

11198283

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

—
Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

Анатолий Павлович ЕРМАКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА
РЕГЕНЕРАТОРОВ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ
УСТАНОВОК

(05.198 — Автоматизация производственных процессов)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —

доктор технических наук, профессор В. П. Беляков.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Н. Т. Романенко,

кандидат технических наук, доцент Г. А. Рябинин.

Ведущее предприятие — ГИПРОКислород.

Автореферат разослан « » 197 г.

Защита диссертации состоится « » 197 г.

на заседании Совета факультета «Энергомашиностроение»
МВТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Ба-
уманская ул., дом. 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью,
просим направлять по следующему адресу.

в библиотеке Учи-

М 198283

Фролов Е. С.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение кислорода и азота в химической промышленности и металлургии требует увеличения количества различных воздухоразделительных установок и повышения их мощности. Одним из важнейших направлений в увеличении производства высококачественных продуктов разделения воздуха является автоматизация технологических процессов.

На современном этапе развития кислородного машиностроения отечественные воздухоразделительные установки оснащены регенераторами, которые являются основными теплообменными и воздухоочистительными аппаратами, однако имеется тенденция к замене их в ряде случаев на пластинчато-ребристые теплообменники.

Инициаторами применения в СССР систем автоматического управления и регулирования температурным режимом регенераторов являются М.Б.Столпер и Б.И.Филиппов. Большой вклад в разработку систем авторегулирования внес В.Ф.Густов, который определил критерии оптимального управления регенераторами, состоящими из нескольких параллельно работающих аппаратов. Спроектированные ими системы не претерпели значительных конструктивных изменений и выпускаются промышленностью в настоящее время.

До последнего времени для автоматического управления температурным режимом регенераторов отечественных установок БР-1, БР-5, КТ-3600, БР-2М применяются локальные контуры регулирования. Такие системы стабилизируют температуру только нескольких аппаратов, входящих в группу, например, кислородных или азотных теплообменников.

Впервые работы по созданию и технической реализации много-связанных систем автоматического регулирования (МСАР) температуры регенераторов для отечественных установок были начаты автором в 1965 г. В качестве объекта регулирования был взят узел регенераторов установки БР-2, состоящий из шести пар аппаратов.

Система должна стабилизировать заданную разность температур на теплом и холодном концах регенераторов и обеспечивать наиболее экономический режим эксплуатации теплообменников, т.е. процесс автоматического управления должен осуществляться при макси-



Главными задачами исследования являлись следующие.

1. Анализ статических и динамических характеристик объекта регулирования по основным и перекрестным каналам. Представление узла регенераторов в качестве многосвязного объекта регулирования. Определение передаточных функций объекта с учетом организации потоков и взаимосвязанности регулируемых параметров.

2. Сравнительный анализ структурных схем систем и выбор структуры системы. Разложение многосвязной системы на ряд сепаратных систем. Определение передаточных функций каждой системы и их взаимовлияния при управляющих и возмущающих воздействиях. Исследование взаимовлияния систем и определение решений по исключению или ослаблению взаимосвязей между сепаратными системами.

3. Составление математической модели системы и исследование ее на устойчивость и качество регулирования в зависимости от настроечных параметров регулятора.

4. Экспериментальное исследование как одномерных, так и многосвязанных систем в условиях промышленной эксплуатации.

5. Составление программы расчета на ЭЦВМ системы стабилизации температурного режима регенераторов установки БР-2 с учетом реальных характеристик аппаратов. Проведение исследования на ЭЦВМ системы с целью определения оптимальных настроечных параметров регулятора.

II. Аналитическое исследование систем стабилизации температурного режима теплообменников

Во второй и третьей главах приведены аналитические исследования одномерных и многомерных систем авторегулирования.

Регенераторы, как объекты регулирования, работают в циклическом режиме. Информацию о температуре в силу ряда причин удобно получать из средней части аппарата или с его холодных концов.

Автоматическое управление температурным режимом теплообменника можно осуществить следующим приемом: произвести контроль температуры раз в цикл, а затем путем изменения положения дроссельной заслонки изменить количество прямого потока пропорционально отклонению температуры от заданной.

Циклическая работа теплообменников как объекта регулирования и дискретное снятие сигнала рассогласования, получающегося в результате измерения ошибки, дают основание рассматривать систему регулирования температуры регенераторов как дискретную или импульсную.

Импульсная система отличается от непрерывной наличием импульсного элемента, осуществляющего квантование сигнала по времени. Для системы автоматической стабилизации температуры удобно применять амплитудно-импульсный элемент, выходные импульсы которого имеют длительность $\tau = \gamma t_c$, где $\gamma \ll 1$, t_c - время цикла переключения теплообменников.

В результате анализа нелинейных элементов, входящих в систему, и моделирования на ЭЦВМ обоснована возможность представления их с достаточной степенью точности как линейные элементы.

Линейную импульсную систему с амплитудно-импульсной модуляцией можно представить в виде последовательного соединения простейшего элемента с передаточной функцией равной единице, формирующего элемента с передаточной функцией $K_{\text{ФТ}}(P)$ и непрерывной части системы с передаточной функцией $K_{\text{нт}}(p)$.

Для полного исследования системы определена передаточная функция разомкнутой импульсной системы $K_p^*(q, \varepsilon)$, которую можно найти двумя способами:

а) Д-преобразованием от дискретной импульсной переходной функции: $K_p^*(q, \varepsilon) = \mathcal{D}\{K_p[n, \varepsilon]\} = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-q\varepsilon n} K_p[n, \varepsilon]$;

б) $\mathcal{D}$ -преобразованием от передаточной функции приведенной непрерывной части в относительном масштабе времени

$$K_p^*(q, \varepsilon) = \mathcal{D}\{K_p(q)\} = \sum_{q=0}^{\infty} e^{-q\varepsilon} K_p(q)$$

Анализ устойчивости замкнутой импульсной системы производился аналогом критерия устойчивости Гурвица и аналогом критерия Найквиста-Михайлова для импульсных систем.

Построение переходного процесса осуществлялось на основании разностных уравнений замкнутой импульсной системы.

$$y[n, \varepsilon] = \sum_{\ell=0}^n 1[n-\ell] \cdot K_s[\ell, \varepsilon];$$

$$K_s[n, \varepsilon] = K_p[n, \varepsilon] - \sum_{\ell=0}^{n-1} K_p[\ell, \varepsilon] \cdot K_s[n-\ell-1, \varepsilon]$$

В работе приведена методика расчета САУ температурным режимом теплообменников и дан расчет САУ температурой кислородного регенератора установки БР-I. В результате аналитического исследования системы получены зависимости показателей качества регулирования от настроечных параметров регулятора.

Систему стабилизации температурного режима группы теплообменников следует рассматривать как многосвязанную систему автоматического регулирования.

К первым работам по теории МСАР следует отнести исследования проф. И. Н. Вознесенского, который сформулировал принцип автономности МСАР по собственным движениям сепаратных систем.

В последнее время теория автоматического регулирования и управления бурно развивается, однако лишь небольшая часть из общего числа работ в этой области посвящена теории МСАР.

Математическим аппаратом МСАР служит теория линейных дифференциальных уравнений. Структурные особенности МСАР (наличие нескольких каналов передачи воздействий и перекрестных связей между ними) вызывают различия в методах исследования и приводят к необходимости разработки специальных приемов исследования и расчетов МСАР.

Взаимосвязанные и многоконтурные регулируемые системы относятся к сложным динамическим системам. При их разработке большое, а иногда, решающее значение приобретают структурные решения. Для получения подобных решений должны быть построены специальные математические модели, позволяющие определять структурные свойства систем.

Для исследования целесообразно разделение взаимосвязанных систем на более простые элементарные подсистемы. Такие операции не всегда однозначны и очевидны, но они необходимы, так как позволяют выявить взаимные влияния одних элементарных подсистем на другие.

Многомерный объект управления, содержащий m регулируемых параметров, требует создания многомерной системы управления. Размерность системы равна количеству регулируемых параметров. По каждой регулируемой величине создается собственный контур регулирования, который связан с другими контурами через объект

регулирования и измерительные элементы.

В результате анализа объекта регулирования с учетом технологических требований к процессу управления были определены принципы построения и выбора структуры МСАР:

1. Разделить аппараты на группы с существенными и несущественными перекрестными связями.
2. В группе с несущественными связями следует использовать независимые контуры регулирования для каждого аппарата.
3. Для группы с существенными связями необходимо синтезировать систему связанного регулирования.
4. При синтезе МСАР не следует исключать перекрестные связи применением дополнительных корректирующих устройств, а использовать их путем коммутации измерительных цепей, что обеспечивает независимое движение отдельных систем и придает системе лучшие динамические качества.

На рис. I изображена многосвязная система, содержащая $(m + 1)$ контуров регулирования. Основная идея алгоритма управления заключается в выравнивании температур между парами аппаратов, причем выравнивание температурного режима осуществляется относительно эталонной пары и стабилизации средней температуры всех аппаратов.

Для сокращения записи оператор (P) передаточных функций регулятора и объекта опущен.

m_{22} - регулируемая величина является эталонной. Относительно неё осуществляется выравнивание $(m - 1)$ регулируемых параметров. $(m + 1)$ контур производит регулирование среднего значения регулируемых параметров. За эталонную регулируемую величину принимается такая величина, в контуре регулирования которой регулируемый орган полностью открыт, и регулирующее воздействие в этом контуре не формируется. Регулирование m -го параметра производится за счет перекрестных связей с другими контурами регулирования.

Ошибки рассогласования ϵ_k между текущими значениями регулируемых параметров и заданными значениями U_{ko} формируются в сравнивающем устройстве и имеют вид:

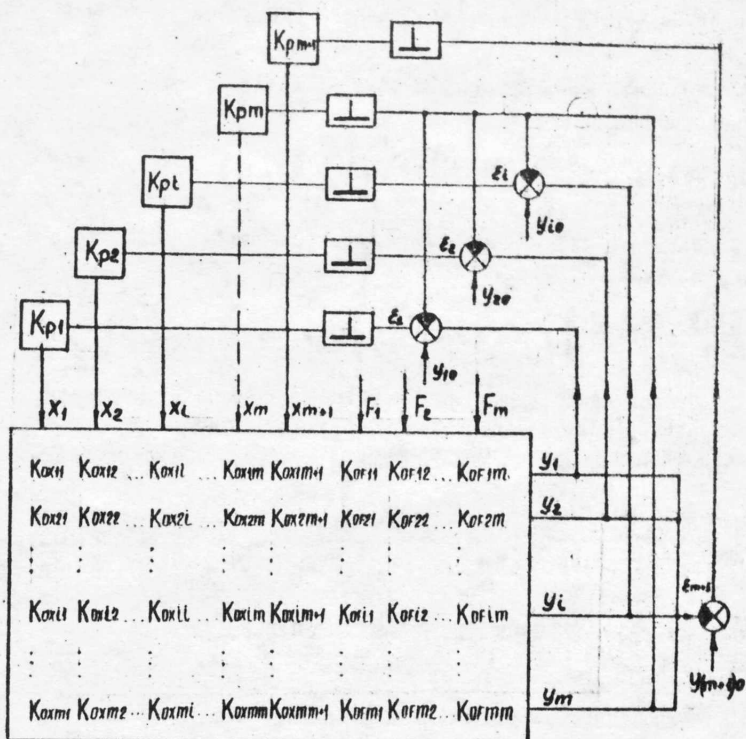


Рис.1 Структурная схема МСАР.

$$\varepsilon_k = y_{ko} - (y_k - y_m), \quad \varepsilon_{m+1} = y_{m+1o} - \sum_{k=1}^m y_k.$$

Полагая, что аппараты одинаковы, можно найти передаточные функции объекта регулирования по основным и перекрестным каналам: $K_{ооик}(p) = K_o$, $K_{окиi}(p) = -\frac{1}{m-1} K_o$.

Тип и настройку регулятора примем одинаковыми для каждого канала, тогда передаточная функция регулятора имеет вид: $K_{rk} = K_r$.

На основании вышеизложенного можно записать уравнение для каждой отдельной системы:

$$y_i = K_o K_r \varepsilon_i - \frac{K_o K_r}{m-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{m-1} \varepsilon_k + K_o K_r \varepsilon_{m+1} + \sum_{j=1}^m F_j K_{orij}.$$

Подставляя в уравнение системы значения ошибки рассогласования ε_k , получим:

$$\left(\frac{1 + 2K_o K_r}{K_o K_r} \right) y_i + \frac{m-2}{m-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m y_k = y_{io} - \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m y_{ko} - y_{m+1o} + \frac{1}{K_o K_r} \sum_{\substack{j=1 \\ l=1, 2, \dots, m}}^m F_j K_{orij}.$$

Представив данное уравнение в матричной форме и произведя преобразования, получим передаточные функции ИСАР по основным и перекрестным каналам по управляющим и возмущающим воздействиям:

$$\frac{y_i}{y_{io}} = \frac{K_o K_r}{1 + \frac{m}{m-1} K_o K_r}, \quad \frac{y_{ki}}{y_{ko}} = -\frac{\frac{1}{m-1} K_o K_r}{1 + \frac{m}{m-1} K_o K_r}, \quad \frac{y_i}{y_{m+1o}} = \frac{K_o K_r}{1 + \frac{m}{m-1} K_o K_r},$$

$$\frac{y_i}{F_k} = \frac{B_{ik} K_o K_{orik}}{1 + \frac{m}{m-1} K_o K_r}, \quad \frac{y_k}{F_k} = \frac{K_o K_{orik}}{1 + \frac{m}{m-1} K_o K_r}.$$

где B_{ik} — коэффициент, учитывающий величину, знак и характер возмущающего воздействия в зависимости от назначения и организации потоков в теплообменниках.

Полученные передаточные функции полностью отражают динамические свойства системы, и по их структуре можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением количества пар аппаратов взаимосвязь регулируемых параметров уменьшается из-за стремления к "0" коэффициента $\frac{1}{m-1}$.

2. С увеличением количества пар аппаратов устойчивость системы увеличивается из-за стремления к "1" коэффициента $\frac{m}{m-1}$. Однако при этом размерность системы увеличивается. Поэтому при проектировании систем следует учитывать это противоречие.
3. Коммутацией измерительных цепей достигнута автономная работа системы, т.е. движение одной сепаратной системы не возбуждает другие системы.

III. Экспериментальные исследования систем автоматической стабилизации температуры регенераторов.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований систем автоматической стабилизации температуры регенераторов в составе воздухоразделительных установок.

В работе приведен анализ динамических характеристик объекта регулирования и результаты экспериментальных исследований. Особенности динамических характеристик регенераторов обуславливаются их циклической работой и различной взаимосвязанностью аппаратов от возмущающих и управляющих воздействий.

Приведенные в работе экспериментально снятые характеристики аппаратов показали, что передаточные функции аппаратов и степень их взаимосвязей различны. Это обусловлено конструкцией, назначением и различной организацией потоков.

В результате анализа узла регенераторов установки БР-2 разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию система автоматической стабилизации температурного режима регенераторов.

Регенераторы технического и технологического кислорода охвачены независимыми контурами регулирования, а температура трех пар азотных регенераторов стабилизируется многосвязанной системой авторегулирования, в состав которой входят три типа контуров регулирования:

1. Контур выравнивания температуры в паре регенераторов.
2. Контур выравнивания средних температур между парой регенераторов относительно эталонной пары, регулирующий орган которой полностью открыт.
3. Контур регулирования заданной средней температуры всех

регенераторов.

Оценка качества регулирования производилась по параметрам переходных функций каждого контура регулирования, а также статистическим методом.

В диссертации изложено исследование одноконтурных систем регулирования на примере кислородных регенераторов установок БР-1 и БР-5.

В результате анализа погрешностей измерений температуры выявлено влияние продуктов высадки воздуха на динамические характеристики термометра сопротивления. Рассмотрен способ импульсного обогрева термометров, осуществляющий возгонку продуктов высадки с рабочей поверхности термометра. Исследована измерительная схема температуры и предложен способ, уменьшающий погрешность измерений.

Проведенные экспериментальные исследования, результаты которых изложены в работе, полностью подтвердили выводы, полученные аналитическим исследованием.

IV. Расчет МСАР температурным режимом регенераторов установки БР-2 на ЭЦВМ

В пятой главе изложена методика составления программы расчета системы на ЭЦВМ и проведено исследование математической модели МСАР температурного режима регенераторов установки БР-2.

На основании динамических характеристик объекта регулирования выбрана структура системы и характеристики звеньев управляющей части, которые способны обеспечить заданные или оптимальные в определенном смысле динамические характеристики МСАР в целом.

Исследование полученной математической модели выявили динамические свойства системы и позволили дать рекомендации по выбору настроечных параметров регулятора в зависимости от показателей качества регулирования. Анализ результатов исследования показал правильность выбора структуры системы и возможность использования методики расчета системы для вновь проектируемых систем.

ВЫВОДЫ

1. В результате сравнительного анализа различных систем авторегулирования температурного режима регенераторов автором обоснована необходимость создания системы, позволяющей вести наиболее экономичный режим работы узла регенераторов, обеспечивающий минимальные гидравлические потери на регулирующих органах, т.е. при максимально открытых регулирующих органах, причем один из них полностью открыт. Принципиальное отличие предложенной системы заключается не в исключении взаимосвязей параметров объекта регулирования при помощи дополнительных корректирующих устройств, а в использовании этих связей при авторегулировании для придания системе лучших динамических качеств.

2. В результате исследования одноконтурных и многосвязанных систем автоматической стабилизации температурного режима регенераторов рекомендована методика расчета систем и выбора оптимальных настроечных параметров регулятора в зависимости от динамических характеристик объекта регулирования и степени взаимосвязей аппаратов. Обоснована возможность применения данной методики для расчета систем стабилизации температуры реверсивных пластинчато-ребристых теплообменников.

3. Выведены передаточные функции системы по основным и перекрестным каналам. При этом определены количественные значения коэффициентов, влияющих на устойчивость системы и зависящих от числа пар аппаратов.

4. Составлена программа расчета на ЭЦВМ системы стабилизации температурного режима регенераторов установки БР-2. Передаточные функции объекта регулирования получены на основании экспериментально снятых статических и динамических характеристик. Проведено исследование системы при различных значениях параметров настройки регуляторов. Даны рекомендации по расчету систем, находящихся в стадии проектирования.

5. На основании полученных результатов исследований разработан ряд новых элементов автоматики. Электромеханическое командное устройство, управляющее механизмом переключения регене-

раторов и системой автоматики защищено авторским свидетельством № 333549 от 1 апреля 1970 г.

6. Проведен анализ точности измерения температуры. Предложены схемы, уменьшающие погрешности измерений, и устройство, позволяющее улучшить динамические характеристики термометров сопротивлений путем возгонки продуктов высадки с рабочей поверхности термометра.

7. Экспериментальные исследования рекомендованных систем в условиях промышленной эксплуатации наглядно подтвердили их работоспособность и удовлетворительное совпадение результатов аналитических и экспериментальных исследований.

8. На основании выводов и рекомендаций данной работы были созданы и внедрены в производство системы стабилизации температуры регенераторов установок БР-1, БР-5, БР-2 Криворожского и Ждановского металлургических заводов, а также продолжают внедряться в новых воздухоразделительных установках КТА-33, КАР-13,5, КА-5, АКТ-17-2, А-8. Проведенные промышленные испытания новых систем подтвердили их удовлетворительные эксплуатационные качества.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ермаков А.П., Видинеев Ю.Д., Покора Н.М., Литвиенко И.П. Система автоматической стабилизации температуры кислородных регенераторов установок БР-1, БР-5. Гипроокислород, Кислородная промышленность № 2, М., 1970.
2. Ермаков А.П., Видинеев Ю.Д., Семилетов В.Л., Покора Н.М. Опыт эксплуатации системы автоматической стабилизации температурного режима регенераторов. Гипроокислород, Кислородная промышленность № 2, М., 1970.
3. Семилетов В.Л., Видинеев Ю.Д., Ермаков А.П., Сечков А.И.

Системы автоматической стабилизации температурного режима регенераторов, Кислородная промышленность № 3, Гипрокислород, М., 1970.

4. Бебяков В.П., Ермаков А.П., Махлина В.Я., Ломко Н.Г., Система автоматического выравнивания температурного режима пары регенераторов, Кислородная промышленность № 2, Гипрокислород, М., 1972.
5. Ермаков А.П., Мизерова Ю.И., Видинеев Ю.Д., Корнев В.М., Командное электромеханическое устройство для переключения регенераторов воздухоразделительных установок, Кислородная промышленность № 2, Гипрокислород, М., 1972.
6. Ермаков А.П. и другие, Командное электромеханическое устройство, Авторское свидетельство № 333549, Бюллетень изобретений № II, М., 1972.

