

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГБОУ  
ВПО «Ивановский государственный  
химико-технологический университет»  
д.х.н., профессор С.А. Сырбу

« 20 » февраля 2015 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации Ивановского государственного химико-технологического университета на диссертационную работу Ляшенко Александра Ивановича **«Синтез и анализ энергосберегающих систем автоматического регулирования при действии детерминированных возмущений (на примере отделения синтеза в производстве метанола)»**, представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям: 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая технология; нефтехимия и нефтепереработка; биотехнология)» и 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий».

#### **Актуальность диссертационного исследования.**

Химико-технологические производства характеризуются высоким уровнем энерго- и ресурсозатрат на получение целевой продукции заданного качества и количества. Основными системными показателями эффективности функционирования ХТС и соответствующей системы управления являются оперативность, результативность, энерго- и ресурсоемкость. Системы автоматического регулирования основных технологических параметров способны обеспечивать экстремальные значения указанных показателей, если сами, в свою очередь, обладают достаточным быстродействием, высокой точностью поддержания регулируемых переменных на заданном уровне в статике, а их топология (место приложения регулирующих воздействий) ориентирована на снижение энергозатрат.

Это дает основание утверждать, что тема диссертации актуальна, так как ориентирована на разработку энергосберегающих систем автоматического регулирования (ЭСАР), которые позволяют добиться высоких качественных показателей в динамических режимах (оперативность) и одновременно повысить энергоэффективность технологических процессов и установок в статических режимах работы (результативность). Следует признать удачным и выбор технологического объекта управления, т.к. производство метанола является промышленно важным производственным процессом.

## **Анализ структуры и содержания диссертации.**

Представленная диссертация Ляшенко А.И. изложена на 274 страницах печатного текста, содержит 17 таблиц и 93 рисунка, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 164 наименований и приложений.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и основные задачи работы, изложена научная новизна, практическая значимость, приведены данные об апробации полученных результатов.

В Главе 1 (литературном обзоре), изложенной на стр. 11-47, проведен подробный аналитический обзор современных способов энергосбережения и повышения энергетической эффективности в химической и связанных с ней отраслях промышленности нашей страны. В результате анализа литературных данных отмечена возможность повышения энергетической эффективности химических производств путем создания энергосберегающих систем управления со специальной структурой.

Глава 2 (стр. 48-87) диссертации посвящена описанию общего принципа построения ЭСАР, ее структуры и отличительных признаков от известных систем регулирования. В результате формулируется общая задача синтеза ЭСАР с избыточностью в управлении, заключающаяся в определении передаточных функций и настроечных параметров регуляторов, а также характеристических частот фильтров, при которых достигаются заданные показатели качества регулирования, и обеспечивается минимум критерия энергосбережения. Ставится ряд подзадач, которые необходимо решить при этом. По существу формируется методология синтеза ЭСАР.

Показано, что синтез ЭСАР предусматривает определение эксергетической чувствительности ХТС к изменению управляющих воздействий. Приводятся алгоритм и программа оценки энергоэффективности каналов управления и определения оптимального вектора управления в статике.

В Главе 3 (стр. 88-166) изложены физико-химические аппаратурно-технологические и термо-динамические особенности каталитического процесса синтеза метанола при пониженном давлении 5 МПа на низкотемпературном медьсодержащем катализаторе СММ-У при температуре 220-280 °С. С использованием разработанных моделей процесса исследованы динамические и статические режимы работы, составлены эксергетические балансы и установлены энергосберегающие режимы эксплуатации реактора в агрегате М-100, позволяющие сократить удельные потери эксергии на 12,26 кДж/кг и, как следствие, повысить термодинамическое совершенство процесса преобразования энергии.

Представленная технологическая схема комбинированного охлаждения газа по высоте реактора и анализ полученной для ее описания тепловой модели, формируют предпосылки для эффективного управления и автоматизации, за счет чего можно увеличить концентрацию метанола на выходе реактора на ~ 18,3 % - отн.

В Главе 4 (стр. 167-225) на основании общей структуры ЭСАР предлагается ее двухконтурный вариант. При этом автор использует фильтры типа «скользящее среднее», описан детальный механизм реализации выбранных фильтров. Разработана процедура параметрического синтеза ЭСАР, представлен вывод расчетных формул для фильтров скользящего среднего в структуре ЭСАР. В качестве общего критерия качества синтезируемой ЭСАР используется минимизация квадратичной интегральной оценки. Что касается регуляторов ЭСАР, то автор рассматривает систему с П- и ПИ-регулятором и систему, когда каждый регулятор обрабатывают ПИ-закон управления. Для проверки работоспособности ЭСАР и изучения ее свойств на примере типовых объектов, которые можно описать совокупностью апериодических звеньев с запаздыванием, создана программа в среде VisSim, на которую получено свидетельство ОФЭРНиО. В программе предусмотрена возможность автоматического расчета параметров ЭСАР и симуляция ее свойств в интерактивном режиме реального времени.

Во второй части главы (раздел 4.2) описано применение разработанного варианта ЭСАР и программы ее расчета и моделирования для управления температурным режимом реактора синтеза метанола полочного типа (на примере агрегата М-100) с целью увеличения его производительности и степени энергоэффективности. Регулирование температуры газа на выходе каждого слоя катализатора (начиная со второго) рекомендуется осуществлять по двухконтурной схеме, причем в контурах регулирования с холодными байпасами используются фильтры высоких частот, а в контурах с межполочными теплообменниками фильтры низких частот. Предложенная Ляшенко А.И. в Главе 3 комбинированная тепловая динамическая модель реактора, учитывающая одновременное влияние степени открытия байпасных потоков холодного газа и варьирования расхода хладагента через змеевики системы охлаждения на температуру газа в слоях катализатора, используется затем при имитационном моделировании на ЭВМ работы предлагаемых энергосберегающих САР и при их сравнении с работой известных традиционных одноконтурных систем. Кривые переходных процессов управления по температуре автор строит при действии детерминированных возмущений по основным параметрам процесса. Анализируется зависимость качества регулирования в ЭСАР от выбора алгоритмов управления, частоты среза фильтров и от способа их реализации (цифровой или непрерывной). При этом показано преимущество синтезированных ЭСАР температуры на слое катализатора в сравнении с одноконтурными динамически эффективными САР с холодными байпасами и энергоэффективными САР с межполочными утилизационными теплообменниками.

В заключении диссертации автором сформулированы выводы, в которых в полной мере отражена научная новизна, основная теоретическая и прикладная ценность проделанной работы.

Список литературы представлен 164 источниками, при этом присутствуют работы как отечественных, так и зарубежных авторов, что

свидетельствует о достаточной проработке материала в выбранной предметной области.

Приложения включают описание разработанного программного комплекса для эксергетического исследования ХТС с целью синтеза ЭСАР, копии полученного патента и авторских свидетельств на зарегистрированные программы.

### **Научная новизна.**

Научная новизна диссертации заключается в разработке методологии синтеза многоконтурных энергосберегающих САР, использующих избыточность в управляющих воздействиях. Отличительной особенностью систем данного типа является достаточно высокое быстродействие и точность стабилизации регулируемой переменной и одновременное обеспечение энергосберегающего характера управления технологическими процессами. Оценку эффективности работы ЭСАР предлагается проводить с использованием эксергетического метода термодинамического анализа. В рамках предложенной методологии ЭСАР автором было сделано следующее:

- разработаны алгоритмы расчета ЭСАР с фильтрами скользящего среднего;
- разработан универсальный алгоритм определения эксергетической чувствительности ХТС, позволяющий выделить в ее составе энергоэффективный канал управления;
- разработаны компьютерная модель ЭСАР, позволяющая исследовать ее динамические свойства, и алгоритм автоматизированного расчета параметров системы.

Возможность прикладного применения ЭСАР была проанализирована применительно к химико-технологическому процессу синтеза метанола, в рамках чего:

- 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);
- рассчитана эксергетическая чувствительность статических режимов работы колонны синтеза метанола, исследован характер ее изменения в зависимости от изменения режимных параметров процесса. Это позволило обосновать выбор энергоэффективных каналов охлаждения газа по высоте реактора с регулирующими воздействиями в виде изменения расхода хладагента через МУТ;
- предложен способ регулирования температуры по высоте реактора синтеза метанола, и синтезирована ЭСАР для его осуществления.

### **Значимость полученных результатов для теории и практики.**

С точки зрения теории разработанные автором многоконтурная структура системы управления, алгоритмы, методики, модели, способы реализации фильтров в структуре ЭСАР и соотношения для их расчета в условиях детерминированных воздействий являются теоретической основой для дальнейших исследований в области построения энергосберегающих систем регулирования технологическими процессами и вносят определенный вклад в развитие прикладной теории автоматического управления.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Упрощенная процедура расчета ЭСАР дает возможность настраивать их непосредственно на действующем производстве.

2. На основании предложенного алгоритма определения энергоэффективного канала управления разработана автоматизированная система расчета, которая может быть использована для анализа сложных энергоресурсоемких ХТС.

3. 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.

4. С использованием реализованных алгоритмов и программ даны конкретные рекомендации по усовершенствованию агрегата производства метанола М-100 путем интеграции ЭСАР температуры по высоте реактора, что позволяет повысить технико-экономические показатели ХТП.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов.**

Результаты проведенных исследований имеют наибольшие перспективы практического применения на предприятиях химической промышленности при создании высокоэффективных автоматизированных производств, отличающихся высоким уровнем энергопотребления. В частности, результаты научно-технических разработок по созданию энергосберегающей системы регулирования температурного режима в реакторе синтеза метанола агрегата М-100 переданы в ОАО НАК «Азот», что подтверждено соответствующим актом.

Полученный теоретический материал может быть использован в учебном процессе в высших учебных заведениях при обучении студентов различным аспектам разработки и использования сложных систем управления в химической технологии.

Также результаты диссертации могут быть интересны в научно-исследовательских работах, например, таких организаций как ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»; ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)»; ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»; ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»;

ОАО «Научно исследовательский и проектный институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза».

### **Степень достоверности и обоснованности результатов.**

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации Ляшенко А.И., базируется на применении современных методов исследования, в том числе прогрессивного эксергетического метода термодинамического анализа, корректным использованием методов математического моделирования и оптимизации, системного анализа и принципов объектно-ориентированного программирования.

Основные результаты диссертационного исследования не противоречат известным зависимостям, содержащимся в работах отечественных и зарубежных ученых в области теории автоматического управления технологическими процессами и производствами. Сопоставление результатов численных экспериментов показывает их хорошую согласованность с теоретическими положениями.

Работа прошла апробацию на отечественных конференциях. По основным результатам исследования опубликовано 20 печатных работ, из них 5 публикаций в рецензируемом журнале. Также получен 1 патент РФ на изобретение, 2 авторских свидетельства о регистрации электронных ресурсов. Научные публикации и представленные в них выводы соответствуют основной цели и предмету исследований.

### **Замечания по работе.**

1. В диссертации отсутствует количественная оценка степени адекватности математических моделей элементов колонны синтеза метанола (смесительная камера, МУТ, слой катализатора) экспериментальным данным. Отмечается только (стр. 116), что «задача идентификации решалась с использованием экспериментальных данных...», а в автореферате (стр. 10) отмечено, что «погрешность модели составила ~ 10%...» без доказательств.

2. При аналитическом выводе передаточных функций для слоя катализатора (стр. 145 ÷ 149) согласно сигнального графа (рис. 3.30) и модели (3.30) не учитывалась взаимосвязь (взаимовлияние) температуры и скорости реакции -  $r_g(T, \bar{y})$ , т.к. не осуществлялось разложение функций  $r_g(T, \bar{y})$  в ряд Тейлора по степеням  $\Delta T$ . Динамика слоя катализатора представлена только моделью теплового баланса. Отсюда вытекает сомнение в необходимости высокой точности аппроксимации динамики передаточными функциями, включающими полиномы 3<sup>й</sup> степени.

3. При исследовании систем управления стоило бы учесть динамику исполнительных устройств САР, которая может существенно повлиять на эффективность разработанных алгоритмов управления.

4. В чем заключается универсальность разработанного алгоритма определения эксергетической чувствительности ХТС?

5. Не рассмотрены теоретические вопросы по устойчивости ЭСАР при различных внешних воздействиях. Например, следовало бы определить запас устойчивости ЭСАР при варьировании параметров системы, выделить допустимый диапазон изменения настроек фильтров.

6. Каким образом влияет предложенное техническое решение по созданию энергосберегающей САР температуры реактора синтеза метанола на экономические показатели производства (себестоимость, расход синтез-газа, воды, пара)?

### **Общая характеристика работы и соответствие паспорту специальности.**

В целом, указанные выше замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования, выполненного автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне.

Диссертационная работа хорошо структурирована и достаточно проиллюстрирована, оформление соответствует требованиям ВАК при Минобрнауки РФ. Автореферат в основном отражает содержание диссертации, актуальность темы, новизну, практическую значимость и личный вклад автора в проведенное исследование.

Тематика исследования, формулировка его целей и задач, предмет, научная новизна, области приложения полученных результатов, используемые методы анализа и общая направленность работы подтверждают ее соответствие паспортам двух специальностей (по которым работа и представлена к защите):

- 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая технология; нефтехимия и нефтепереработка; биотехнология)» как по формуле, так и по области исследования (пункты 3, 6, 10, 17);

- 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий», по разделам области исследования: «Способы, приемы и методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещения сыпучих материалов, исследование тепловых процессов в технологических аппаратах и технологических схемах, исследования массообменных процессов и аппаратов» и «Принципы и методы синтеза ресурсосберегающих химико-технологических систем с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов и конструкционных материалов».

### **Заключение.**

На основании изложенного, ведущая организация считает, что диссертация на тему «Синтез и анализ энергосберегающих систем автоматического регулирования при действии детерминированных возмущений (на примере отделения синтеза в производстве метанола)» является

законченной научно-квалификационной работой, которая соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 года, №842), а ее автор Ляшенко Александр Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.13.06 - «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая технология; нефтехимия и нефтепереработка; биотехнология)» и 05.17.08 - «Процессы и аппараты химических технологий».

Диссертационная работа обсуждена, отзыв заслушан и одобрен на совместном заседании кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» и кафедры «Машины и аппараты химических производств» ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет».

Протокол № 5 от 19 февраля 2015 года.

Отзыв составили:

Заведующий кафедрой ТКиА,  
д.т.н., профессор

  
\_\_\_\_\_ (Лабутин А.Н.)

Заведующий кафедрой МАХП,  
д.т.н., профессор

  
\_\_\_\_\_ (Блиничев В.Н.)

Адрес: 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7. ИГХТУ.  
Тел.: ректорат +7 (4932) 329241, коммутатор +7 (4932) 307346,  
Факс: +7 (4932) 417995. <http://main.isuct.ru/>. e-mail:  
[rector@isuct.ru](mailto:rector@isuct.ru)