

На правах рукописи



Ляшенко Александр Иванович

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ
ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
(на примере отделения синтеза в производстве метанола)**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая технология; нефтехимия и нефтепереработка; биотехнология)

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Проблеме энергосбережения и повышения энергетической эффективности за рубежом и в нашей стране уделяется пристальное внимание. По данным Международного энергетического агентства (IEA) Россия занимает место в тройке крупнейших производителей первичных топливно-энергетических ресурсов (10 % мирового производства). В то же время эффективность использования энергии и ресурсов уступает аналогичным показателям в передовых иностранных государствах. Поэтому проблема энергосбережения для нашей страны является особенно актуальной. На современном этапе большое значение приобретает техническая экономия энергии. Особенно велики резервы в технологических процессах (ТП). При всем многообразии подходов к энергосбережению, весьма недооцененным остается управленческий подход, заключающийся в создании на научной основе автоматизированных производств и АСУ ТП с учетом их оптимизации по энергетическим критериям.

Анализ структуры типовых химико-технологических систем (ХТС) показывает, что в большинстве из них имеется несколько каналов управления одной технологической величиной. Традиционно при построении систем управления выбор регулирующего воздействия осуществляется исходя из лучших динамических свойств соответствующего канала управления. Задача энергосбережения, однако, ставится редко. Оптимизировать процессы управления одновременно по динамическим и энергетическим показателям можно путем организации многоконтурных САУ с избыточным числом управляющих воздействий. Решению вопросов энергоэкономии за счет создания САУ со специальной структурой посвящены труды профессора Д.П. Вента, в которых поднята проблема создания и введены основные понятия энергосберегающих систем управления. Избыточность в управлении приводит к появлению новых специфических свойств таких систем и требует дополнительных исследований.

Объектом исследования являются сложные ХТС, в которых для воздействия на одну и ту же регулируемую переменную имеется несколько каналов управления, отличающихся по динамическим и энергетическим свойствам.

Предметом исследования выступают энергосберегающие системы автоматического регулирования (ЭСАР), позволяющие добиться высоких показателей качества в динамических режимах при компенсации внешних возмущений и одновременно повысить энергоэффективность в статических режимах, а также вопросы их практического применения для поддержания оптимального профиля температур по высоте химического реактора полочного типа в агрегате производства метанола М-100.

Целью работы является синтез и анализ ЭСАР при действии на объект управления детерминированных возмущающих воздействий.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Синтез вариантов структур ЭСАР и исследование их работы при действии возмущений детерминированного характера.
2. Разработка методики расчета ЭСАР.

3. Разработка программного комплекса для эксергетического анализа ХТС с целью синтеза ЭСАР.
4. Анализ реакторного узла в производстве метанола как объекта построения ЭСАР.
5. Обоснование выбора законов регулирования в ЭСАР.
6. Анализ результатов моделирования работы ЭСАР.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы математического моделирования, теории автоматического управления, системного анализа, оптимизации, эксергетический метод термодинамического анализа, принципы объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена концепция новых энергосберегающих САР (ЭСАР), использующих избыточность в управляющих воздействиях.
2. Разработана методика расчета ЭСАР с фильтрами скользящего среднего.
3. Разработан универсальный алгоритм определения эксергетической чувствительности ХТС, позволяющий выделить в ее составе энергоэффективный канал управления.
4. Разработаны компьютерная модель ЭСАР, позволяющая исследовать ее динамические свойства, и алгоритм автоматизированного расчета параметров системы.
5. Получена математическая модель динамического и статического режима работы реактора синтеза метанола полочного типа, учитывающая процесс охлаждения газа основного хода между адиабатическими слоями катализатора одновременно с помощью подвода холодных байпасов (ХБ) и съема тепла реакции в межполочных утилизационных теплообменниках (МУТ).
6. Рассчитана эксергетическая чувствительность статических режимов работы колонны синтеза метанола, исследован характер ее изменения в зависимости от изменения режимных параметров процесса.
7. Предложен способ регулирования температуры по высоте реактора синтеза метанола, и синтезирована ЭСАР для его осуществления.
8. Проведен сравнительный анализ качества регулирования в новых разработанных ЭСАР температуры и в традиционных одноконтурных системах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Варианты структур ЭСАР и методика их расчета.
2. Методика эксергетического анализа ХТС с целью синтеза ЭСАР.
3. Математические модели статических и динамических режимов работы реакторного узла в производстве метанола при использовании различных схем охлаждения реактора (с помощью ХБ или МУТ, путем одновременного использования ХБ и МУТ).
4. Результаты эксергетического исследования реакторного узла при поддержании заданного температурного режима реактора отдельно с помощью ХБ, отдельно с помощью МУТ, а также посредством комбинации этих способов охлаждения.
5. Результаты имитационного моделирования тепловых процессов в реакторе синтеза метанола при использовании традиционных одноконтурных САР с ХБ и МУТ и предлагаемой ЭСАР температуры с двумя управляющими воздействиями.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются использованием апробированных научных положений и методов исследования, корректным применением математического аппарата, сопоставлением результатов численных экспериментов с известными теоретическими и эмпирическими зависимостями, с регламентными и режимными параметрами, полученными на агрегате производства метанола М-100. Все это позволяет говорить об адекватности разработанных математических моделей и работоспособности созданных алгоритмов и программ.

Практическая значимость диссертации:

- разработаны варианты структур новых САР с избыточностью в управляющих воздействиях – ЭСАР, подтвержденные патентом РФ. Их применение позволяет повысить энергетическую эффективность химико-технологических процессов (ХТП) при одновременном обеспечении высокой динамической точности функционирования, а упрощенная процедура расчета ЭСАР дает возможность настраивать их непосредственно по месту на действующем производстве;

- на основании предложенного алгоритма определения энергоэффективного канала управления разработана автоматизированная система расчета, которая может быть использована для анализа сложных энергоресурсоемких ХТС;

- разработана программа для расчета и моделирования ЭСАР с фильтрацией методом скользящего среднего, позволяющая в интерактивном режиме исследовать ее свойства на примере типовых моделей объектов управления;

- с использованием реализованных алгоритмов и программ даны конкретные рекомендации по энергосберегающей модернизации агрегата производства метанола М-100 путем интеграции ЭСАР температуры по высоте реактора, что позволяет повысить технико-экономические показатели ХТП (получен **акт о возможности внедрения** ЭСАР температурного режима реактора синтеза метанола на ОАО НАК «Азот»).

Апробация работы подтверждена патентом на изобретение «Энергосберегающая система автоматического регулирования», свидетельствами о регистрации электронных ресурсов на автоматизированную систему расчета эксергетической чувствительности ХТС ExergySensCTS и программу для расчета и моделирования ЭСАР с фильтрацией методом скользящего среднего. Основные положения диссертации обсуждались на XIII-XV научно-технических конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов, на XXIX научной конференции профессорско-преподавательского состава и сотрудников НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева (Новомосковск, 2011-2013 гг.).

Личный вклад автора. Автор принимал участие на всех этапах исследования. В частности, в разработке структуры ЭСАР с фильтрами скользящего среднего и методики ее расчета; программы для автоматизированного расчета и моделирования ЭСАР; программного комплекса для эксергетического анализа ХТС с целью создания ЭСАР; в проведении математического моделирования работы реакторной подсистемы в производстве метанола и ее эксергетического анализа для выявления энергосберегающей схемы охлаждения реактора и синтеза вариантов ЭСАР температуры.

Количество и вид публикаций. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, из них 5 публикаций в журнале, рекомендованном ВАК, получен 1 патент на изобретение и 2 авторских свидетельства о регистрации электронных ресурсов.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 274 страницах машинописного текста, включая 17 таблиц, 93 рисунка. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (164 источника), и приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и основные задачи, изложена научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы энергосбережения в химической промышленности в целом и теории энергосберегающих систем управления объектами химической технологии в частности.

Анализ показал, что на настоящий момент промышленно значимые энергосберегающие мероприятия представлены двумя основными категориями:

1. Разработка новых энергосберегающих технологий. Сюда относятся разработка энергосберегающих процессов и аппаратов; наращивание единичной мощности производства; интенсификация ХТП; интеграция процессов химической технологии.
2. Улучшение использования топливно-энергетических ресурсов в уже существующих технологиях. К этой категории следует отнести утилизацию вторичных энергетических ресурсов; термодинамические методы исследования ХТС; эффективный контроль и управление технологическими процессами и производствами.

В условиях повсеместного усложнения ТП, истощения основных производственных фондов и работы в форсированных режимах, именно комплексная автоматизация производства выступает незаменимым механизмом для реализации потенциальных промышленных резервов, в том числе и по повышению энергетической эффективности. Должны повышаться требования к современным САУ и САР, процесс функционирования которых должен учитывать параллельно многие показатели (экономичность, быстродействие, надежность, гибкость и т.д.). Повысить энергоэффективность ХТП предлагается путем правильного перераспределения материальных и энергетических потоков внутри конкретных агрегатов в рамках АСУ ТП производства на уровне непосредственного управления за счет создания ЭСАР.

Во второй главе исследованы особенности построения энергосберегающих САР, формулируются основные задачи синтеза и анализа ЭСАР.

При создании ЭСАР обобщенный критерий оптимизации должен одновременно учитывать как высокоточное функционирование системы в динамических режимах, так и влияние на уровень энергосбережения в статике. Для этих целей необходимо применять многоконтурные САР с числом управляющих воздействий, превышающим число управляемых переменных. Общая структура ЭСАР, на которую получен патент [6], представлена на рис. 1. Отличительной особенностью данной системы является

наличие в каждом канале управления полосовых фильтров, которые позволяют разделить работу контуров регулирования в зависимости от их частотных свойств и влияния на критерий энергосбережения. Т.е. спектральная плотность внешнего возмущающего воздействия условно раскладывается на отдельные составляющие, и каждый канал управления настраивается на подавление определенной части спектра возмущения. Наиболее быстродействующий по динамике контур подавляет высокочастотную составляющую, а наиболее инерционный (энергоэффективный) контур подавляет низкочастотную составляющую. Подобное разделение

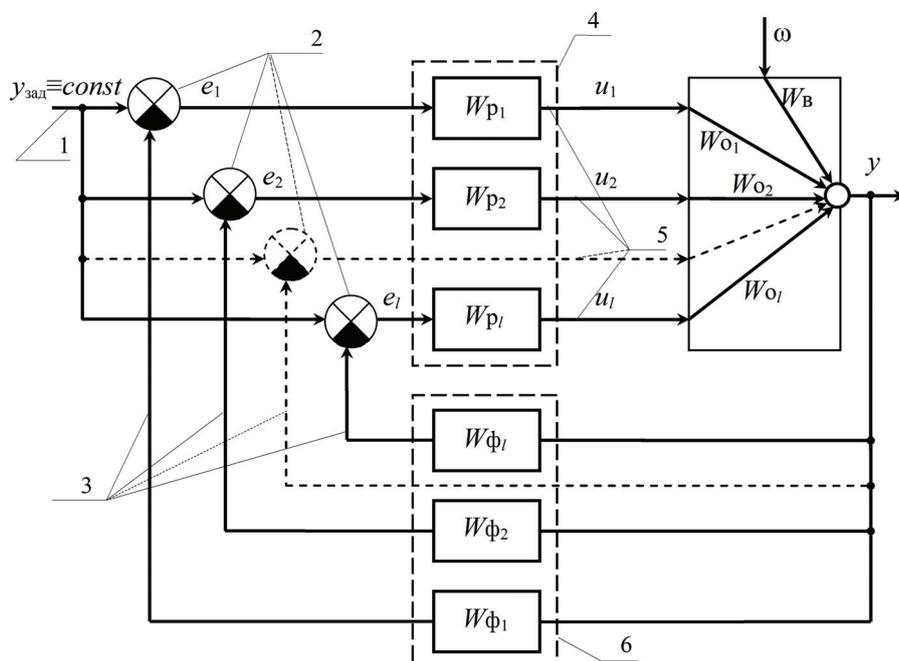


Рис.1. Структурная схема ЭСАР: 1 – входной канал задания; 2 – сумматоры; 3 – сигналы ООС; 4 – регуляторы; 5 – регулирующие воздействия по каналам управления; 6 – блок полосовых фильтров

свойств каналов обеспечивает в целом динамическую точность и энергетическую эффективность, а также упрощает и расчет настроек регуляторов, который становится независимым.

При синтезе ЭСАР нужно правильно выбрать тип и структуру фильтров, которые не привносили бы существенного запаздывания, определить их настройки и разработать методику расчета ЭСАР с такими фильтрами. Решение данной задачи также связано с оптимизацией работы системы в статике по критерию энергосбережения.

В ХТС часть энергии затрачивается на стабилизацию режимов функционирования по причине постоянно действующих возмущений. Анализ большинства схем регулирования указывает на то, что подвод в ХТС управляющих воздействий связан с изменением положения дросселирующих устройств, с изменением подачи тепло- и хладагентов, со сжиганием топлива и с подводом электрической мощности, с регулированием путем смешения потоков различного потенциала. С термодинамической точки зрения эти процессы необратимы и протекают с уменьшением способности системы производить работу. Следовательно, при управлении преобладают безвозвратные потери качества энергии – потери эксергии, а разработку структуры и оценку эффективности САР целесообразно осуществлять с использованием эксергетического метода анализа, позволяющего учесть потенциальную работоспособность энергии, которая не находит отражения в типовом энергетическом балансе. Это даст возможность выявить скрытые резервы для энергосбережения в управляемых ХТС.

Для оценки энергетических свойств управляющих воздействий в структуре ХТС предлагается использовать понятие эксергетической чувствительности, которая равна

шего воздействия условно раскладывается на отдельные составляющие, и каждый канал управления настраивается на подавление определенной части спектра возмущения. Наиболее быстродействующий по динамике контур подавляет высокочастотную составляющую, а наиболее инерционный (энергоэффективный) контур подавляет низкочастотную составляющую. Подобное разделение

$$\alpha_i = \frac{\partial D(u_i, y, \bar{\omega})}{\partial y}, \quad (1)$$

где α_i – эксергетическая чувствительность режима работы ХТС к изменению регулирующего воздействия по i -му каналу управления; $D(u_i, y, \bar{\omega})$ – эксергетические потери в ХТС, возникающие при управлении i -ым каналом; y – значение регулируемой переменной; $\bar{\omega}$ – фиксированный вектор возмущений.

Выбор энергоэффективного канала связан с решением оптимизационной задачи: $\alpha_i \rightarrow \min_i$ (где i – номер канала управления). Разрешив данную задачу для отдельных микро-технологических узлов путем интеграции ЭСАР, можно минимизировать и суммарные потери эксергии, затрачиваемые на проведение процесса управления всей ХТС.

С использованием принципов объектно-ориентированного программирования на языке C++ разработан программный комплекс, в который входят программы ExergyCalc и ExergySensCTS, позволяющие проводить необходимые расчеты эксергетических характеристик ХТС при синтезе ЭСАР. На рис. 2 представлена диаграмма классов (соответствующая исходному коду C++), описывающая логическую структуру разработки. Для определения основных характеристик ХТС написан базовый класс «UnitCTS». На его основании, благодаря механизму наследования, удалось перейти к производным классам (библиотека элементарных технологических операторов), которые наследуют общее описание ХТС и в то же время обладают своими уникальными свойствами и математическими моделями, определяющими связь между параметрами входных и выходных потоков. Объекты класса «UnitCTS» используются классом «ExergyAnalysisCTS» с реализованной методикой расчета

эксергии, по которой содержимое ХТС рассматривается как «черный ящик», т.е. значение имеет лишь вектор входных и выходных потоков и связывающий их математический оператор.

Первоначально при анализе ХТС на предмет построения ЭСАР с помощью программы ExergyCalc рассчитывается эксергетический ба-



Рис. 2. Логическое представление разработанной программной системы для эксергетического исследования ХТС

ланс, определяются технологические узлы, в которых потери эксергии связаны с подводом управляющих воздействий. Далее рассчитывается эксергетическая чувствительность ХТС (1). Для ее определения разработан универсальный алгоритм (рис. 3), концепция которого

заключается в последовательном определении реакции регулируемой переменной и величины потерь эксергии, затрачиваемых для поддержания режима работы ХТС, на приращение регулирующего воздействия по тому каналу управления, влияние которого исследуется (при постоянстве остальных компонент вектора управлений).

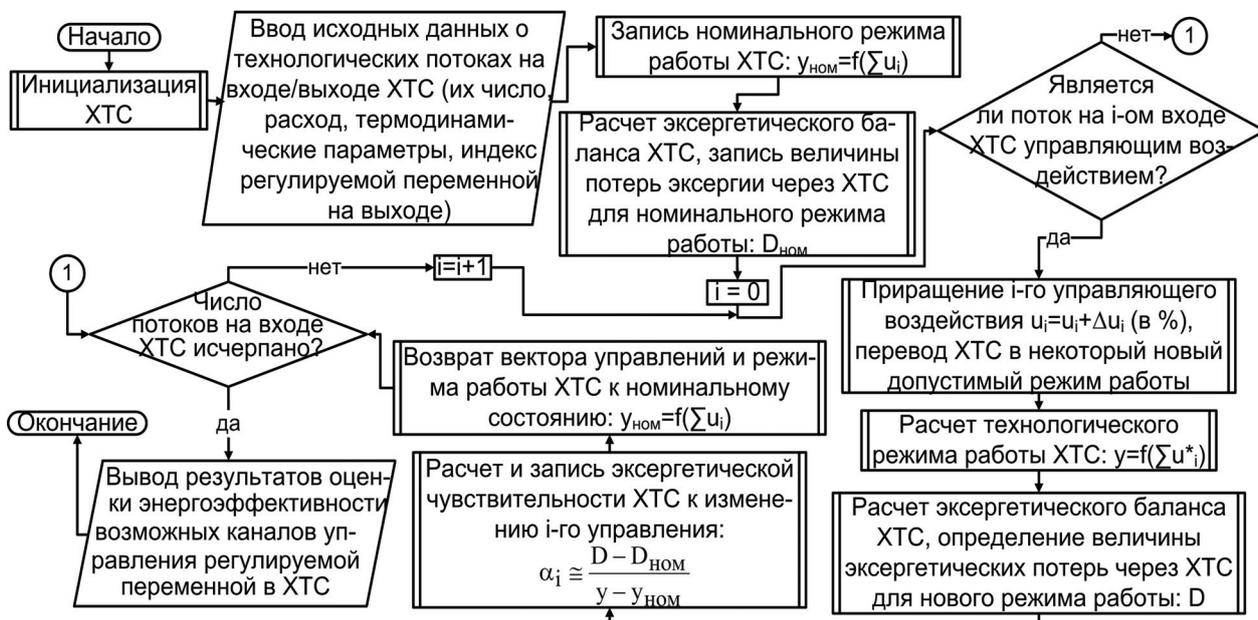


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета эксергетической чувствительности ХТС

Представленный алгоритм был реализован в программе ExergySensCTS, на которую получено свидетельство [7]. С помощью программы пользователь может исследовать ХТС различной структуры и получать оценочный результат относительно того, как влияет на уровень энергосбережения выбор возможных каналов управления. Канал с наименьшей эксергетической чувствительностью является более предпочтительным с позиции энергосберегающего управления ХТС в статических режимах.

В третьей главе анализируется возможность практического применения ЭСАР. В качестве объекта выбран ХТП синтеза метанола. Весомые потери энергии связаны с отводом тепла реакции и приходятся на реакторную подсистему синтеза, которая влияет на эффективность функционирования ХТС в целом. Поэтому важной задачей является точное поддержание температурного режима по высоте реактора как в статике, так и в динамике в определенном диапазоне (близком к изотермическому 250-260 °С), определяемом кинетикой и влияющим на количество и качество метанола. В реакторах полочного типа с несколькими последовательно расположенными адиабатическими слоями катализатора (к которым относится и реактор в агрегате типа М-100) оптимальный тепловой режим поддерживают, чаще всего, путем ввода между слоями ХБ. Однако отвод реакционного тепла может быть осуществлен и посторонним теплоносителем, например, водой, циркулирующей через змеевики МУТ, с последующей выработкой пара в котле-утилизаторе. В структуре производства были выделены основные технологические операторы: химическое превращение (слой катализатора), механическое разделение (делитель потоков), смешение (смесительная камера), теплообмен (МУТ, рекуператор), получены соответствующие кинетические и

гидродинамические модели, описывающие их работу в случае охлаждения газа в реакторе с помощью ХБ или МУТ. Проверка на адекватность была проведена с использованием промышленных данных с агрегата М-100 (НАК «Азот», г. Новомосковск) и известных в этой предметной области экспериментальных зависимостей. Ошибка составила ~ 7-9%. По данным моделирования статических режимов работы реакторного узла в программе ExergyCalc рассчитан эксергетический баланс при различных способах поддержания температурного профиля, на основании чего построены диаграммы (рис. 4-5). С позиции термодинамического совершенства охлаждение газа основного хода путем прямого смешения с газом байпасного хода, отличным по энергетическому потенциалу, сопровождается большими потерями эксергии, нежели охлаждение с помощью отвода тепла реакции в МУТ с последующей утилизацией. Т.е. ХБ снижают энергоэффективность процесса, из-за чего их использование нужно сводить к минимуму. Однако анализ динамических режимов работы реактора показывает, что использовать МУТ для стабилизации температуры при компенсации возмущений нецелесообразно (практически невозможно) из-за существенной инерционности каналов системы охлаждения, в отличие от ХБ, управление которыми характеризуется высоким быстродействием.

Добиться высоких динамических показателей работы реактора и в то же время получить выгоду в энергетическом отношении можно путем комбинирования обоих способов охлаждения. Для исследования процесса охлаждения газа в смешительном объеме между слоями с катализатором одновременно с помощью ХБ и МУТ разработана соответствующая комбинированная тепловая модель (2), описывающая гидро-

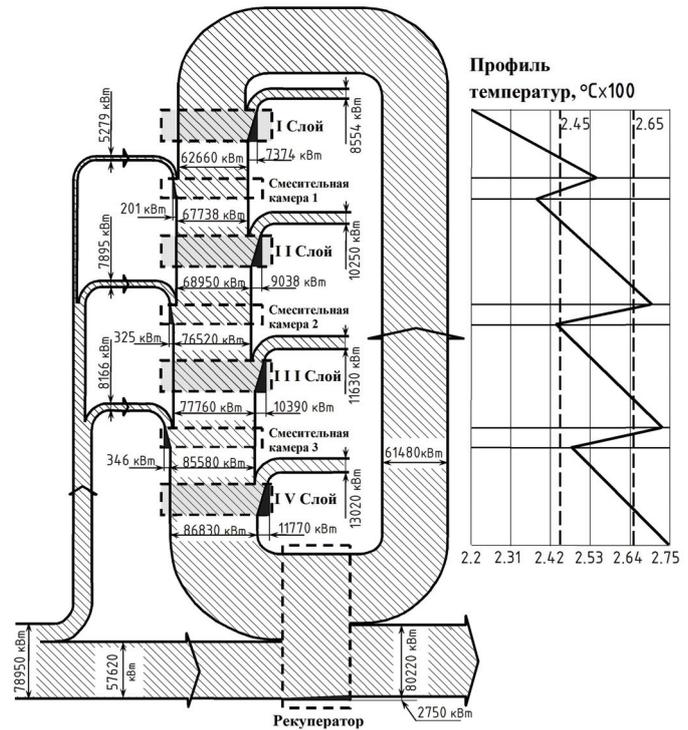


Рис. 4. Эксергетическая диаграмма схемы с ХБ

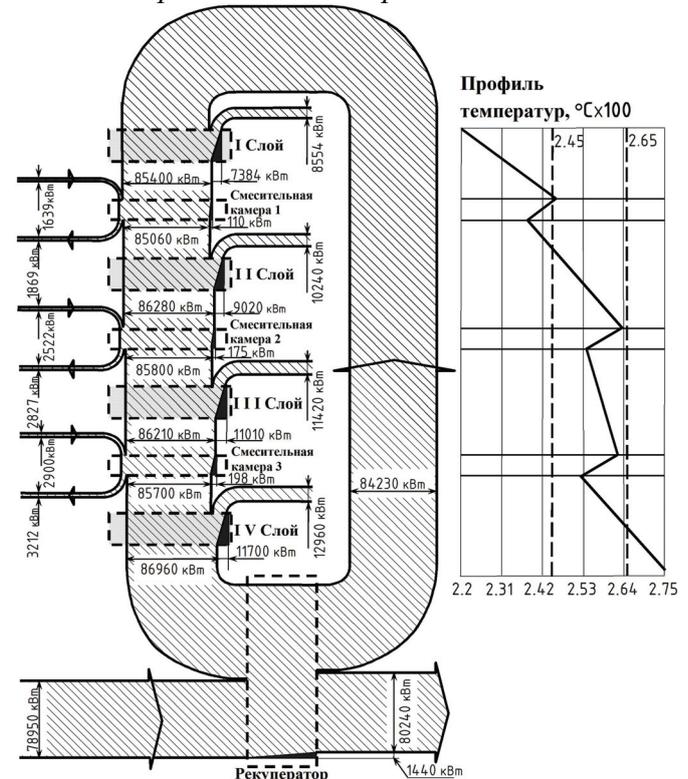


Рис. 5. Эксергетическая диаграмма схемы с МУТ

динамику. Для исследования процесса охлаждения газа в смешительном объеме между слоями с катализатором одновременно с помощью ХБ и МУТ разработана соответствующая комбинированная тепловая модель (2), описывающая гидро-

намику потоков и особенности теплопередачи. Она позволила учесть перераспределения потоков перед входом в рекуператор, их влияние на нагрузку реактора и на режим работы слоев катализатора. В качестве допущения объем между слоями условно разделяется на два участка, на первом из которых газ основного хода смешивается с газом через ХБ, после чего на втором участке осуществляется съем тепла в МУТ.

$$\left\{ \begin{array}{l} S_j \rho_j c_{p_j} \frac{\partial T_j}{\partial t} = -G_j c_{p_j} \frac{\partial T_j}{\partial x} + S_j \sum_{q=0}^m (\pm r_q \cdot (\pm \Delta H_q)); \\ V_{см_i} \rho_{j+1} c_{p_{j+1}} \frac{dT'_{j+1}}{dt} = G_{ХБ_i} c_{p_{ХБ_i}} T_{ХБ_i} + G_j c_{p_j}^{(B)} T_j^{(B)} - (G_{ХБ_i} + G_j) c_{p_{j+1}} T'_{j+1}; \\ n F_{сеч}^{тр} \rho_{МУТ_i} c_{p_{МУТ_i}} \frac{\partial T_{МУТ_i}}{\partial t} = -G_{МУТ_i} c_{p_{МУТ_i}} \frac{\partial T_{МУТ_i}}{\partial l} + \frac{K_T F_T}{L} (T_{j+1} - T_{МУТ_i}); \\ V_{T_i} \rho_{j+1} c_{p_{j+1}} \frac{dT_{j+1}}{dt} = (G_{ХБ_i} + G_j) c_{p_{j+1}} T'_{j+1} - (G_{ХБ_i} + G_j) c_{p_{j+1}} T_{j+1} - \\ - \frac{K_T F_T}{L} \int_0^L (T_{j+1}(t) - T_{МУТ_i}(l, t)) dl; \\ i = \overline{1,3}; \quad j = \overline{1,4}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где S_j – площадь поперечного сечения слоя, m^2 ; X – высота слоя, m ; $V_{см_i}$, V_{T_i} – объем зоны теплообмена путем смешения потоков и путем теплопередачи, m^3 ; n – число змеевиков; $F_{сеч}^{тр}$ – площадь поперечного сечения одного змеевика, m^2 ; F_T , L – площадь поверхности теплообмена путем теплопередачи (m^2) и ее длина (m); K_T – коэффициент теплопередачи, $kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$; r_q , ΔH_q – скорость q -ой химической реакции ($моль/(m^3 \cdot c)$) и изменение энтальпии q -ой реакции на слое ($кДж/моль$); m – число реакций; ρ_j , ρ_{j+1} , $\rho_{МУТ_i}$ – плотность газа основного хода в слое, на выходе зоны смешения и плотность хладагента в МУТ, $кг/м^3$; c_{p_j} , $c_{p_{ХБ_i}}$, $c_{p_{j+1}}$, $c_{p_{МУТ_i}}$ – изобарная теплоемкость газа основного хода в слое ($c_{p_j}^{(B)} = c_{p_j} \Big|_{x=X}$), газа через ХБ, объединенного потока газа на выходе зоны смешения и хладагента в МУТ, $кДж/(кг \cdot ^\circ C)$; G_j , $G_{ХБ_i}$, $G_{МУТ_i}$ – расход газа основного хода через слой, газа через ХБ и расход хладагента через МУТ, $кг/с$; T_j , $T_{ХБ_i}$, T'_{j+1} , $T_{МУТ_i}$, T_{j+1} – температура газа по длине слоя катализатора ($T_j^{(B)} = T_j \Big|_{x=X}$), газа через ХБ, результирующего потока газа на выходе зоны смешения, хладагента в произвольном сечении МУТ, конечная температура газа на выходе зоны теплопередачи, $^\circ C$ ($T_{j+1} \Big|_{l=0} = T'_{j+1}$); i – порядковый номер ХБ и МУТ; j – номер слоя катализатора.

В связи с тем, что в агрегате М-100 используется схема охлаждения только с ХБ, о точности полученной модели можно судить лишь по сравнению результатов моделирующего расчета с имеющимися промышленными данными, основное требова-

ние – обеспечение температурного режима в заданном диапазоне. Погрешность модели составила ~ 10 %, что в целом говорит об ее адекватности.

На основании модели (2) были выделены каналы управления температурой газа на выходе каждого слоя, общие каналы возмущения по температуре и расходу газа основного хода, получены соответствующие передаточные функции. По результатам имитационного моделирования выделены динамически эффективные каналы управления с регулирующими воздействиями в виде изменения расхода газа через ХБ, использование которых позволит обеспечить необходимое качество регулирования в динамических режимах работы реактора. В сравнении с действующим на производстве способом охлаждения с помощью ХБ, отношение общих потерь эксергии к нагрузке колонны в случае комбинирования охлаждающих воздействий (рис. 6) уменьшится на 12,26 кДж/кг. Увеличивающаяся (за счет снижения расхода газа через ХБ в статических режимах) циркуляция ~ на 23,3 % позволит повысить производительность реактора и выход метанола. Концентрация метанола, покидающего колонну, возрастает на 18,3 %.

Для сравнения термодинамической эффективности выделенных каналов управления температурой газа с помощью программы ExergySensCTS рассчитана эксергетическая чувствительность режимов работы реактора с комбинированной схемой охлаждения к изменению управлений. В результате обоснован выбор энергоэффективных каналов охлаждения газа в статике с регулирующими воздействиями в виде изменения расхода воды через МУТ, обладающих меньшей эксергетической чувствительностью. Полученные выводы подтвердили целесообразность разработки ЭСАР температуры по высоте реактора с двумя управляющими воздействиями на каждую полку с катализатором.

В четвертой главе на основании общей структуры ЭСАР предлагается один из ее возможных вариантов – ЭСАР с фильтрами типа «скользящее среднее» (рис. 7). При этом наиболее предпочтительным является программный способ реализации ЭСАР с соответствующими алгоритмами фильтрации, что дает возможность построения такой системы на базе серийных ПЛК с последующим использованием в современных АСУ ТП.

В динамически эффективном канале управления, уступающем в то же время по энергетическим показателям в статических режимах, используется фильтр высоких частот. В бо-

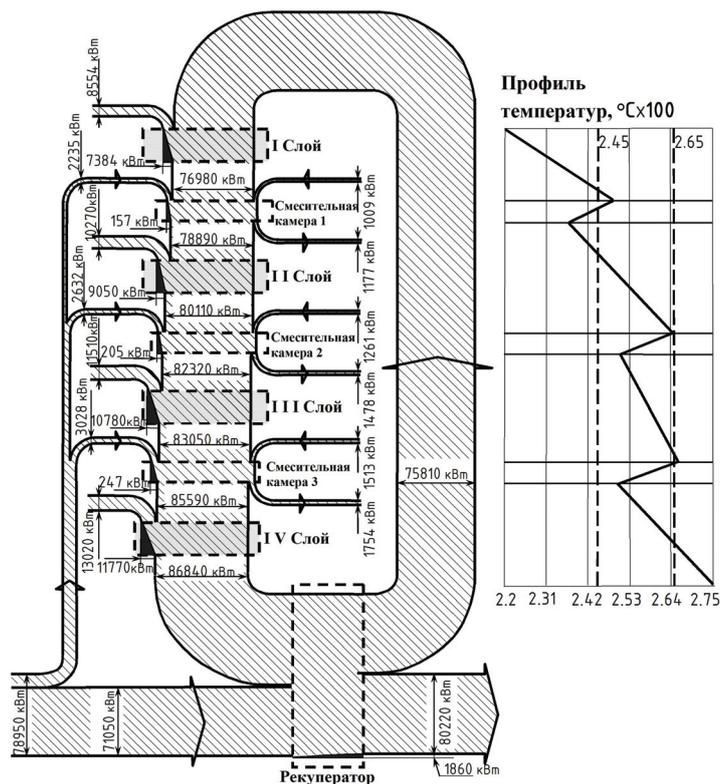


Рис. 6. Эксергетическая диаграмма комбинированной схемы охлаждения

лее инерционном канале, обладающем худшими динамическими свойствами, но выгодном с позиции энергосберегающего управления в статике, используется фильтр низких частот.

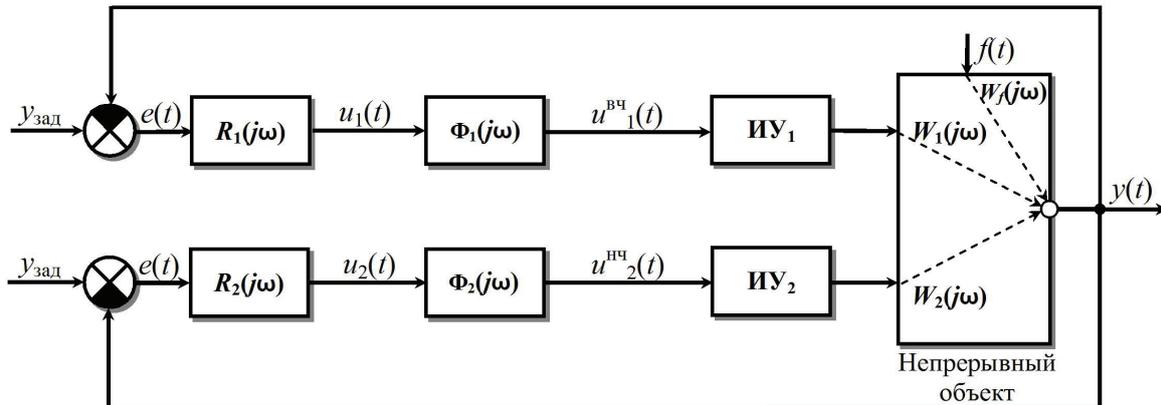


Рис. 7. Структура ЭСАР с реальными фильтрами: $R_1(j\omega)$, $R_2(j\omega)$ – частотные передаточные функции регуляторов в динамически- и энергоэффективном канале управления; $\Phi_1(j\omega)$, $\Phi_2(j\omega)$ – частотные передаточные функции фильтра высоких и низких частот; ИУ₁, ИУ₂ – исполнительные устройства; $y_{зад}$, $y(t)$ – заданное и текущее значение регулируемой переменной; $e(t)$ – ошибка регулирования; $f(t)$ – возмущение; $u_1(t)$, $u_2(t)$ – управляющие воздействия; $u_{ВЧ1}(t)$, $u_{НЧ2}(t)$ – управляющие воздействия в области высоких и низких частот; $W_1(j\omega)$, $W_2(j\omega)$, $W_f(j\omega)$ – частотные передаточные функции объекта по динамически- и энергоэффективному каналу управления и по каналу возмущения

В качестве аппроксимирующих частотных передаточных функций рассматриваемых фильтров были выбраны следующие:

$$\Phi_1(j\omega) = 1 - (1 - \exp(-j\omega T_{01})) / (T_{01} \cdot j\omega), \quad (3)$$

$$\Phi_2(j\omega) = (1 - \exp(-j\omega T_{02})) / (T_{02} \cdot j\omega). \quad (4)$$

Реализовать (3-4) можно как на цифровых, так и на непрерывных блоках. В случае цифровой реализации фильтр Φ_2 представляет собой дискретное звено, состоящее из экстраполятора нулевого порядка в сочетании с тактовым квантователем, близким к идеальному (с тактом T_{02}). При непрерывной реализации Φ_2 – это параллельное соединение двух интеграторов (умноженных на коэффициенты $1/T_{02}$), один из которых последовательно соединен со звеном запаздывания на величину T_{02} . Реализация фильтра Φ_1 в обоих случаях представляет собой разность между сигналом на его входе и результатом преобразования через аналогично реализованный фильтр низких частот, но уже с параметром T_{01} .

В качестве общего динамического показателя оптимальности синтезируемой ЭСАР предлагается использовать квадратичный интегральный критерий при действии детерминированных возмущений наиболее тяжелого характера (ступенчатых по нагрузке объекта). Для ЭСАР он будет иметь следующий вид:

$$I = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_1(j\omega)\Phi_1(j\omega)W_1(j\omega) + R_2(j\omega)\Phi_2(j\omega)W_2(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega. \quad (5)$$

Методика расчета ЭСАР получена в предположении, что фильтры Φ_1 и Φ_2 стремятся к идеальному [4]. Тогда критерий (5) определяется двумя независимыми составляющими, которые характеризуют реакцию каждого канала управления на действующее возмущение:

$$I = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_2(j\omega)W_2(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega + \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \left| \frac{W_f(j\omega)}{1 + R_1(j\omega)W_1(j\omega)} \right|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} d\omega, \quad (6)$$

где ω_0 – некоторая пороговая частота, разделяющая свойства каналов управления и определяющая полосу пропускания фильтров.

Такое разделение упрощает процедуру синтеза ЭСАР, позволяя сначала определить оптимальные настройки регуляторов (по методике расчета для одноконтурных САР), после чего рассчитать фильтры. Из выражения (6) видно, что при известных свойствах одноконтурных систем значение критерия (5) для ЭСАР можно улучшить правильным выбором частоты ω_0 . Расхождение выражения (6) и квадратичного критерия отдельно для одноконтурных динамически- (I') и энергоэффективной (I'') систем составит соответственно:

$$\Delta_1 = I' - I = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left[(A_1(j\omega))^2 - (A_2(j\omega))^2 \right] \cdot \frac{|W_f(j\omega)|^2}{\omega^2} d\omega, \quad (7)$$

$$\Delta_2 = I'' - I = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} \left[(A_2(j\omega))^2 - (A_1(j\omega))^2 \right] \cdot \frac{|W_f(j\omega)|^2}{\omega^2} d\omega, \quad (8)$$

где $A_1(j\omega)$, $A_2(j\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика замкнутой одноконтурной САР по динамически- и энергоэффективному каналу задающего воздействия.

Разности (7-8) показывают, насколько ЭСАР эффективнее в качественном отношении по сравнению с одноконтурными системами. После решения оптимизационной задачи, заключающейся в максимизации (7-8), было установлено, что соответствующее значение частоты ω_0 находится в одной из точек пересечения функций $A_1(j\omega)$ и $A_2(j\omega)$. При этом точек, претендующих на точки экстремума, может оказаться несколько и выбирать необходимо ту, при которой показатели Δ_1 и Δ_2 максимальны, она и будет задавать пороговую частоту перехода ω_0 , используемую в дальнейшем для определения параметров реальных фильтров в структуре ЭСАР.

В результате проведенных математических преобразований были получены следующие формулы для расчета параметров фильтров (3-4):

$$T_{01} = \sqrt{12}/\omega_0, \quad (9)$$

$$T_{02} = \sqrt{12 \cdot \Delta \cdot (2 - \Delta)}/\omega_0, \quad (10)$$

где Δ – заданная погрешность фильтрации (выбирается близкой к нулю).

Более подробно методика расчета ЭСАР и вывод расчетных формул (9-10) описаны в тексте диссертации. На рис. 8 представлен алгоритм в общем виде. Предложенная методика была автоматизирована и реализована в виде компьютерной программы для расчета и моделирования ЭСАР с фильтрацией методом скользящего среднего [8]. Разработка велась в среде визуально-ориентированного блочного имитационного моделирования VisSim (фирмы Visual Solutions).

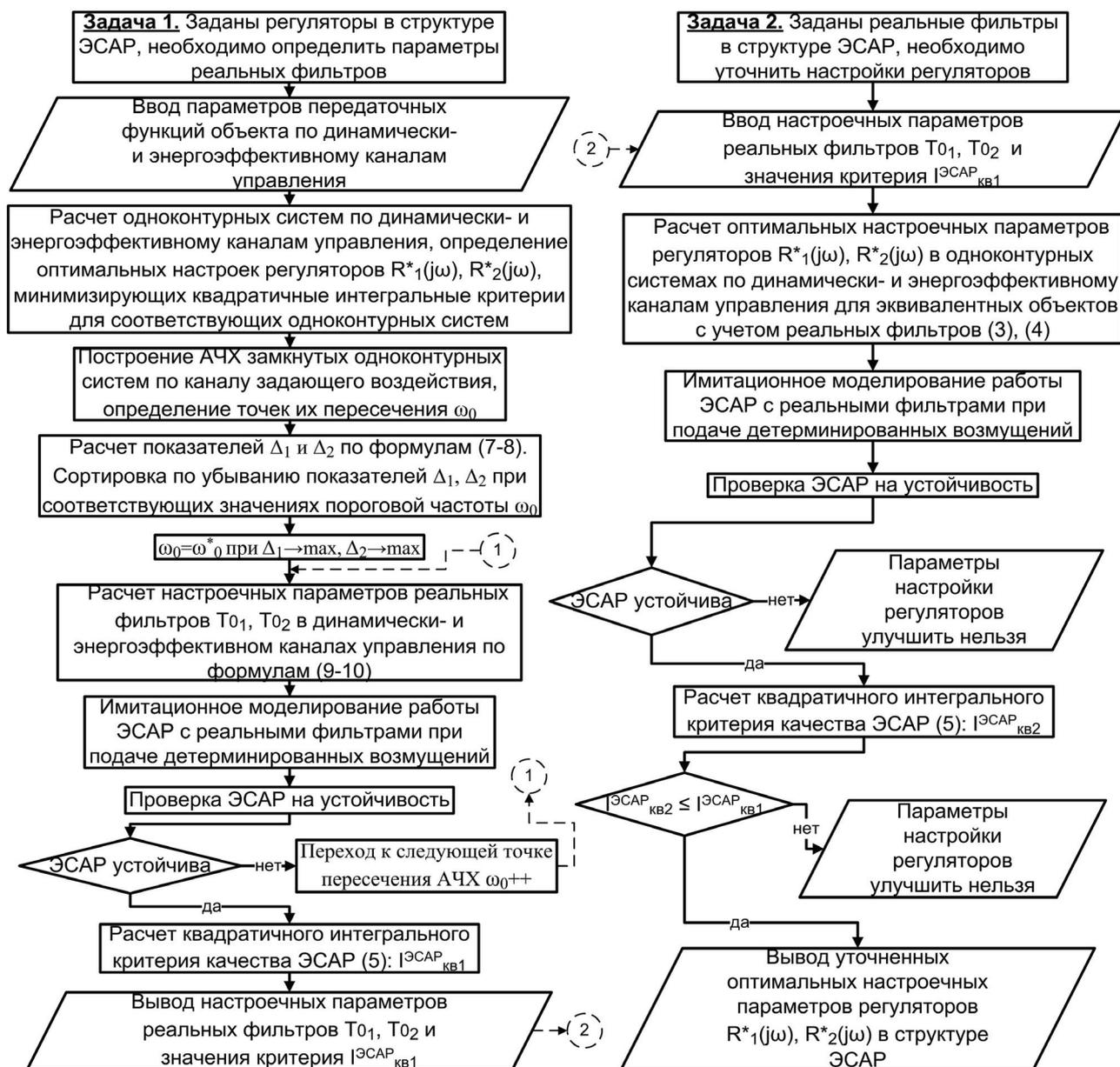


Рис. 8. Алгоритм расчета ЭСАР с фильтрами скользящего среднего в общем виде

С использованием разработанного варианта ЭСАР для увеличения производительности реактора синтеза метанола и повышения степени его энергосбережения предлагается следующий способ регулирования теплового режима (рис. 9). Его отличительной особенностью является то, что процесс регулирования температуры на выходе каждого слоя катализатора, начиная со второго, осуществляется по двухконтурной схеме путем одновременного использования обоих управляющих воздействий, в качестве которых выступают изменение расхода газа через ХБ на вход в слой катализатора и изменение расхода хладагента через МУТ. Каждый из контуров регулирования при этом настроен, в зависимости от его динамических и энергетических свойств, на эффективную работу в определенном частотном диапазоне. Для решения этой технической задачи в ЭСАР температуры газа на выходе слоя в каналах управления с ХБ дополнительно предлагается использовать фильтры высоких частот, а в каналах с МУТ соответственно фильтры низких частот.

На рис. 10 изображены переходные процессы в синтезированной ЭСАР и наилучших одноконтурных САР, построенных на модели объекта (на примере 2-го слоя). Моделирование выполнено при возмущении по нагрузке. По качеству регулирования ЭСАР температуры, безусловно, выигрывает у одноконтурной САР с МУТ и в то же время не уступает одноконтурной динамически эффективной САР с ХБ. Работа контура регулирования с ХБ позволяет своевременно подавить пришедшее возмущение, после чего в статике использование ХБ сводится к минимуму, и нагрузка по управлению полностью переходит на энергоэффективный контур с МУТ.

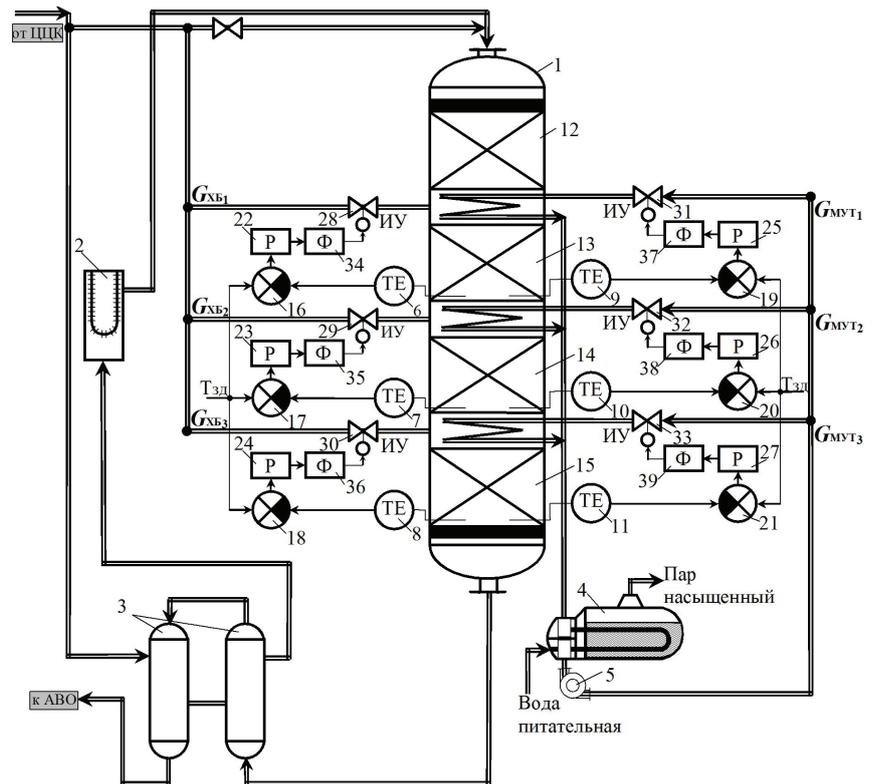


Рис. 9. Предлагаемый способ управления тепловым режимом реактора: 1 – реактор; 2 – электроподогреватель; 3 – рекуператор; 4 – котел-утилизатор; 5 – насос; 6-11 – датчики температуры; 12-15 – слои катализатора; 16-21 – сумматоры; 22-27 – регуляторы; 28-33 – регулирующие клапаны; 34-36 – фильтры высоких частот; 37-39 – фильтры низких частот

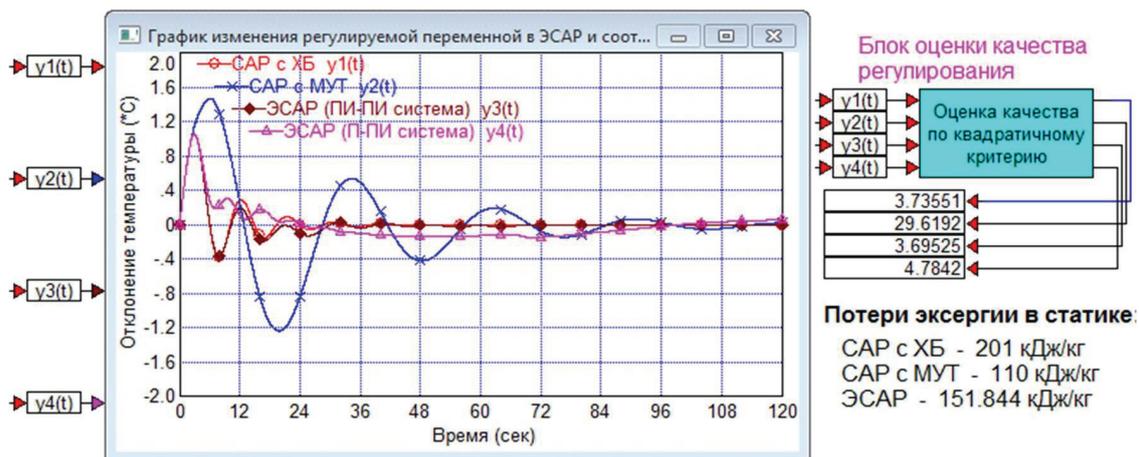


Рис. 10. Результаты моделирования переходных процессов

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проанализировано современное состояние проблемы энергосбережения в химической технологии, и сделан вывод о необходимости создания ЭСАР.
2. Предложены общая структура ЭСАР и, на ее основании, один из вариантов реализации – ЭСАР с фильтрами скользящего среднего. Разработаны соответствующая методика и алгоритм автоматизированного расчета ЭСАР.

3. Обосновано применение эксергетического метода анализа при построении систем управления. Дана методика расчета эксергии, и на ее основе разработан программный комплекс для эксергетического анализа ХТС с целью синтеза ЭСАР.
4. Исследована возможность построения ЭСАР применительно к производству метанола. На примере агрегата М-100 получено математическое описание статических и динамических режимов работы основных технологических операторов. Разработана математическая модель комбинированной схемы охлаждения реактора с ХБ и МУТ.
5. Проведенный эксергетический и динамический анализ позволил выделить наличие двух конкурирующих управлений: первое из них (изменение расхода газа через ХБ) является динамически эффективным, а второе (изменение расхода воды через МУТ) выгодным с позиции энергосбережения в статике. Сделан вывод о целесообразности построения ЭСАР температуры реактора с двумя управляющими воздействиями на полку с катализатором.
6. Предложены способ регулирования температуры по высоте реактора и ЭСАР для его осуществления. В разработанной VisSim-программе рассчитаны ЭСАР температуры на выходе слоев катализатора, путем имитационного моделирования исследованы переходные процессы и различные режимы их работы. Проведен сравнительный анализ качества регулирования в ЭСАР и в одноконтурных САР с ХБ и МУТ.
7. Ожидаемый технико-экономический эффект от внедрения ЭСАР в агрегате М-100: уменьшение удельных потерь эксергии \sim на $12,26$ кДж/кг, высвобождение которой позволяет более рационально использовать потенциал тепла реакции (съем тепла в МУТ дает возможность дополнительно утилизировать $\sim 1,8 \cdot 10^7$ кДж/час, обеспечив выработку технологического пара); увеличение циркуляции (за счет снижения расхода газа через ХБ в статических режимах), сопровождающееся повышением производительности реактора, выход метанола при этом возрастает \sim на $18,3$ %; увеличение производительности реактора за счет повышения точности поддержания температуры в оптимальном диапазоне в условиях действия возмущений.

Список основных опубликованных по теме диссертации научных работ:

а) в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. *Соболев А.В., Ляшенко А.И., Соболева Ю.В., Вент Д.П. Энергосберегающее управление технологическими процессами // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 3. С. 326-334.*
2. *Соболев А.В., Ляшенко А.И., Соболева Ю.В., Вент Д.П. Методика определения эксергетической чувствительности стационарных режимов работы колонны синтеза метанола // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 2. С. 277-283.*
3. *Соболев А.В., Ляшенко А.И., Соболева Ю.В., Вент Д.П. К вопросу о синтезе энергосберегающей системы автоматического регулирования // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 5. С. 67-76.*
4. *Соболев А.В., Ляшенко А.И., Соболева Ю.В., Вент Д.П. К вопросу о расчете энергосберегающей системы регулирования с цифровыми фильтрами // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 11. С. 198-208.*
5. *Соболев А.В., Ляшенко А.И., Соболева Ю.В., Вент Д.П. О возможности применения неперывных фильтров в структуре ЭСАР // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 2. С. 99-107.*

б) патенты, авторские свидетельства

6. Энергосберегающая система автоматического регулирования: пат. 2494433 Рос. Федерация: МПК⁸ G05 В 13/00 / А.В. Соболев, А.И. Ляшенко, Д.П. Вент, Ю.В. Соболева. № 2011142642/08; заявл. 24.10.2011; опубли. 27.09.2013, Бюл. № 27. 10 с.

7. Программа для ЭВМ «Автоматизированная система расчета эксергетической чувствительности химико-технологической системы ExergySensCTS»: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 18811 от 19.12.2012 / Д.П. Вент, А.В. Соболев, А.И. Ляшенко. Инв. номер ВНИИЦ № 50201251460 от 25.12.2012.

8. Программа для расчета и моделирования энергосберегающей системы автоматического регулирования с фильтрацией методом скользящего среднего: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 20116 от 15.05.2014 / А.И. Ляшенко, А.В. Соболев, Д.П. Вент. Инв. номер ВНИИЦ № 50201450330 от 23.05.2014.

в) наиболее значимые работы в прочих изданиях

9. Вент Д.П., Ляшенко А.И., Соболев А.В. Управление процессом теплообмена на основе эксергетического анализа // Вестник МАСИ. 2011. Т. 13. Ч. I. С. 93-99.

10. Соболев А.В., Ляшенко А.И., Вент Д.П. Анализ качества работы энергосберегающей САР // Вестник МАСИ. 2011. Т. 13. Ч. I. С. 106-113.

11. Ляшенко А.И., Соболев А.В. Исследование статического режима работы колонны синтеза метанола // XIV научно-техн. конференция молодых ученых, аспирантов и студентов: тез. докл. (НИ (ф) РХТУ им. Д.И. Менделеева). Новомосковск, 2012. Ч. 2. С. 92.

12. Ляшенко А.И., Соболев А.В., Соболева Ю.В., Седых А. Исследование особенностей комбинированного управления температурным режимом колонны синтеза метанола // Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: КАМИ. 2013. Вып. № 7(28). С. 87-93.

13. Ляшенко А.И., Соболев А.В., Соболева Ю.В., Седых А. Анализ динамического режима работы колонны синтеза метанола // Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: КАМИ. 2013. Вып. №7(28). С. 93-96.

14. Ляшенко А.И., Соболев А.В. Анализ динамических характеристик колонны синтеза метанола при комбинированном управлении температурным режимом // Вестник МАСИ. 2013. Т. 15. Ч. I. С. 23-32.

15. Ляшенко А.И., Соболева Ю.В., Соболев А.В. Энергосберегающая система регулирования температурным режимом колонны синтеза метанола // XV научно-техн. конференции молодых ученых, аспирантов и студентов: тез. докл. (НИ (ф) РХТУ им. Д.И. Менделеева). Новомосковск, 2013. Ч. 2. С. 141-142.

16. Ляшенко А.И., Соболева Ю.В., Соболев А.В. Варианты энергосберегающих САР технологическими процессами // XV научно-техн. конференции молодых ученых, аспирантов и студентов: тез. докл. (НИ (ф) РХТУ им. Д.И. Менделеева). Новомосковск, 2013. Ч. 2. С. 145.

17. Ляшенко А.И., Соболев А.В. Исследование динамических характеристик энергосберегающих САР с цифровыми фильтрами // XXIX научная конференция профессорско-преподавательского состава и сотрудников НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева: тез. докл. (НИ (ф) РХТУ им. Д.И. Менделеева). Новомосковск, 2013. Ч. 2. С. 124-125.

18. Вент Д.П., Ляшенко А.И., Соболев А.В. Сравнительный анализ качества работы энергосберегающей САР с различными способами фильтрации // Вестник МАСИ. 2014. Т. 16. Ч. I. С. 47-54.

19. Соболев А.В., Ляшенко А.И., Соболева Ю.В. Расчет фильтров в цифровой энергосберегающей системе регулирования // Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: КАМИ. 2014. Вып. № 8(29). С. 12-20.

20. Соболев А.В., Ляшенко А.И., Соболева Ю.В. Моделирование переходных процессов в энергосберегающей системе регулирования // Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: КАМИ. 2014. Вып. № 8(29). С. 20-24.