %», а потенциометр «Импульс» – «1 с». Для проверки отсутствия автоколебаний во внутреннем контуре блока РСБ при положении переключателя режима работы «Р» («ручное») наносится ступенчатое возмущение задатчиком: при отсутствии автоколебаний не меняется положение потенциометра «Импульс»; при наличии автоколебаний – следует уменьшить $t_{\text{и}}$. Численные значения реализованных параметров настройки могут быть найдены по переходной характеристике ПИ-регулятора, зафиксированной с помощью прибора по положению регулирующего органа (% УП) при ступенчатом возмущении задатчиком $\Delta\sigma_{\text{зд}} = 5\ \%$.

По графику переходной характеристики изменение выходной величины за первое включение регулятора Δh = 28 % (пропорциональное воздействие). Линия, проведенная по вершинам последующих изменений выходной величины, отсекает на оси времени отрезок, равный времени интегрирования $T_{\text{и}}$ = 60 с. Тогда

$$K_{\text{р}} = \frac{\Delta h}{\Delta\sigma_{\text{зд}}} = \frac{28}{5} = 5,6;$$

$$T_{\text{и}} = 60 \text{ с}.$$

Для определения времени интегрирования $T_{\text{и}}$ можно использовать удвоение выходного сигнала регулятора.

П р и м е р

Установить коэффициент усиления П-регуляторов $K_{\text{р}}$ = 2,3, если известны следующие данные:

1) ЖОС выполнена по положению выходного вала МО;

2) $K^{и}_{ЖОС} = 1,7$;

3) $\Delta = 1,25$ %;

4) $T_{демп} = 2$ с.

Коэффициент масштабирования по каналу жесткой обратной связи находится из условия баланса сигналов на входе в регулирующее устройство:

$$\Delta\sigma_{рп} = K_{ЖОС} K^{и}_{ЖОС} \Delta\sigma_{рег.возд},$$

где $K_{ЖОС}$ – коэффициент масштабирования жесткой обратной связи; $K^{и}_{ЖОС}$ – коэффициент передачи измерительной цепи жесткой обратной связи. Тогда

$$K_{р} = \frac{1}{K_{ЖОС} K^{и}_{ЖОС}} = \frac{1}{2,3 \cdot 1,7} = 0,26.$$

Потенциометр «К» ИСБ установить в положение «0,26», экспериментально подобрать «$К_{П-63}$», «$Т_{и}$», «Импульс» при $\Delta = 1,25$ %, $T_{демп} = 2$ с и уточнить установку потенциометра «$К_{ЖОС}$».

6. РЕАЛИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ СТРУКТУР ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АСР НА АНАЛОГОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ

Гамма выпускавшихся аналоговых технических средств была велика и многообразна. В этой связи реализация типовых – наиболее часто употреблявшихся и до сих пор применяемых структур представляет интерес.

В настоящем разделе на рис. 6.1 – 6.22 проведены схемы соединения и их вариантов для одноконтурных АСР, АСР с дифференциатором, АСР тепловой нагрузки и корректирующего регулятора, АСР с жесткой обратной связью, АСР дозирования реагентов (с импульсатором), даны схемы синхронизации хода двух механизмов и управления исполнительным механизмом МЭО-К с пускателем ПМЕ.

Схема внешних соединений регулятора тепловой нагрузки и корректирующего прибора на базе аппаратуры РПИ МЗТА

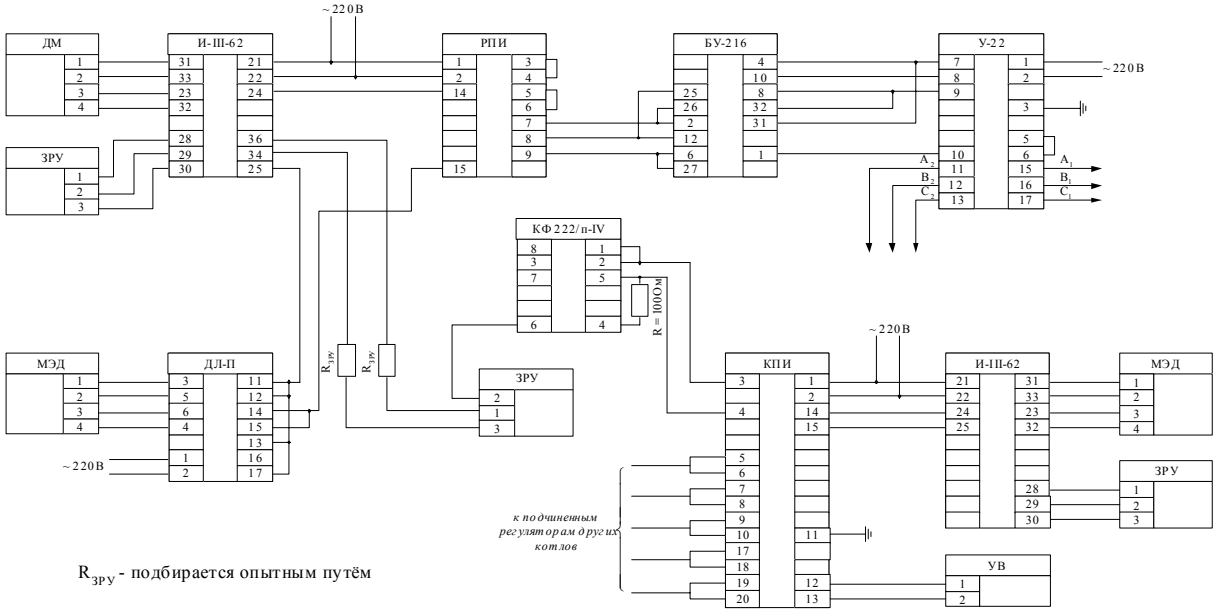


Рис. 6.1

Схемы внешних соединений корректирующего прибора КПИ-III с Р25.1
и корректирующего прибора на базе РПИБ и БЗИ

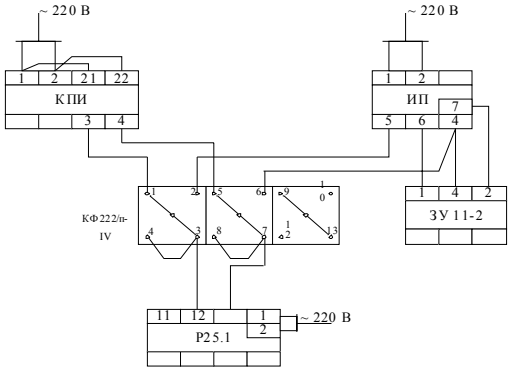


Рис. 6.2.1

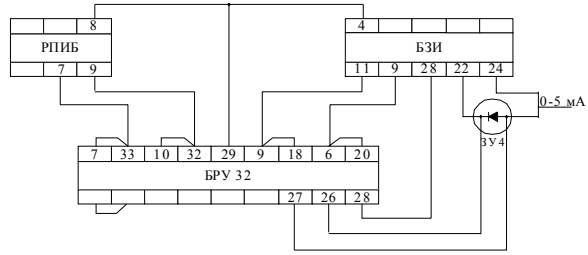


Рис. 6.2.2

Примечание. В источнике питания (на месте монтажа) должна быть осуществлена перепайка на клемму 5 выведен движок потенциометра «Чувствительность» (для установки требуемого диапазона ЗУ11-2).

Рис. 6.2

Схема внешних соединений синхронизации хода двух исполнительных механизмов на базе аппаратуры РПИ МЗТА

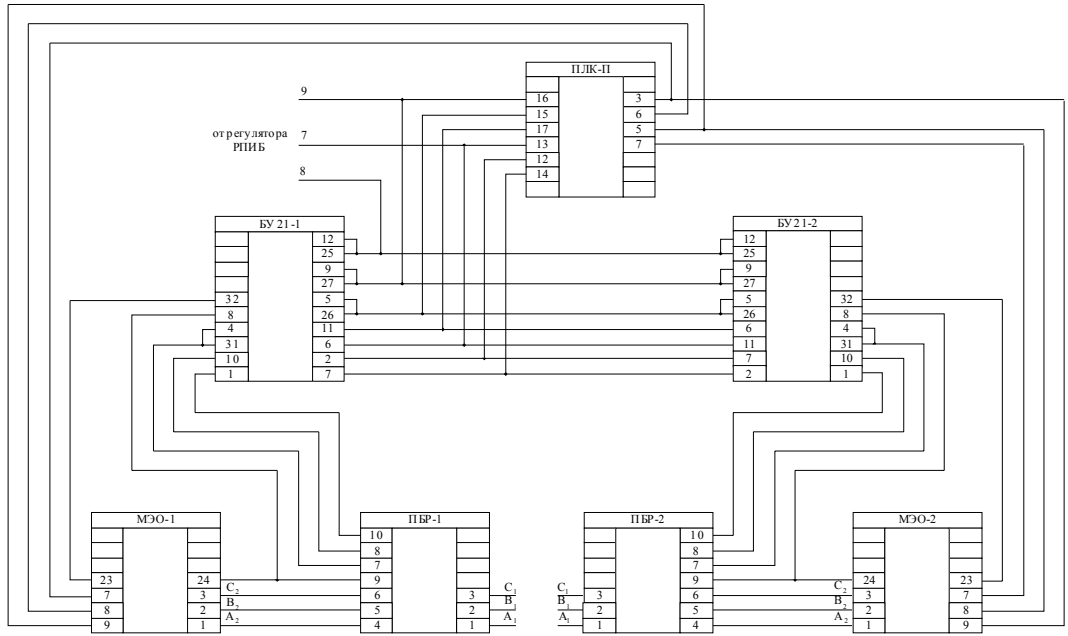


Рис. 6.3

Схема внешних соединений двухконтурной АСР с дифференциатором на базе аппаратуры «Каскад»

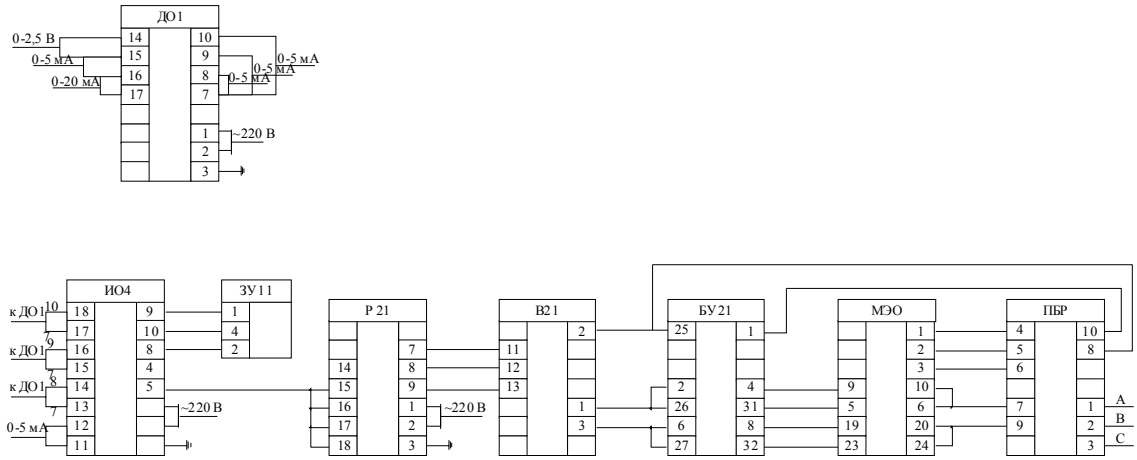


Рис. 6.4

Схема внешних соединений регулятора тепловой нагрузки и корректирующего прибора на базе аппаратуры «Каскад»

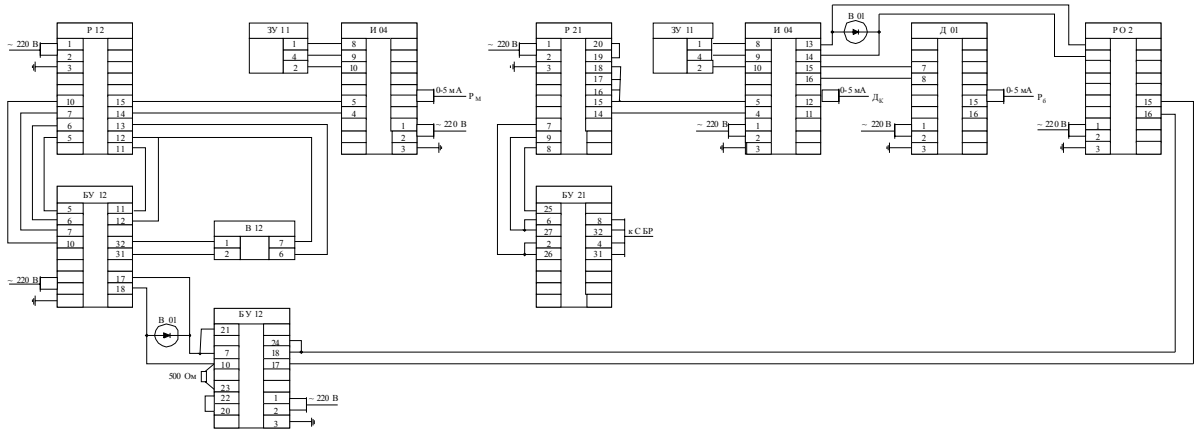


Рис. 6.5

Схема внешних соединений синхронизации хода двух исполнительных механизмов на базе аппаратуры «КАСКАД»

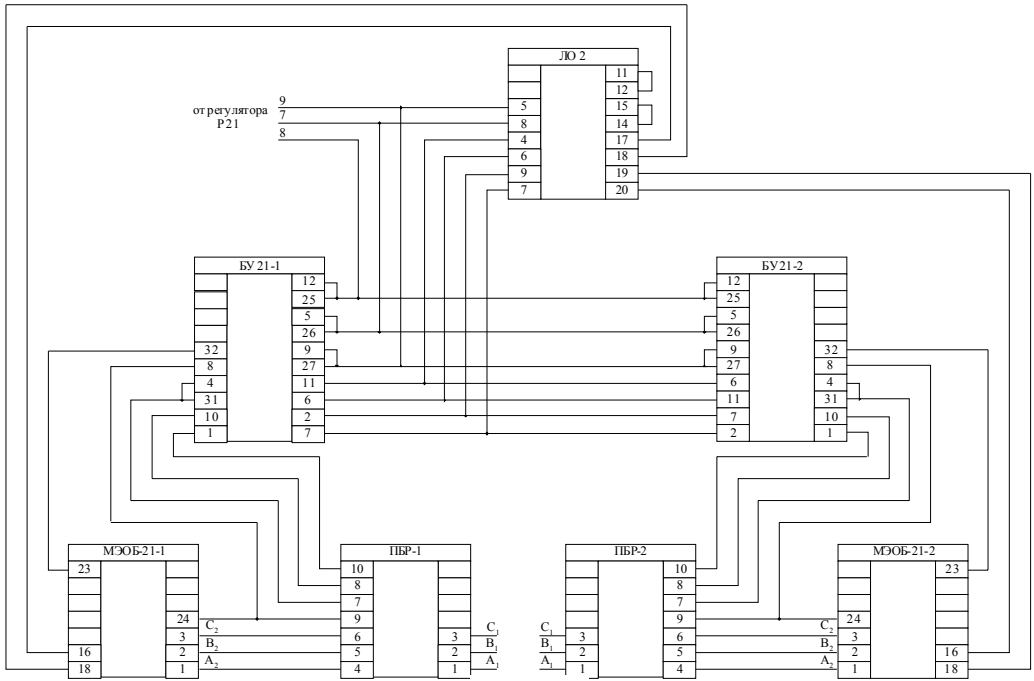
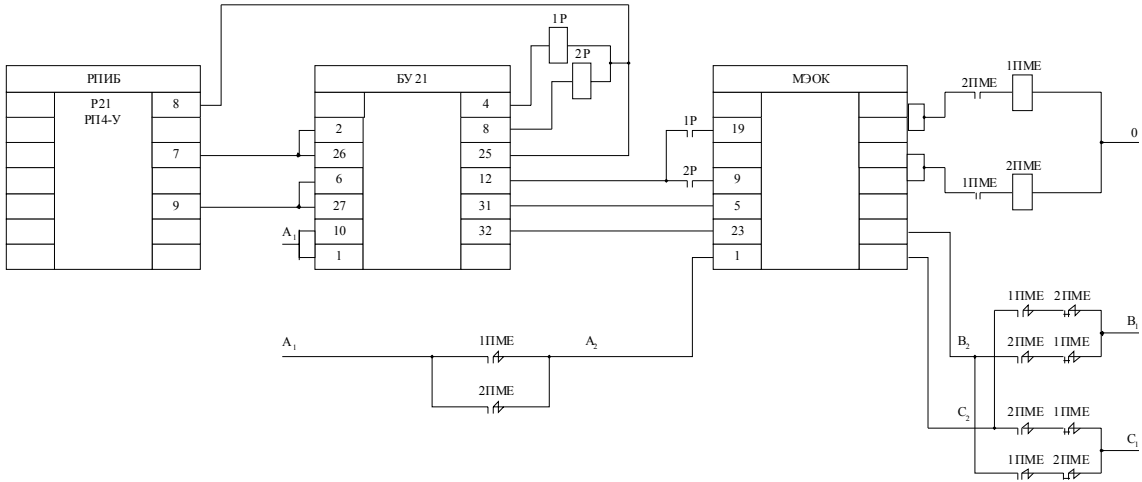


Рис. 6.6

Схема внешних соединений управления исполнительным механизмом типа МЭО-К регулирующими блоками РПИБ, Р21, РП4-П и магнитным пускателем типа ПМЕ



1ПМЕ, 2ПМЕ - пускатель магнитный реверсивный ПИЕ-073
1Р, 2Р - промежуточное реле РПУ-2-312203УЗ, 24В

Рис. 6.7

Схема внешних соединений двухконтурной АСР на базе аппаратуры «Каскад-2»

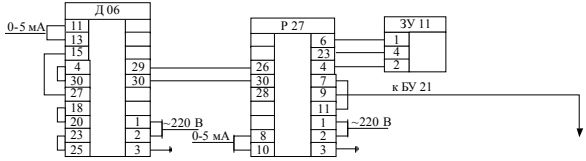


Рис. 6.8.1

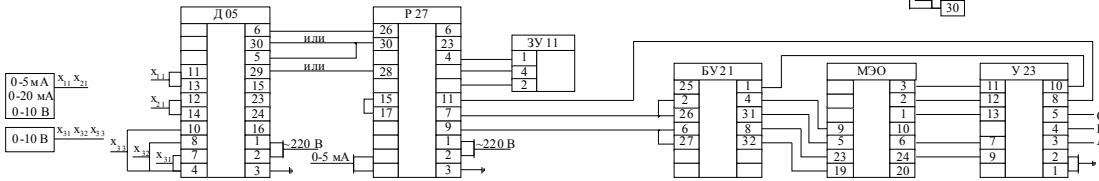


Рис. 6.8.2

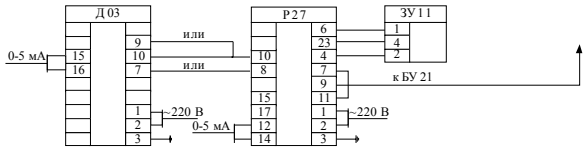


Рис. 6.8.3

Рис. 6.8

Варианты соединения цепей входных сигналов X и выходных Y для формирования П и Д-законов регулирования блока Д 06

пропорциональный (П)

дифференциальный (Д)

Установка перемычек на панели Д 05

Д-закон А-закон И-закон

Примечания.

1. Входной сигнал 0 - 10 В подаётся на кл. 27-30 блок Д 05. Кл. 4-15 остаются свободными.

2. Все неиспользованные входы по напряжению на блоке Д 06 закорачиваются. Универсальные входы остаются свободными.

3. Для выполнения функции П-преобразования на Д 05 осуществляется А-преобразование с минимальным временем Т.

4. Необходимый вид входного сигнала на блоке Д 05 устанавливается с помощью замыкателя на панели.

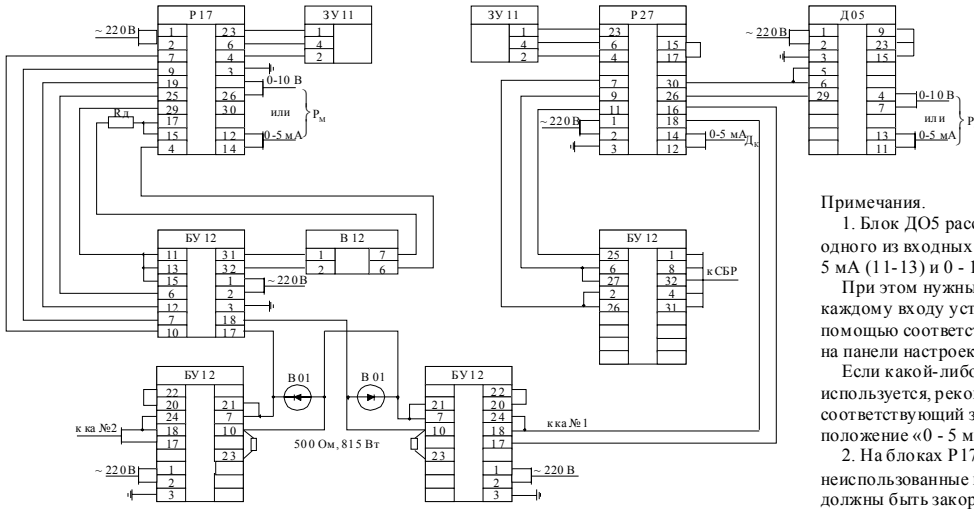
5. Все неиспользованные входы X на блоке Д 05 закорачиваются.

6. На блоке Д 05 при использовании сигнала 4 - 20 мА на тот же вход рекомендуется подключение встречно-параллельного сигнала 4 мА.

7. Выбор закона преобразования на блоке Д 03 производится на панели модуля динамики: П-закон - соединением кл. 1 с 10 и кл. 6 с 2; Д-закон - соединением кл. 1 с 10 и кл. 1 с 3, кл. 2 с 8 и кл. 6 с 7.

8. Все неиспользованные входы по напряжению на Р 27 закорачиваются.

Схема внешних соединений регулятора тепловой нагрузки и корректирующего прибора на базе аппаратуры «Каскад-2»



Примечания.

1. Блок ДО5 рассчитан на подключение одного из входных сигналов по выбору: 0 - 5 мА (11-13) и 0 - 10 В (4-7).

При этом нужный вид сигнала по каждому входу устанавливается с помощью соответствующего замыкателя на панели настроек модуля А 001.1.

Если какой-либо из входов не используется, рекомендуется соответствующий замыкатель установить в положение «0 - 5 мА».

2. На блоках Р17 и Р27 все неиспользованные входы по напряжению должны быть закорочены, а неиспользованные входы по току остаются свободными.

$R_д = 2Д - 31,5$, где $R_д$ - сопротивление добавочное, КОм;

Д - требуемый диапазон действия показателя от 0 до одного из крайних положений в % от номинального диапазона сигнала 10 В.

Рис. 6.9

Схема внешних соединений синхронизации хода двух исполнительных механизмов на базе аппаратуры «КАСКАД-2»

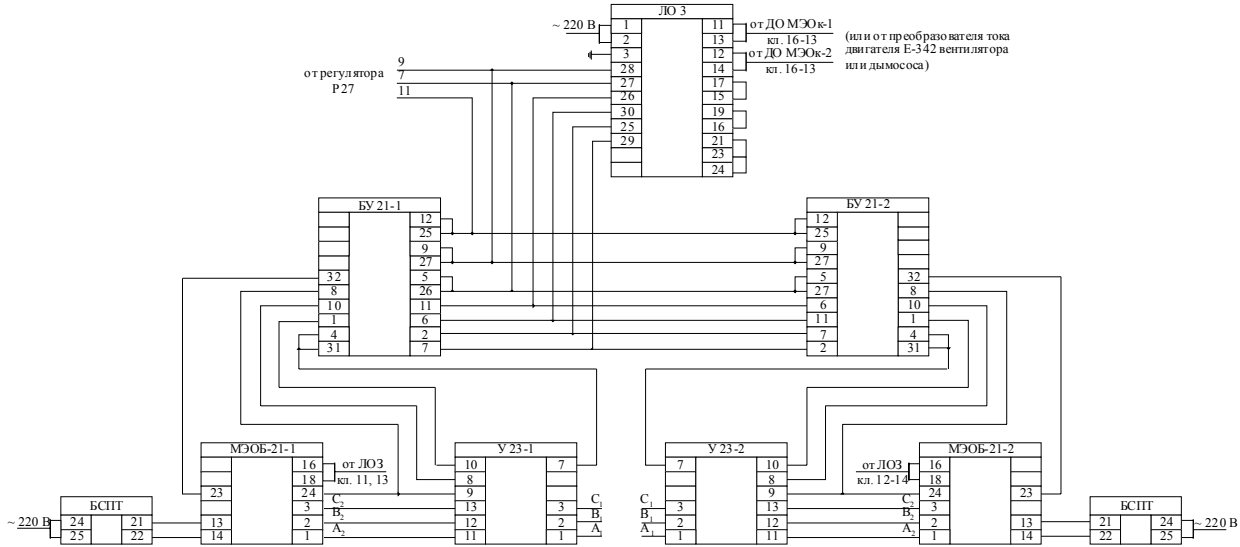


Рис. 6.10

Схема внешних соединений синхронизации хода двух исполнительных механизмов на базе аппаратуры «КОНТУР»

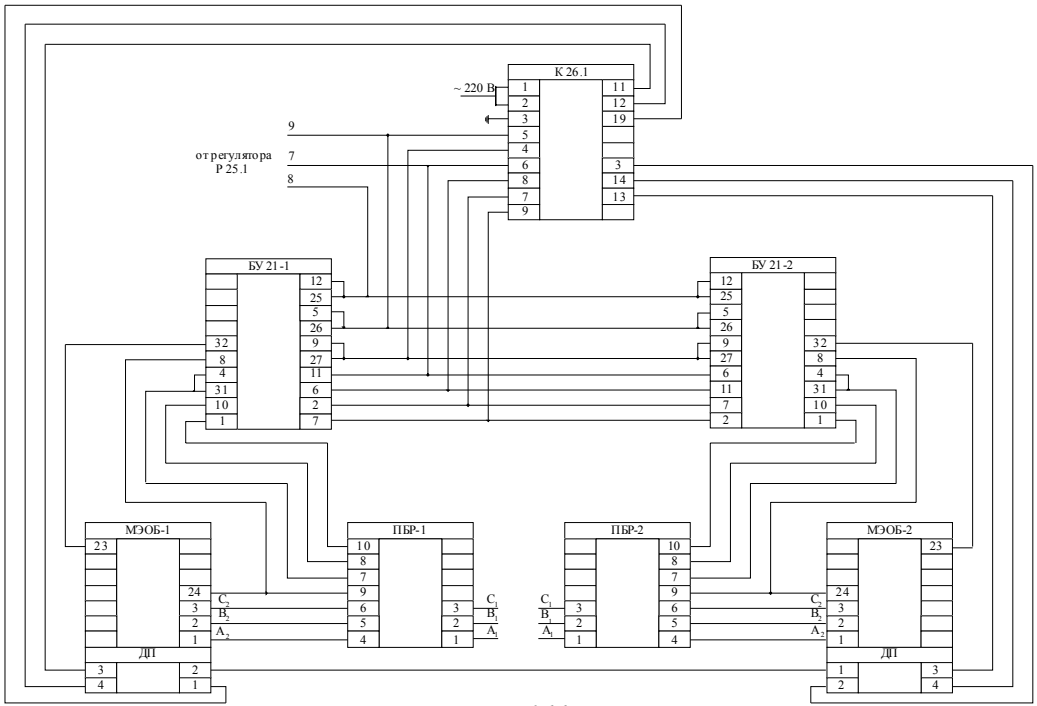
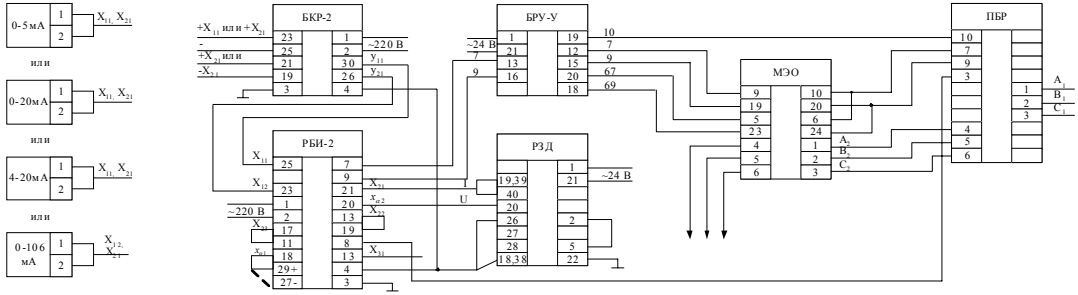


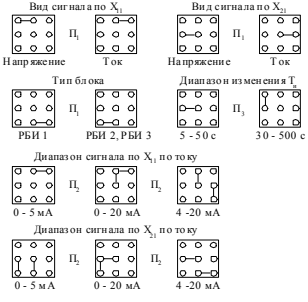
Рис. 6.11

Схема внешних соединений одноконтурной АСР на базе аппаратуры «АКЭСР»

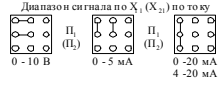


Положение перемычек, соответствующие различным режимам работы

РБИ



БКР 2



Примечания.

1. При использовании токового сигнала от РЗД 0 - 5 мА устанавливаются перемычки 2-18, 38; 0 - 20 мА - 26-27-18, 38; 4 - 20 мА - 27-18, 38.
2. Вход X_{31} блока РБИ служит для заведения сигнала (0 - 10 В) отрицательной обратной связи по положению регулирующего органа исполнительного механизма и формирования П-закона регулирования.
3. БКР-2 используется в том случае, когда поступают сигналы от датчиков разных видов (и по напряжению и по току). В случае одинакового вида сигналов последние сразу подаются на входы РБИ (X_{11}, X_{12}, X_{21}, X_{22}, X_{23}), учитывая при этом, что X_{11} и X_{21} - сигналы по току.

Рис. 6.14

Схема внешних соединений двухконтурной АСР с дифференциатором на базе аппаратуры «АКЭСР»

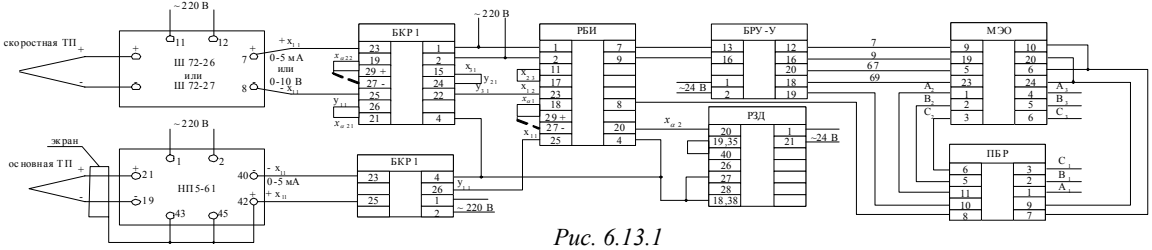


Рис. 6.13.1

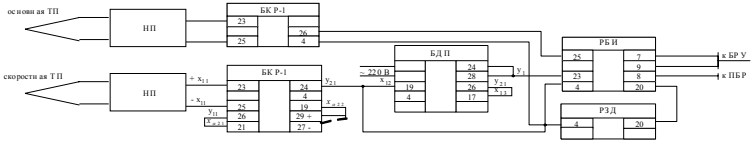


Рис. 6.13.2

Положение перемычек на блоке БКР-1 (дифференциаторе)

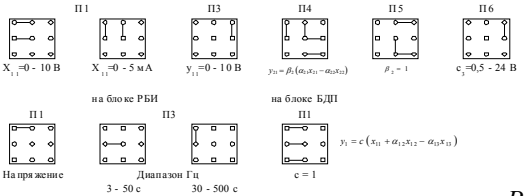


Рис. 6.13

Примечания.

1. В блоке БКР-1 масштабатор x_{22} (кл.19) используется как корректор.
2. Положение перемычек П1, П3, П4, П5 на всех блокахБКР такое же, как и на БКР-1 (дифференциаторе).

Схема внешних соединений одноконтурной АСР на базе аппаратуры «АКЭСР-2» с естественным сигналом

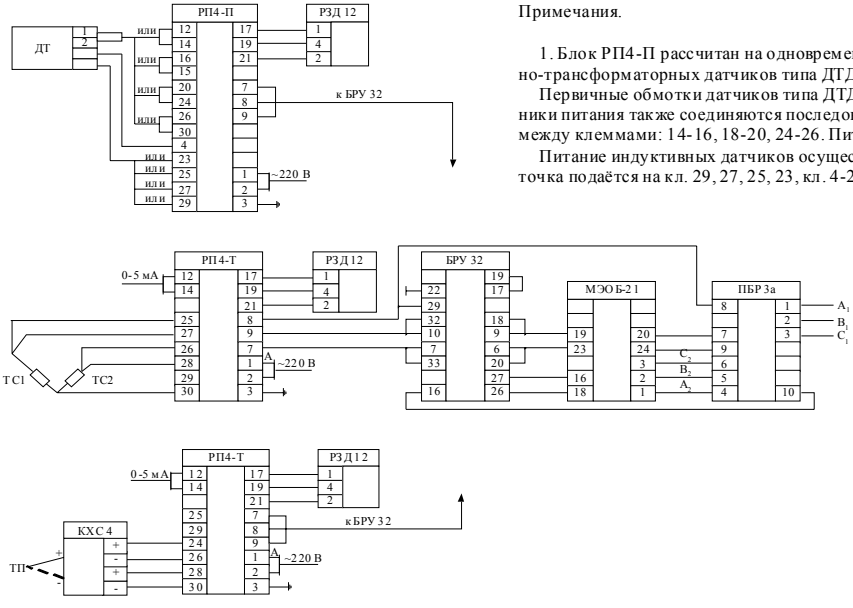


Рис. 6.14

Примечания.

1. Блок РП4-П рассчитан на одновременное подключение 4-х дифференциально-трансформаторных датчиков типа ДТД или 4-х индуктивных датчиков.

Первичные обмотки датчиков типа ДТД соединяются последовательно. Источники питания также соединяются последовательно путём установки перемычки между клеммами: 14-16, 18-20, 24-26. Питание осуществляется от кл. 12-30.

Питание индуктивных датчиков осуществляется от кл. 20-24, 26-30, средняя точка подаётся на кл. 29, 27, 25, 23, кл. 4-22-28 закорочены.

2. Блок РП4-Т рассчитан на одновременное подключение двух термометров сопротивления и токового сигнала 0-5 мА.

При использовании одного термометра сопротивления вместо ТС2 подключается манганиновое сопротивление R = 49,6 Ом (кл. 28-30). При этом необходимо установить перемычку 26-28.

3. Блок РП4-Т рассчитан также на подключение одной термопары типа ТХА (или ТХК), присоединяемой к выходным клеммам коробки холодных спаев КХС4 и токового сигнала 0-5 мА.

При работе блока РП4-Т с термопарой ТПР коробка холодных спаев не используется. Выход термопары ТПР подсоединяется к кл. 24-26. Неиспользуемые клемы для других внешних цепей остаются свободными.

Схема внешних соединений одноконтурной АСР и двухконтурной АСР на базе аппаратуры «АКЭСР-2» с унифицированным сигналом

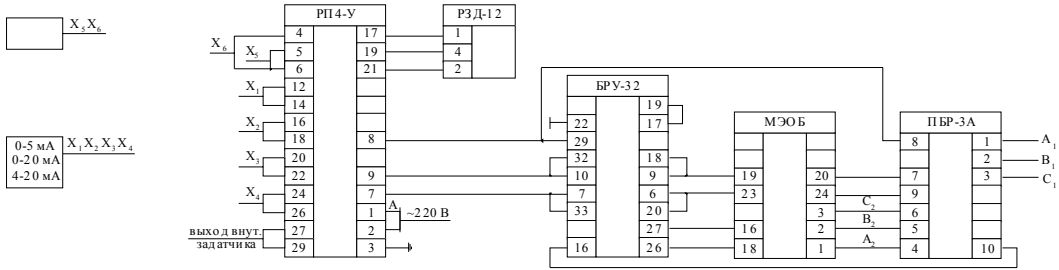


Рис. 6.15.1

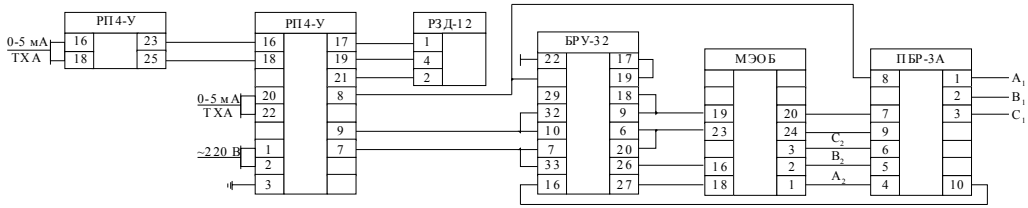


Рис. 6.15.2

Рис. 6.15

Схема внешних соединений АСР с жесткой обратной связью по положению регулирующего органа на базе аппаратуры «АКЭСР-2»

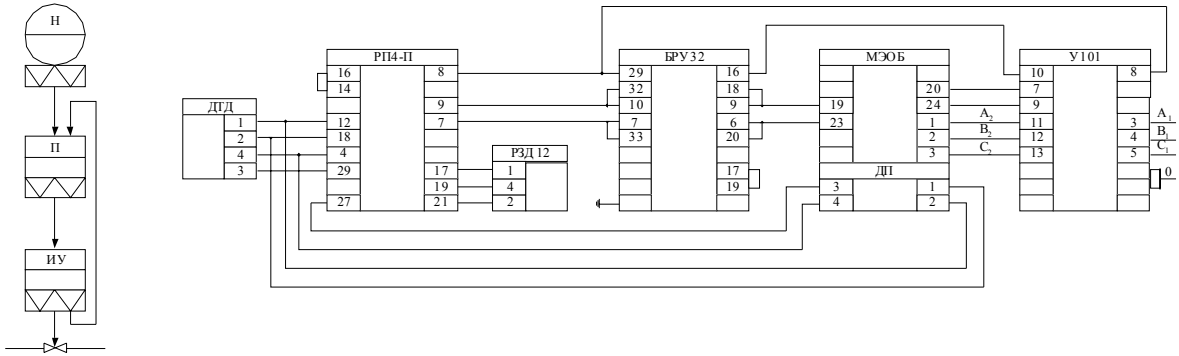


Рис. 6.16

Схема внешних соединений регулятора тепловой нагрузки и корректирующего прибора на базе аппаратуры «АКЭСР-2» с блоком ручного управления БРУ-32

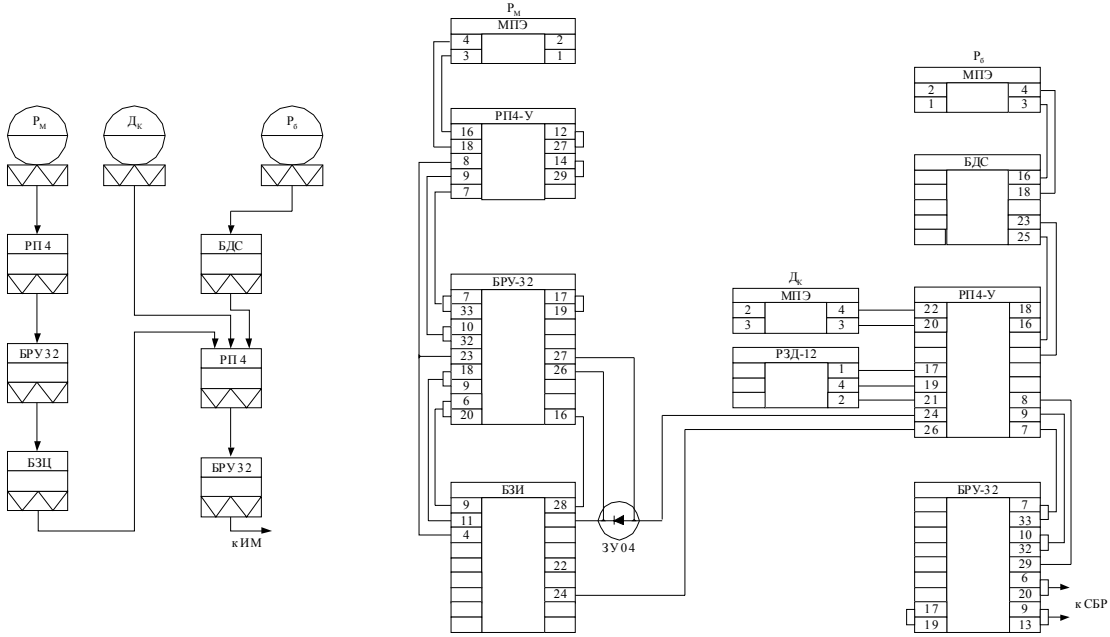


Рис. 6.17

Схема внешних соединений регулятора тепловой нагрузки и корректирующего прибора на базе аппаратуры «АКЭСР-2» с блоком ручного управления БРУ-42

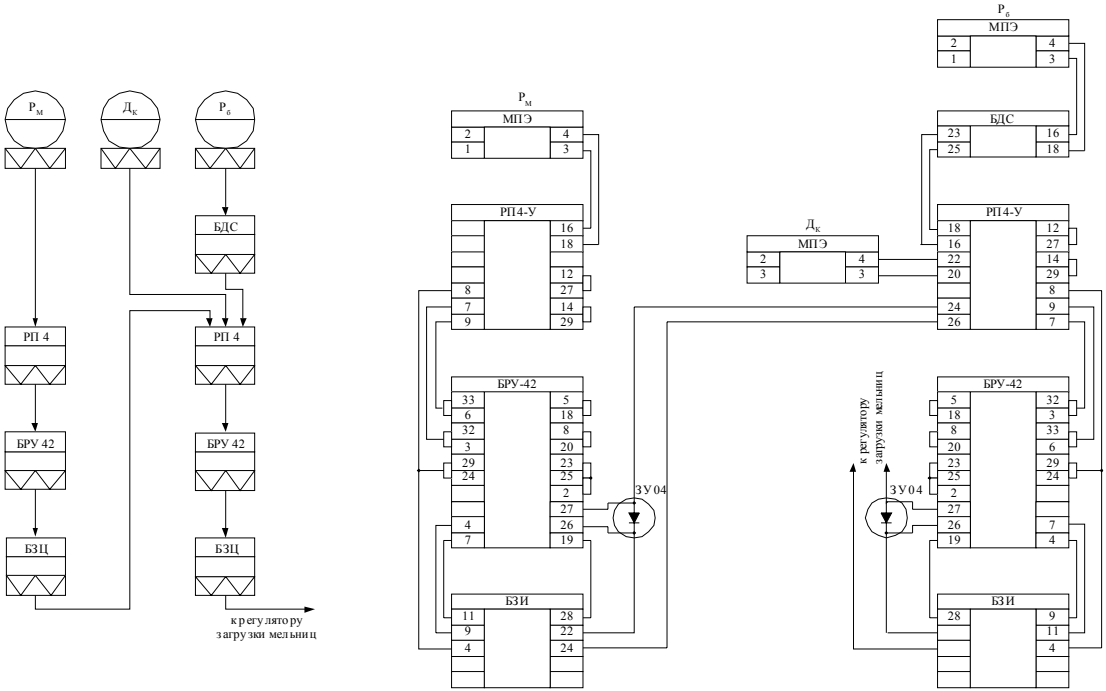


Рис. 6.18

Схема внешних соединений синхронизации хода двух исполнительных механизмов на базе аппаратуры «АКЭСР-2» с блоком ручного управления БРУ-42

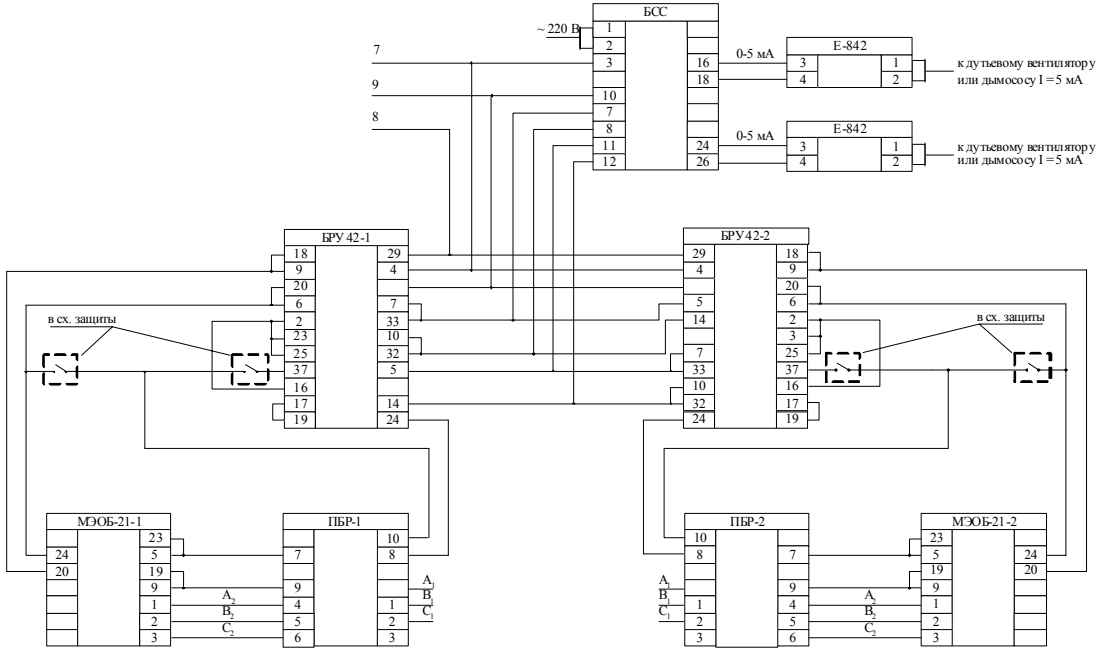


Рис. 6.19

Схема внешних соединений синхронизации хода двух исполнительных механизмов на базе аппаратуры «АКЭСР-2» с блоком ручного управления БУ-21

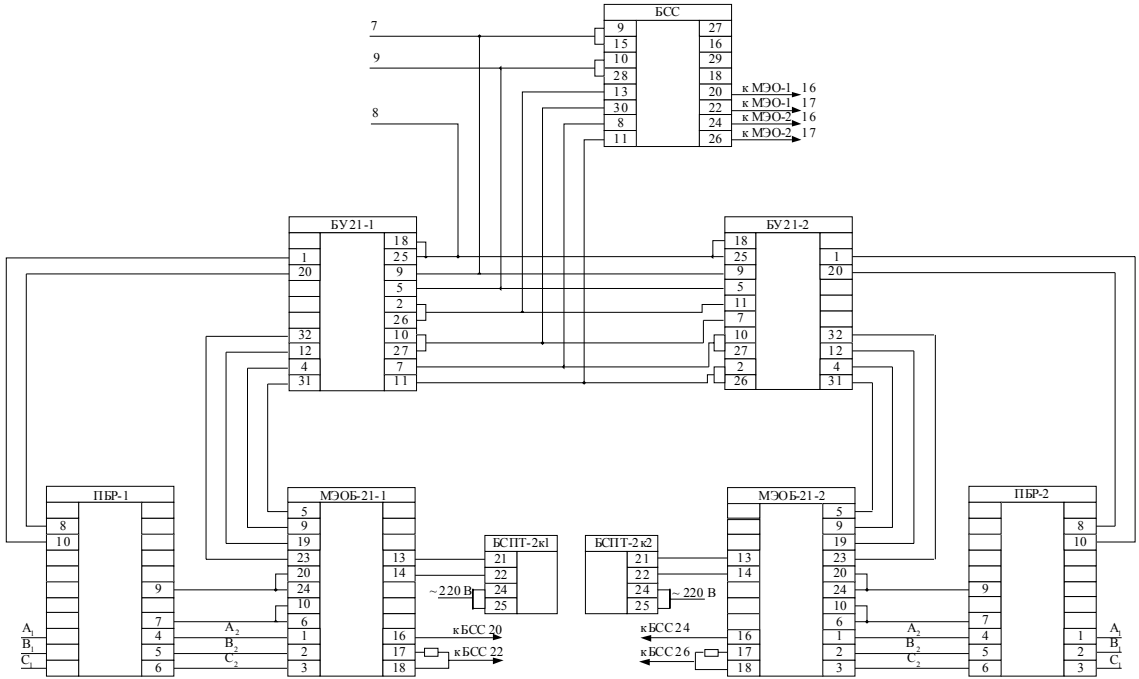
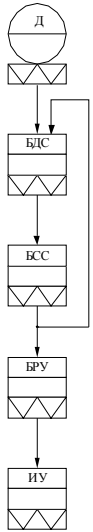
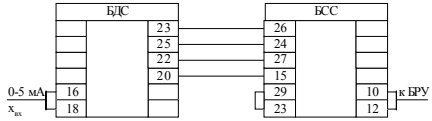


Рис. 6.20

Схема импульсного преобразователя на базе блоков БДС и БСС аппаратуры «АКЭСР-2»





Режим работы блоков и уставки

БДС - инерционное звено: $T_{ср} = 0; K_{\sum} = 1; \alpha_2 = 1;$

БСС - нуль-орган: $T_{ср} = 0; уставка - 100\%; \alpha_3 = 1;$

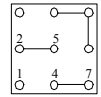
разность порогов - $y_0 = 0\%.$

Длительность включения $t_{вкл.}$ (при $x_{вх} = 10\%$) от 0,4 - 40 с устанавливается зоной возврата Δh_1 (БСС) и T_1 (БДС).

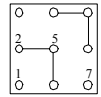
Скважность - $\psi = \frac{\alpha_2^{БДС} \cdot x_{вх}(\%)}{\alpha_3^{БДС} \cdot 100\%}.$

$$t_{вкл.} \to K \cdot \frac{\Delta h_1 \cdot T_1}{100 \cdot \alpha_3^{БДС} - x_{вх} \alpha_2^{БДС}}$$

Для реализации инерционного звена на колодке x_3 блока БДС установить перемычки:

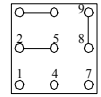


$T_Д = T_1$



$T_Д = 4T_1$

Для реализации нуль-органа на колодке x_5 блока БСС (при $y_0 = 0\%$) установить перемычки:



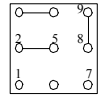


Рис. 6.21

Схема двухканального импульсатора на базе блоков ЛО3 и ДО5 аппаратуры «АКЭСР-2»

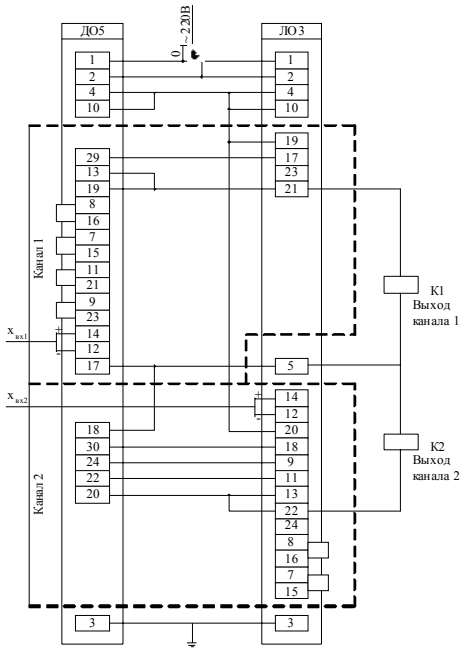


Рис. 6.22

Для канала 1

$$Q_1 = \frac{t_{вкл.1}}{t_{вкл.1} + t_{п.1}} = K_{п.1} \cdot x_{вх.1}$$

Для канала 2

$$Q_2 = \frac{t_{вкл.2}}{t_{вкл.2} + t_{п.2}} = K_{п.2} \cdot x_{вх.2}$$

Обозначения:

Q_i – скважность выходных импульсов соответствующего канала;
$t_{вкл.1}$, с – длительность включения;
$t_{п.1}$, с – длительность паузы;
$K_{п.1}$, с – коэффициент пропорциональности;
$x_{вх.1}$, с – величина входного сигнала, выраженная в относительных единицах от номинального диапазона его изменения.

Параметры настройки:

$$K_{п.1} = 1,25\frac{\alpha_{32}^{ДО5}}{\alpha_{31}^{ДО5}}, \quad t'_{вкл.1} = 0,65 + 0,1T_1 \text{ (с)};$$

$$K_{п.2} = 1,25\frac{\alpha_{32}^{ЛО3}}{\alpha_{31}^{ЛО3}}, \quad t'_{вкл.2} = 0,65 + 0,1T_2 \text{ (с)};$$

где $t'_{вкл.1}$ – длительность включения при $Q = 0,5$;
$\alpha_{32}^{ДО5}$, $\alpha_{31}^{ДО5}$ – установленные величины масштабных коэффициентов α_{31}, α_{32} блока ДО5;
$\alpha_{32}^{ЛО3}$, $\alpha_{31}^{ЛО3}$ – установленные величины масштабных коэффициентов α_{31}, α_{32} блока ЛО3;
T_1, T_2 – установленные величины масштабных постоянных времени T_1, T_2 блока ДО5.

Положение остальных органов настройки:

Блок ДО5: панели выбора номинальных диапазонов сигналов: «α_{11}» - «0-10 В»; «α_{33} – «0-10 В»; «α_{21}» – соответствует требуемому диапазону сигнала $x_{вх.1}$; панели выбора законов преобразования; канал 1 – «и»; канал 2 – «и»; «К1» – «1»; «множитель К1» – x_1; «К3» – «1»; «множитель К3» – «x_1»; «$T_{дф1}$» – «0»; «$T_{дф2}$» – «0».

Блок ЛО3: панели выбора номинальных диапазонов сигналов: «α_{11}» - «0-10 В»; «α_{33} – «0-10 В»; «α_{21}» – соответствует требуемому диапазону сигнала $x_{вх.2}$; «К3» – «1»; «множитель К3» – «x_1»; «β_1» – «0»; «β_2» – «0»; «$\tau_{дф1}$» – «0»; «$\tau_{дф2}$» – «0»; «Δ_1» – «5 %»; «Δ_2» – «5 %».

При использовании в любом из каналов внутреннего реле, внешнее реле К1 и (или) К2 не подключается, а клемма 21 с клеммой 23 (канал 1) и (или) клемма 22 с клеммой 24 (канал 2) соединяются перемычкой. При этом выходом канала 1 является контактный выход ЛО3 (клеммы 25, 27, 29), канала 2 – клеммы 26, 28, 30.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены конструктивные схемы промышленных регуляторов, построенные по структуре ВТИ на базе резисторов, емкостей, полупроводниковых усилителей и освоенные в 1950–1990 гг. Приведены схемы реализации основных, типовых АСР теплоэнергетических процессов. В состав работы включены разделы по статическим расчетам регулирующих устройств, не вошедшие в первую часть учебного пособия. Даны примеры расчетов статических и динамических параметров и реализация их на промышленных регуляторах. В дальнейшем предполагается в части третьей изложить особенности цифровых регулирующих устройств, методики расчётов параметров настройки контроллеров на микропроцессорной технике и сравнение результатов моделирования.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Временные* методические указания по наладке автоматических регуляторов на тепловых электростанциях. – М.: СПо ОРГРЭС, 1976.

2. *Методические* указания по наладке АСР, реализованных на базе аппаратуры ГСП «Каскад» и АКЭСР – МУ 34-70-087-83. – М.: СПо Союзтехэнерго, 1986.

3. *Методика* настройки автоматических систем регулирования на аппаратуре ГСП для тренажерной подготовки персонала цехов ТАИ (МТ 34-70-020-85). – М.: СПо Союзтехэнерго, 1987.

4. *Клюев А.С., Товарнов А.Г.* Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. – М.: Энергия, 1970.

5. *Рекомендации* по настройке автоматических систем регулирования теплоэнергетических процессов на моделирующем стенде. – М.: СПо Союзтехэнерго, 1978.

6. *Наладка* автоматических систем и устройств управления технологическими процессами. Справочное пособие / А.С. Клюев, А.Т. Лебедев, С.А. Клюев, А.Г. Товарнов, под ред. Клюева А.С. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

7. *Клюев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И.* Наладка автоматических систем регулирования барабанных парогенераторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

8. *Круг Е.К., Минина О.Н.* Электрические регуляторы. – М.: Госэнергоиздат, 1965.

9. *Штейнберг Ш.И., Увилевицкий О.Д., Ястребенецкий М.А.* Промышленные электрические регуляторы. – М.: Энергоатомиздат, 1976.

10. *Новиков С.И.* Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования. Ч. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.

11. *Стефани Е.П.* Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. Изд. 2. – М.: Энергия, 1972.

12. *Тверской Ю.С.* Автоматизация котельных агрегатов с прямым вдуванием. – М.: Энергоатомиздат, 1995.

13. *Добкин В.М., Дулеев Е.М., Фельдман Е.П.* Автоматическое регулирование на электростанциях. – М.: Госэнергоиздат, 1959.

14. *Лоскутов В.М.* Автоматизация малых котлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1965.

15. *Деянов В.А.* Автоматизация, сигнализация и защиты на тепловых электростанциях. – М.: Госэнергоиздат, 1959.

С.И. Новиков

ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Часть 2

АНАЛОГОВЫЕ РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И РЕАЛИЗАЦИЯ АСР

Учебное пособие

77

Редактор *И. Л. Кескевич*
Технический редактор *Н. В. Гаврилова*
Корректор *И. Е. Семенова*
Компьютерная верстка *С.Н. Кондратенко*

Подписано в печать 02.02.2007. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.
Тираж 150 экз. Уч.-изд. л. 4,88. Печ. л. 5,25. Изд. № 292. Заказ № .
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20