

На правах рукописи

**КУЗИЧКИН АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ РИФОРМИНГА  
С ИДЕНТИФИЦИРУЕМОЙ МОДЕЛЬЮ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Самара - 2018

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация и управление технологическими процессами» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Губанов Николай Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Официальные оппоненты: **Семенов Анатолий Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», профессор кафедры информационно-измерительной техники и метрологии.

**Зеленский Владимир Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет», профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Защита состоится «3» декабря 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.07 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) по адресу: Россия, г. Самара, ул. Галактионовская, 141, корпус № 6, аудитория 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу: <http://d21221707.samgtu.ru/>.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.07, тел.: (846) 278-44-96, факс: (846) 278-44-00; e-mail: [em@samgtu.ru](mailto:em@samgtu.ru).

Учёный секретарь

Диссертационного совета Д 212.217.07

доктор технических наук, профессор

А.М. Абакумов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Бензины считаются одним из основных видов горючего, которое применяется в двигателях внутреннего сгорания. Производство бензина - важнейшая область нефтеперерабатывающей индустрии России, в значительной степени, влияющая на экономическое развитие нашего государства. По данным государственной службы статистики, потребление бензинов в России в 2017 году составило более 80 млн. тонн. Государственной программой предусмотрено повышение глубины переработки нефти и рост качества нефтепродуктов, получаемых на отечественных нефтеперерабатывающих предприятиях.

Каталитический риформинг - важнейший этап получения высокооктанового элемента моторных топлив, а также водорода и индивидуальных ароматических углеводородов (ксилолов, толуола, бензола), используемых в нефтехимии. Производительность установки каталитического риформинга в значительной степени зависит от эффективности управления данным технологическим процессом.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблеме автоматизации процесса каталитического риформинга и разработке систем оптимального управления с использованием математических моделей, посвящено большое число исследований и публикаций, среди которых выделяются работы таких ученых, как Т.Г. Умергалин, J. Crane, J.M. Smith, И.В. Войтенко Ю.М. Жоров, С.А. Ахметов, Г.Б. Рабинович, Г.Н. Семенцов, О.В. Поркуян, В.И. Головкин, В.В. Ткачев, В.А. Зеленский и др.

Существующие системы оптимального управления технологическим процессом каталитического риформинга базируются либо на моделях, описывающих технологический процесс информационно, либо на кинетических моделях, отражающих кинетику химического превращения ароматических, нафтеновых и парафиновых углеводородов. Первый класс моделей практически не может объяснить получаемые результаты за счёт чего теряет актуальность. Второй класс описывает превращения без учёта изменения активности катализатора в реакторах во времени, вследствие чего модель утрачивает адекватность.

Таким образом повышение производительности технологического процесса риформинга за счёт применения автоматизированных систем оптимального управления наталкивается на проблему адекватного функционально-ориентированного математического моделирования технологического процесса с коррекцией математической модели в ходе риформинга. Решение этой проблемы обеспечит увеличение показателей эффективности процесса каталитического риформинга.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности технологического процесса каталитического риформинга путём разработки и применения адаптивной системы оптимального управления технологического процесса с параметрически идентифицируемой проблемно-ориентированной математической моделью.

Для достижения поставленной цели следует решить задачи:

1. Разработать математическую модель технологического процесса каталитического риформинга, проблемно-ориентированную на применение в системах оптимального управления и сохраняющую адекватность процесса за счёт применения нового быстродействующего способа параметрической идентификации обеспечивающих раскрытие исходной неопределённости изменения активности катализатора во времени;

2. Постановка и решение задач оптимального управления;

3. Разработать оптимальный алгоритм управления технологическим процессом риформинга базирующийся на проблемно-ориентированной математической модели;

4. Разработать адаптированное для интеграции в SCADA, управляющими производством, программное и алгоритмическое обеспечение, реализующие систему оптимального управления технологическим процессом риформинга.

#### **Научная новизна полученных результатов:**

1. Разработана проблемно-ориентированная на использование в контуре адаптивной системы оптимального управления параметрически идентифицируемая математическая модель риформинга повышенной точности, содержащая уравнения кинетики химических превращений;

2. Разработан нейро-итерационный метод параметрической идентификации проблемно-ориентированной модели, обеспечивающий сохранение её адекватности в условиях неопределённости в соответствии с параметрами процесса. Метод отличается тем, что в качестве идентифицируемых параметров используются константы равновесий химических реакций, что позволяет повысить точность модели с сохранением физической адекватности;

3. Разработана, поставлена и решена задача оптимального управления технологическим процессом риформинга на основе квазистационарной задачи математического программирования;

4. Реализован программный комплекс на базе Microsoft Visual Studio, SCADA Trace Mode 6 и VistaNET, управляющий процессом каталитического риформинга в режиме реального времени на базе математической модели, которая сохраняет свою адекватность в течение

всего времени эксплуатации совместно с установкой каталитического риформинга.

**Теоретическая и практическая значимость:**

1. Разработана математическая модель в форме соответствующего программного обеспечения, позволяющая проектировать технологические режимы с достаточно высокой точностью;

2. Разработан алгоритм оптимального управления составляющий основу АСУ ТП риформинга, способствующий повышению эффективности технологического процесса на 3...7%;

3. Разработан нейро-итерационный метод параметрической идентификации, который может быть использован для решения широкого круга задач;

4. Создан универсальный программный комплекс оптимального управления процессом каталитического риформинга для всех видов установок каталитического риформинга со стационарным слоем катализатора и адаптированный для интеграции в современные SCADA системы.

**Методология и методы исследований.** В работе для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, методы численного решения дифференциальных уравнений, аппарат нейронных сетей, итерационный метод поиска, методы математического программирования, методы поиска экстремума функций без применения дифференциальных уравнений (комбинация методов Нелдера-Мида и Хука-Дживса).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая проблемно-ориентированная модель технологического процесса риформинга, отражающая физико-химические превращения в ходе риформинга.

2. Нейро-итерационной метод параметрической идентификации проблемно-ориентированной модели, обеспечивающий адекватность модели в течение технологического процесса;

3. Постановка и решение задачи оптимального управления технологическим процессом риформинга на основе квазистационарной задачи программирования;

4. Программный комплекс, реализующий систему оптимального управления технологическим процессом каталитического риформинга в режиме реального времени.

**Степень достоверности диссертационного исследования** обоснована корректностью допущений, опорой на основные физико-химические закономерности, корректностью математического аппарата и соответствию экспериментальным данным.

**Апробация работы.** Основные результаты работы, полученные в диссертации, докладывались на международных и российских конференциях и семинарах: IV International Research-to-Practice Conference "Actual problems of information technologies, electronics and radio engineering - 2018" (ITER - 2018), 18.05-20.05 2018 г.; Молодёжная наука – XXI век (2014-2015 г.). Работа докладывалась на научных семинарах «Автоматизация технологических процессов» Самарского государственного технического университета (2015-2018 гг.).

Работа отмечена Министерством образования и науки Самарской области в рамках областного конкурса «Молодой учёный» в номинации «Аспирант» (Самара, 2018 г.).

**Внедрение результатов.** Результаты работы внедрены в производственный процесс компаний АО «Сызранский НПЗ» и ООО ИК «Сибинтек», за счёт внедрения адаптивной системы управления достигается рост эффективности производственного процесса на установках каталитического риформинга со стационарным слоем катализатора на 3...7%. Результаты исследования также внедрены в производственный процесс ООО «Schneider Electric Центр Инноваций», ООО «Открытый код» в целях проектирования систем управления и алгоритмов обработки данных в других областях промышленности. Основные научные положения, представленные в диссертации, использованы при подготовке в ФГБОУ ВО «СамГТУ» бакалавров по направлению 27.03.04 «Управление в технических системах».

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 10 научных работ, среди которых 1 статья, индексируемая в базе SCOPUS, 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Полный объем диссертационной работы составляет 137 страниц печатного текста и содержит введение, четыре раздела, выводы по работе, список используемой литературы и 3 приложения. Основная часть диссертации содержит 33 рисунка и 11 таблиц. Список использованных источников содержит 138 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, отмечены научная новизна, практическая значимость и внедрение результатов работы, сформулированы положения, которые выносятся на защиту.

**В первом разделе** проведён анализ установки каталитического риформинга, рассмотрен технологический процесс каталитического риформинга в качестве объекта управления. Проанализировано совре-

менное состояние вопроса управления риформингом, выявлены различные методы и подходы к автоматизации технологического процесса. Выделены методы управления процессом каталитического риформинга с использованием математических моделей двух видов: эмпирических и кинетических. Рассмотрены основные критерии оптимизации процесса риформинга и выявлены наиболее эффективные с экономической и технической точек зрения. На основании выводов по анализу вопроса сформулированы задачи исследования, при решении которых будет реализована поставленная цель.

Обобщённая структурная схема адаптивной системы оптимального управления с идентифицируемой моделью приведена на рисунке 1.

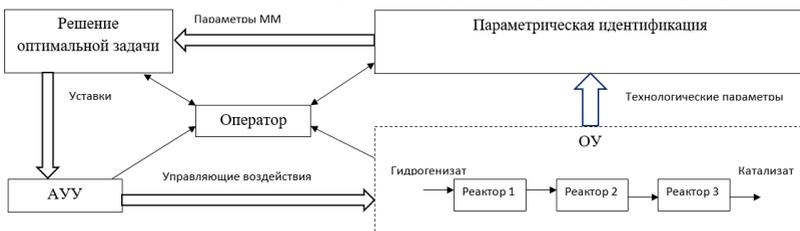


Рисунок 1. Схема функционирования системы управления

Технологический процесс риформинга (ОУ) заключается в обработке сырья (ароматизации гидрогенизата) в 3-х последовательно соединённых реакторах, выходным продуктом является катализат.

Система проводит параметрическую идентификацию математической модели с учётом технологических параметров ОУ. За счёт полученной адекватной математической модели (ММ) происходит решение оптимальной задачи, после чего уставки технологических параметров отправляются в АУУ (автоматические управляющие устройства) и они, соответственно, осуществляют управляющие воздействия.

Оператор системы управления осуществляет мониторинг параметров ОУ с целью получения достоверных данных, производит настройку параметрической идентификации (вводит начальные значения физико-химических констант) выбирает оптимальную задачу управления.

**Во втором разделе** разработана функционально-ориентированная на использование в качестве идентифицируемой в системе управления математическая модель процесса риформинга, состоящая из 3-х моделей реакторов. Математическая модель отличается достаточно высокой степенью адекватности на протяжении всего технологического процесса, т.к. содержит в себе в качестве идентифицируемых параметров константы скоростей химических реакций. Параметрическая иден-

тификация модели осуществляется по сигналам с информационно-измерительной системы в соответствующие дискретные периоды времени. Структурная схема модели технологического процесса риформинга показана на рисунке 2.

Входными параметрами модели являются:  $G_0$  – расход гидрогенизата на входе реакторного блока,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $G_{\text{всг}}$  – расход водородосодержащего газа (ВСГ) на входе реакторного блока,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\overline{G_k} = (G_{k1}, G_{k2}, G_{k3})$  – вектор отношения массы катализатора к подаче сырья в каждом реакторе,  $\text{кг}/(\text{кмоль}/\text{ч})$ ;  $\overline{Y_a} = (Y_{a0}, Y_{a1}, Y_{a2}, Y_{a3})$ ,  $\overline{Y_n} = (Y_{n0}, Y_{n1}, Y_{n2}, Y_{n3})$ ,  $\overline{Y_p} = (Y_{p0}, Y_{p1}, Y_{p2}, Y_{p3})$  – векторы содержания ароматических, нафтеновых и парафиновых углеводородов в исходной смеси и после каждого из реакторов;  $T_{50}$  – температура 50-и процентного выкипания исходной смеси, град. С;  $p$  – плотность исходной смеси;  $\overline{T_{\text{вх}}} = (T_{\text{вх}1}, T_{\text{вх}2}, T_{\text{вх}3})$  – вектор температур смеси на входе каждого из 3-х реакторов, град. С;  $\overline{P} = (P_1, P_2, P_3)$  – вектор давлений смеси в каждом из 3-х реакторов, МПа.

Обработка исходных данных представляет собой преобразование технологических параметров ОУ в промежуточные, которые необходимы для расчёта ММ.

Промежуточными параметрами модели являются:  
 $\overline{n_0} = (n_{a0}, n_{n0}, n_{p0}, n_{g0}, n_{\text{H}20})$ ,  $\overline{n_1} = (n_{a1}, n_{n1}, n_{p1}, n_{g1}, n_{\text{H}21})$ ,  
 $\overline{n_2} = (n_{a2}, n_{n2}, n_{p2}, n_{g2}, n_{\text{H}22})$ ,  $\overline{n_3} = (n_{a3}, n_{n3}, n_{p3}, n_{g3}, n_{\text{H}23})$  – векторы расхода ароматических, нафтеновых, парафиновых, газообразных углеводородов и водорода на входе в блок реакторов и на выходе каждого из 3-х реакторов,  $\text{кмоль}/\text{ч}$ ;  
 $\overline{M_0} = (M_{a0}, M_{n0}, M_{p0}, M_{c0})$ ,  $\overline{M_1} = (M_{a1}, M_{n1}, M_{p1}, M_{c1})$ ,  
 $\overline{M_2} = (M_{a2}, M_{n2}, M_{p2}, M_{c2})$ ,  $\overline{M_3} = (M_{a3}, M_{n3}, M_{p3}, M_{c3})$  – векторы молярных масс потоков ароматических, нафтеновых, парафиновых, газообразных углеводородов и водорода на входе в блок реакторов и на выходе каждого из 3-х реакторов,  $\text{кг}/\text{кмоль}$ ;  $\overline{Y_1} = (Y_{a1}, Y_{n1}, Y_{p1})$ ,  
 $\overline{Y_2} = (Y_{a2}, Y_{n2}, Y_{p2}, )$ ,  $\overline{Y_3} = (Y_{a3}, Y_{n3}, Y_{p3})$  – векторы содержания ароматических, нафтеновых и парафиновых углеводородов;

$T_{\text{ВЫХ1}}, T_{\text{ВЫХ2}}, T_{\text{ВЫХ3}}$  – температура смеси на выходе каждого из 3-х реакторов, град. С;  $\overline{K_{k1}} = (K_{Kna1}, K_{Knp1}, K_{Kng1}, K_{Kpg1}, K_{KC1})$ ,  
 $\overline{K_{k2}} = (K_{Kna2}, K_{Knp2}, K_{Kng2}, K_{Kpg2}, K_{KC2})$ ,  
 $\overline{K_{k3}} = (K_{Kna3}, K_{Knp3}, K_{Kng3}, K_{Kpg3}, K_{KC3})$  – векторы корректирующих коэффициентов идентифицируемых параметров модели для 3-х реакторов;  $K_{д1}, K_{д2}, K_{д3}$  – коэффициенты дезактивации катализатора в  $i$ -ом реакторе блока риформинга;  $K_{g1}, K_{g2}, K_{g3}$  – коэффициенты жёсткости процесса в каждом реакторе.

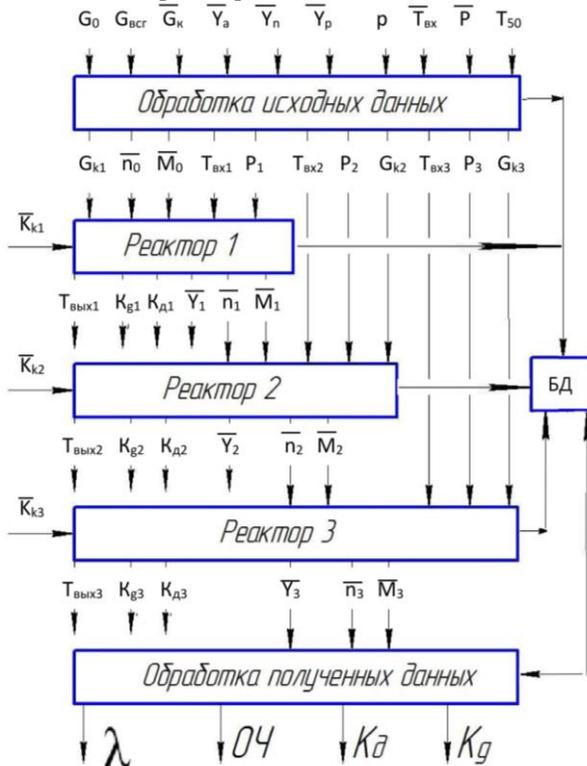


Рисунок 2. Структурная схема математической модели

Обработка полученных данных за счёт доступа к базе данных (БД), в которой содержатся все значения полученные в ходе функционирования модели в 3-х моделях реакторов, даёт возможность вычислить целевые показатели риформинга.

Выходными параметрами модели являются:  $\lambda$  – выход целевого продукта (катализата), кг/кг; ОЧ – октановое число получаемого катализата;  $K_d$  – коэффициент дезактивации катализатора в реакторах;  $K_g$  – коэффициент жёсткости процесса риформинга.

Векторы корректирующих коэффициентов  $\overline{K}_{ki}$ , как идентифицируемые параметры модели в качестве множителей, введены для приравнивания констант скоростей реакций и теплоёмкости реакционной смеси в математической модели с реальными показателями блока каталитического риформинга. Выражения для констант скоростей и теплоёмкости смеси по закону Аррениуса для каждого из трёх реакторов имеют вид:

$$\begin{aligned} K_{1i} &= K_{Knai} \cdot K_{01i} \cdot e^{-\frac{C_{1i}}{T_{exi}}}; & K_{2i} &= K_{Knpi} \cdot K_{02i} \cdot e^{-\frac{C_{2i}}{T_{exi}}}; \\ K_{3i} &= K_{Kngi} \cdot K_{03i} \cdot e^{-\frac{C_{3i}}{T_{exi}}}; & K_{4i} &= K_{Kpgi} \cdot K_{03i} \cdot e^{-\frac{C_{3i}}{T_{exi}}}; \\ K_{P1i} &= K_{Knai} \cdot K_{P01i} \cdot e^{-\frac{C_{P1i}}{T_{exi}}}; & K_{P2i} &= K_{Knpi} \cdot K_{P02i} \cdot e^{-\frac{C_{P2i}}{T_{exi}}}; \\ \overline{C} &= K_{KCi} \left( \frac{Hcm(T_{exi} + \Delta T_{ui}) - Hcm(T_{exi})}{\Delta T_{ui}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $K_{01i}, K_{02i}, K_{03i}$  и  $K_{Knai}, K_{Knpi}, K_{Kngi}, K_{Kpgi}$  – предэкспоненциальные множители констант скоростей реакций  $K_{1i}, K_{2i}, K_{3i}, K_{4i}$ ;  $C_{1i}, C_{2i}, C_{3i}$  – энергии активации тех же реакций;  $K_{P01i}, K_{P02i}$  – предэкспоненциальные множители констант равновесия  $K_{P1i}, K_{P2i}$ ;  $C_{P1i}, C_{P2i}$  – постоянные констант равновесия;  $T_{вхi}$  – температура на входе в реактор, град. К;  $K_{Knai}, K_{Knpi}, K_{Kngi}, K_{Kpgi}$  – корректирующие коэффициенты для констант скоростей, обеспечивающие точность модели;  $Hcm(T_{exi} + \Delta T_{ui})$  – энтальпия реакционной смеси на выходе реактора, кДж/кг;  $Hcm(T_{exi})$  – энтальпия на входе реактора, кДж/кг;  $K_{KCi}$  – корректирующий коэффициент для теплоёмкости.

Начальными условиями для модели являются:

$$n_{ai}(t_0) = n_{a0i}; n_{ni}(t_0) = n_{n0i}; n_{pi}(t_0) = n_{p0i}; n_{gi}(t_0) = n_{g0i}; T_{exi}(t_0) = T_{ex0i}. \quad (2)$$

Кинетика химических превращений и тепловой баланс в каждом реакторе блока каталитического риформинга описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 -\frac{dn_{nai}}{dG_{ki}} &= k_{1i} P_{ni} - \frac{k_{1i}}{K_{P1i}} P_{ai} P_{H2i}^3; \\
 -\frac{dn_{npi}}{dG_{ki}} &= k_{2i} P_{ni} P_{H2i} - \frac{k_{2i}}{K_{P2i}} P_{pi}; \\
 -\frac{dn_{ngi}}{dG_{ki}} &= k_{3i} \frac{P_{ni}}{P_i}; \\
 -\frac{dn_{pgi}}{dG_{ki}} &= k_{4i} \frac{P_{pi}}{P_i}; \\
 -\frac{dT_i}{dG_{ki}} &= \frac{1}{G_{cm} \cdot C} \left( \Delta H_{na} \frac{dn_{nai}}{dG_{ki}} + \Delta H_{np} \frac{dn_{npi}}{dG_{ki}} + \Delta H_{ng} \frac{dn_{ngi}}{dG_{ki}} + \Delta H_{pg} \frac{dn_{pgi}}{dG_{ki}} \right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_{ai}, P_{ni}, P_{pi}, P_{H2i}$  – парциальные давления в газопродуктовой смеси ароматических, нафтеновых, парафиновых углеводородов и водорода, Па;  $K_{1i}, K_{2i}$  – константы скоростей прямых реакций, Кмоль/(ч•Па•кг);  $K_{P1i}$  – константа равновесия первой реакции, Па<sup>3</sup>;  $K_{P2i}$  – константа равновесия второй реакции, Па<sup>-1</sup>;  $K_{3i}, K_{4i}$  – константы скоростей реакций, Кмоль/(ч•кг);  $\bar{C}$  – средняя теплоёмкость реакционной смеси, кДж/кг•град. К;  $\Delta H_{na}, \Delta H_{np}, \Delta H_{ng}, \Delta H_{pg}$  – тепловые эффекты химических реакций;  $G_{cm}$  – масса смеси, кг.

Молярные массы в математической модели вычисляются на основе зависимости количества углеводородов и их соотношения в смеси и массы смеси.

Основные выходные показатели модели, которые определяют эффективность процесса риформинга определяются по зависимостям:

$$\lambda = \frac{G_{cвых}}{G_{cвх}} = \frac{(M_{PNA} + \Delta M_{PNA}) \cdot (n_{PNA} + \Delta n_{PNA})}{G_{cвх}};$$

$$OC = \sum_{i=1}^3 Y_i \cdot OC_i - b \cdot Y_a^2 \quad (4)$$

$$K_g = (1 - \Delta Y_a^{oC})$$

$$K_o(t_n) = \frac{\Delta Y_a(t_n)}{\Delta Y_a(t_0)};$$

где  $G_{cвых}, G_{cвх}$  – массовый поток на выходе и входе блока реакторов;  $(M_{PNA} + \Delta M_{PNA}), (n_{PNA} + \Delta n_{PNA})$  – показатели молярной массы и молярно-

го потока ароматических, нафтеновых и парафиновых углеводородов на выходе блока реакторов;  $Y_i$  – доля углеводорода (ароматические, нафтеновые и парафиновые) в смеси;  $OC_i$  – октановое число для  $i$ -го компонента ( $OC_a=124$ ,  $OC_n=68$ ,  $OC_p=56$ );  $b$  – коэффициент равный 13; где  $K_g$  – коэффициент определяющий жесткость протекания процесса каталитического риформинга;  $\Delta Y_a^{c,c}$  – пограничное приращение ароматичности на выходе реактора, если температура смеси претерпевает изменение на входе реактора на 1 град. С.

Эти показатели в дальнейшем рассматриваются как критерии оптимальности в соответствующих задачах оптимального управления. Адекватность модели обеспечивается периодической идентификацией её параметров с заданным периодом, который обуславливается длительностью измерения состава смеси во время процесса риформинга.

Нейро-итерационный метод в отличие от итерационного поиска (рисунок 4а) позволяет на основе аппроксимации при помощи нейросетевого блока (рисунок 3) вычислить начальные значения идентифицируемых параметров, которые в дальнейшем уточняются итерационным способом (рисунок 4б).

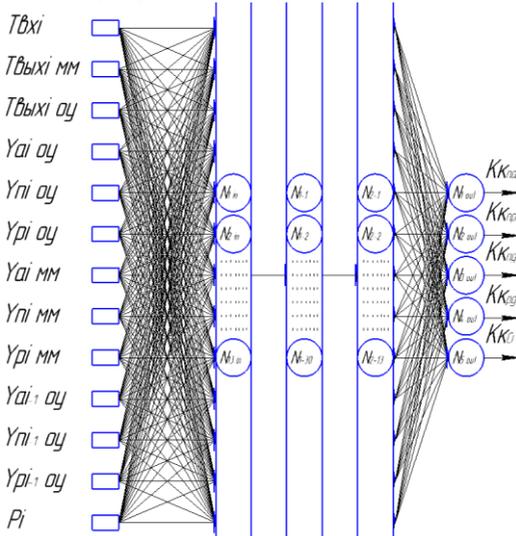


Рисунок 3. Нейросетевой блок адаптации модели

Алгоритм параметрической идентификации показан на рисунке 5. На вход алгоритма поступают из памяти данные из ММ и параметры, непосредственно, с ОУ. После циклически вычисляются идентифицируемые параметры направляются в ММ.

Сравнительный анализ показал, что при использовании нейронной сети суммарное количество итераций, необходимых для поиска нового значения идентифицируемых параметров математической модели отдельного реактора в сравнении с использованием одного итерационного способа уменьшается на:

- 20...42% при 500 обучающих примерах;
- 45...90% при 1000 обучающих примерах.

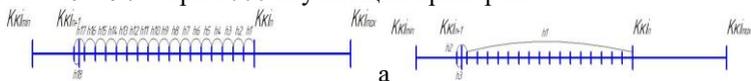


Рисунок 4. Схема поиска идентифицируемого параметра модели без нейросетевого блока (а) и с его применением (б).

а)  $h_1 \dots h_{17}$  – шаги итерационного алгоритма; б)  $h_1$  – дистанция поиска скомпенсированная нейронной сетью;  $h_2, h_3$  – шаги выполняемые итерационным алгоритмом.

Для оценки адекватности разработанной модели проведён сравнительный анализ по данным с установки по базовым режимам (Real), показателям стандартной модели без поправочных коэффициентов (Standart) и модели с ними (Best). Анализ по выходу катализатора и анализ по выходу ароматических углеводородов по базовым режимам работы установки показаны в таблице 1.

Погрешность разработанной идентифицируемой модели с применением нейро-итерационного метода в сравнении с реальными показателями с объекта по выходу катализатора составляет 0,09%, по выходу ароматических углеводородов 0,17%.

Разработанная модель хотя и ориентирована на применение в алгоритмах оптимизации, имеет самостоятельное значение при использовании в расчетно-проектной практике.

**В третьем разделе** осуществляется постановка и решение задач оптимального управления процессом риформинга, а также выбор технических средств для системы. По итогам анализа технологического процесса риформинга выбраны следующие управляющие воздействия, к которым технологический процесс риформинга наиболее чувствителен:

- температура на входе каждого из 3-х реакторов ( $T_{вх1}, T_{вх2}, T_{вх3}$ );
- расход водородсодержащего газа в блок риформинга ( $G_{всг}$ ).

Температура  $T_{вхi}$  оказывает наибольшее влияние на технологический процесс в соответствии с выражением (1). Подача на вход блока реакторов ВСГ позволяет регулировать расход катализатора и степень превращения компонентов в смеси на выходе с определёнными ограничениями.

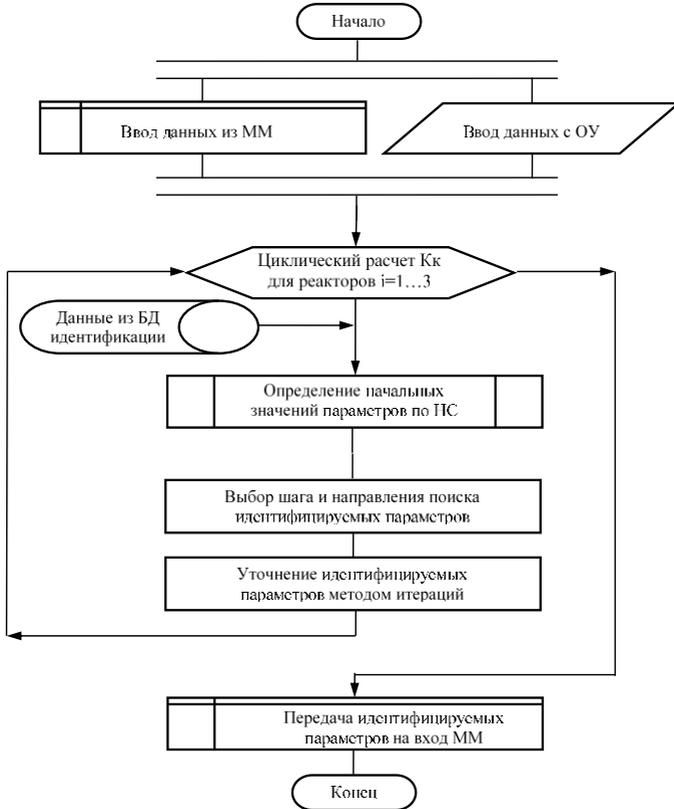


Рисунок 5. Алгоритм параметрической идентификации

По результатам технико-экономического анализа работы установки каталитического реформинга поставлены задачи параметрической оптимизации в соответствии с целевыми показателями (4).

Последовательное решение этих задач во времени с соответствующей периодичностью позволяет интерпретировать полученные зависимости  $T_{вхi}(t)$  и  $G_{всг}(t)$  как оптимальное управление, а комплекс задач математического программирования, как задачу оптимального управления.

Для решения задач параметрической оптимизации применяются комбинированный метод нелинейной оптимизации Хука-Дживса и Нелдера-Мида, который служит для поиска безусловного локального экстремума функции.

Результаты расчётов

Базовый режим	Выход катализата, %			Выход ароматических углеводородов, %		
	Real	Standart	Best	Real	Standart	Best
1	79,6	81,35	79,77	44,55	40,75	45,39
2	78,7	80,88	78,65	41,33	38,6	41,44
3	80,5	82,28	80,42	42,65	38,57	42,96
4	80,9	83,08	81	47,27	43,93	47,09
5	82,6	84,86	82,52	45,32	41,49	45,3
6	85,2	86,37	85,09	37,78	35,98	37,89
7	83,1	85,36	83,16	40,13	37,56	40,28
8	81,8	83,91	81,68	40,76	38,07	40,9
9	84,9	86,11	84,83	42,3	39,06	42,38
10	84,5	86,01	84,41	37,22	35,81	37,31
11	82,4	84,66	82,34	39,45	36,87	39,59
12	82,9	85,1	82,81	43,86	40,22	43,99
13	79,3	81,23	79,24	46,36	42,65	46,21
14	84,7	85,95	84,63	38,72	36,24	38,88
15	84,2	85,83	84,08	42,08	39,04	42,17
16	85,6	86,29	85,55	41,11	38,31	41,23
17	81,2	83,53	81,11	43,34	39,73	43,47
18	83,7	85,77	83,83	37,5	35,9	37,7
19	78,1	80,13	78,17	41,7	38,76	41,83
20	85,3	86,45	85,22	42,45	39,08	42,56

При необходимости возможен выбор одного из 4-х критериев оптимизации и, соответственно, одну из 4-х задач математического программирования в комплексе задач оптимального управления:

1. Максимизация выхода целевого продукта (катализата), при установленном октановом числе:

$$\lambda(T_{exi}, G_{vh}) \rightarrow \max \quad (5)$$

при ограничениях:

$$T_{exi \min} \leq T_{exi} \leq T_{exi \max}, i = \overline{1,3} \quad (6)$$

$$\eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max} \quad (7)$$

$$OЧ \geq OЧ_0 \quad (8)$$

$$Kg \leq Kg_0 \quad (9)$$

$$K\partial \geq K\partial_0 \quad (10)$$

$$G_{0 \min} \leq G_0 \leq G_{0 \max} \quad (11)$$

2. Максимизация показателя октанового числа целевого продукта, при установленном выходе катализатора:

$$ОЧ(T_{\text{окси}}, G_{vh}) \rightarrow \max \quad (12)$$

при ограничениях: (6), (7), (9), (10), (11),

$$\lambda \geq \lambda_0 \quad (13)$$

3. Максимизация показателя октанового числа катализатора процесса риформинга:

$$ОЧ(T_{\text{окси}}, G_{vh}) \rightarrow \max \quad (14)$$

при ограничениях: (6), (7), (9), (10), (11).

4. Максимизация времени целесообразного эксплуатирования катализатора, при установленных показателях октанового числа целевого продукта и выходе катализатора:

$$t(T_{\text{окси}}, G_{vh}) \rightarrow \max \quad (15)$$

при ограничениях: (6), (7), (8), (9), (10), (11), (13),

где  $\eta$  – кратность циркуляции ВСГ/сырьё.

Ограничения (6)-(11) и (13) обусловлены технологическим регламентом установки и задаются оператором установки в обусловленных диапазонах, в зависимости от поставленной задачи.

Для каждого из реакторов рассчитывается своя оптимальная температура  $T_{\text{вхi}}$ , которая обеспечивает максимальное приращение ароматических углеводородов. При этом превышение некоторого значения температуры ускоряет дезактивацию катализатора. Для предотвращения дезактивации в состав ограничений использован коэффициент жёсткости риформинга, ограничение которого обеспечивает минимальный прирост побочных продуктов.

При превышении коэффициентом жёсткости граничного значения прирост побочных продуктов ( $Y_k$ ) увеличивается при существенном уменьшении прироста ароматических углеводородов ( $Y_a$ ) (рисунок 6).

Для оценки эффективности катализатора в течение времени использован понятие коэффициента дезактивации.

Активность катализатора отражает коэффициент дезактивации, значение которого может быть получено экспериментально.

Рисунок 7 демонстрирует увеличение срока службы катализатора ( $t_o$  по отношению к  $t_R$ ) при использовании рассматриваемой системы (Opt) по сравнению с традиционной технологией (Real). При выборе 4-го критерия возможно расширить межрегенерационный период (Opt) по сравнению со стандартным периодом (Real), при  $K_d > K_{d0}$ .

Полученные решения поставленных оптимальных задач, экспериментально проверены на установке каталитического риформинга Л35-11/600. В ходе испытаний получено:

– при максимизации выхода катализата  $\lambda$ , его прирост на основе базовых режимов составляет 5,06% с установленным октановым числом ОЧ=85 (рисунок 8);

– при максимизации октанового числа, прирост ароматических углеводородов  $Y_a$  составит 7,93%, с установленным выходом катализата  $\lambda=80\%$  (рисунок 9);

при максимизации октанового числа, без ограничений по выходу катализата  $\lambda$ , прирост ароматических углеводородов  $Y_a$  составит 15,12%, а прирост выхода катализата -10% (рисунок 10).

В среднем эффективность технологического процесса риформинга увеличивается в зависимости от выбранного критерия на 3...7%.

Для технической реализации системы составлена структурная схема комплекса технических средств (рисунок 11), в которую входят:

- датчики температуры ТХАУ Метран-271-Exd;
- датчики давления Rosemount 2088A-Exd;
- датчики расхода ЭМИС-ВИХРЬ 200 Вн;
- датчик плотности Micro Motion 7835;
- датчики углеводородного состава смеси PGC2003 PNA;
- пневмоприводы Flowserve PO 3002;
- контроллер WP-9421-CE7.

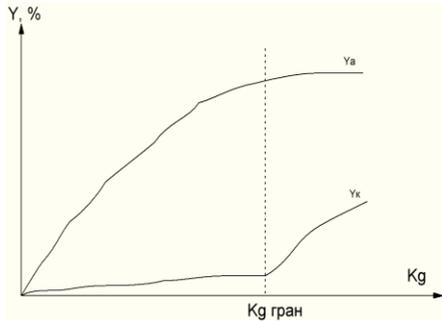


Рисунок 6. Изменение приращения ароматических углеводородов и кокса

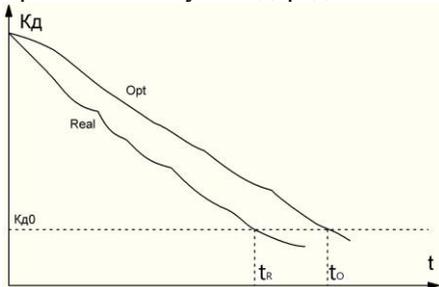
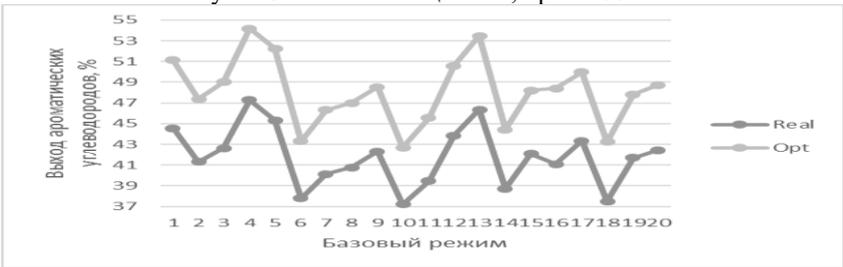


Рисунок 7. Изменение коэффициента дезактивации катализатора

Рисунок 8. Максимизация  $\lambda$ , при  $OЧ=85$ Рисунок 9. Максимизация  $OЧ$ , при  $\lambda=80\%$ Рисунок 10. Максимизация  $OЧ$

Согласно выбранному оборудованию период идентификации модели и оптимизации

процесса составляет 10 мин с задержкой 10 мин (при теоретическом значении рассмотрения неизменности активности катализатора 77 мин, что составляет 1/5000 от периода эксплуатации катализатора), в этот период активность катализатора в соответствии с гипотезой квазистационарности принимается равной константе. Время переходных процессов по температурам на выходах секций печи

не превышает 30 с, время переходного процесса расхода ВСГ в блок реакторов не более 2 с, для технического обеспечения этих показателей используются исполнительные механизмы с высоким быстродействием (пневмоприводы, полное время хода штоков, которых менее 1 с).

В программный комплекс входят:

- SCADA Trace Mode 6;
- Microsoft Visual Studio;
- VistaNET.

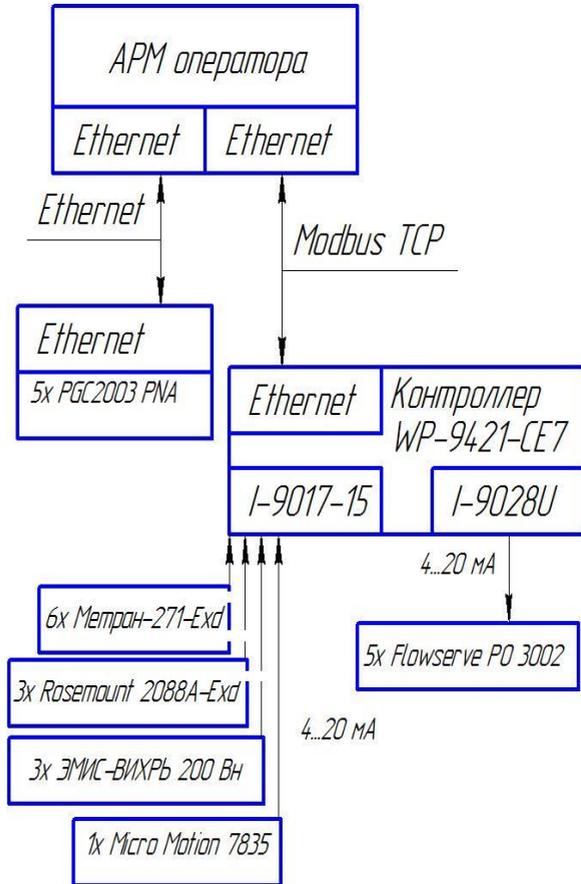


Рисунок 11. Структурная схема комплекса технических средств

Структура взаимодействия отдельных программ разработанного комплекса представлена на рисунке 12.

VistaNET является программным обеспечением для управления газовыми хроматографами PGC2003, которые измеряют концентрацию ароматических, нафтеновых и парафиновых углеводородов. Стрелками на структурной схеме обозначены взаимодействия элементов. Центральным элементом является SCADA система, которая обменивается данными с другими модулями: VistaNET и Microsoft Visual Studio.

В Microsoft Visual Studio реализованы следующие компоненты:

– MM – математическая модель процесса каталитического риформинга;

– ID – программа идентификации, поддерживающая адекватность кинетической модели риформинга;

– NN и DB – нейронная сеть и база данных, обеспечивающие оперативный поиск поправочных коэффициентов для разработанной математической модели;

– OPT – программа оптимизации управления технологическим процессом каталитического риформинга, основанная на выборе одного из целевых критериев (задачи 1-4);

– t(Kd) и DB – построение функции зависимости времени полезного функционирования технологического процесса каталитического риформинга от коэффициента дезактивации на основе опытных данных, полученных из базы данных.

Также сформулированы основные подходы интеграции разработанного программного комплекса в системы SCADA.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации с целью повышения эффективности установки каталитического риформинга ЛЗ5-11/600 поставлена и решена актуальная задача разработки адаптивной системы оптимального управления с

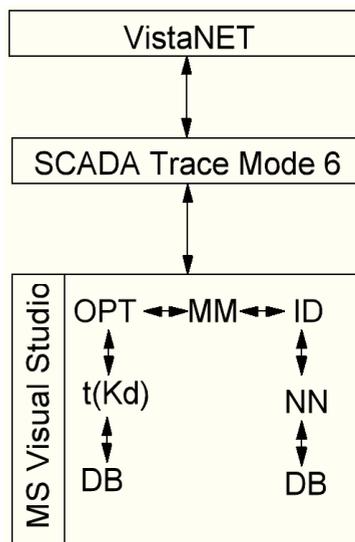


Рисунок 12. Структура взаимодействия программных обеспечений

идентифицируемой моделью технологическим процессом каталитического риформинга, которая обеспечивает рост выхода продукта установки и его качества. Цель достигается за счет введения в уравнения модели для расчета констант скоростей химических реакций и теплового баланса корректирующих коэффициентов, которые являются идентифицируемыми параметрами, сохраняющими адекватность математической модели технологического процесса каталитического риформинга на протяжении всего времени эксплуатации установки. На основе модели происходит оптимизация процесса риформинга.

Основные научные результаты и выводы:

1. Разработана функционально-ориентированная параметрически идентифицируемая математическая модель технологического процесса риформинга предназначенная для применения в контуре адаптивной системы оптимального управления;

2. Разработан нейро-итерационный метод параметрической идентификации модели процесса риформинга, обеспечивающий сохранение адекватности математической модели в течение всего времени использования модели;

3. Поставлены задачи оптимизации процесса риформинга согласно технико-экономическому анализу работы установки, в основе задач лежат такие целевые показатели процесса, как выход катализата и его октановое число;

4. Определены косвенные показатели (коэффициенты жёсткости процесса и дезактивации катализатора), ограничение которых приводит к лучшему соотношению продуктивность/потери и возможности более длительной эксплуатации катализатора;

5. Выполнена разработка алгоритмов работы системы управления и взаимосвязи между программными обеспечениями;

6. Решена задача оптимального управления технологическим процессом риформинга на основе квазистационарной задачи математического программирования;

7. Разработан программный комплекс с целью реализации системы оптимального управления технологическим процессом каталитического риформинга, адаптированный для интеграции в системы SCADA, управляющими производством;

8. Опытно-практические испытания результатов исследования на установке каталитического риформинга со стационарным слоем катализатора показали:

– при максимизации выхода катализата  $\lambda$ , его прирост на основе базовых режимов составляет 5,06% с установленным октановым числом ОЧ=85;

– при максимизации октанового числа, прирост ароматических углеводородов  $Y_a$  составит 7,93%, с установленным выходом катализатора  $\lambda=80\%$ ;

– при максимизации октанового числа, без ограничений по выходу катализатора  $\lambda$ , прирост ароматических углеводородов  $Y_a$  составит 15,12%, а прирост выхода целевого продукта (катализатора) -10%.

В дальнейшем разработки диссертационного исследования возможно адаптировать для технологического процесса платформинга и обеспечить рост эффективности установок платформинга.

Методики и разработки исследования можно применить в разработке систем управления технологическими процессами в нефтеперерабатывающей и химической промышленности.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах, индексируемых в международной наукометрической базе SCOPUS**

1. A.A. Kuzichkin. "Increasing the performance of the catalytic reforming unit by the synthesis of the optimal control system with high-precision time synchronization" / A.A. Kuzichkin, A.S. Raguzin, N.G. Gubanov. // IV International Research-to-Practice Conference "Actual problems of information technologies, electronics and radio engineering - 2018" (ITER - 2018) Proceedings. 2018.

### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ**

2. Кузичкин А. А. Совершенствование системы управления блоком каталитического риформинга // Естественные и технические науки. 2018. № 1 (115). С. 148-150.

3. Кузичкин А.А. Разработка программного комплекса для оптимизации процесса каталитического риформинга // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/159TVN617.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

4. Кузичкин А.А. Определение параметров математических моделей с применением нейросетевых технологий / Кузичкин А.А., Губанов Н.Г. // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. № 4 (56). С. 17-22.

5. Кузичкин А.А. Разработка комплекса программ для математического моделирования и оптимизации процесса каталитического ри-

форминга / Кузичкин А.А., Губанов Н.Г. // Вестник технологического университета. – 2017. Том 20, № 22. С. 77-83.

6. Кузичкин А. А. Статическая оптимизация процесса каталитического риформинга // Естественные и технические науки. 2017. № 10 (112). С. 106-112.

7. Кузичкин А.А. Разработка математической модели процесса каталитического риформинга // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9 (76). С. 23-28.

### **Публикации в других изданиях**

8. Кузичкин А.А. Нейронные сети в промышленности и информационных технологиях // Развитие технических наук в современном мире. Выпуск 2. Воронеж. 2015. С. 17-20.

9. Кузичкин А.А. Разработка виртуального лабораторного тренажёрного комплекса «Технические и программные средства автоматизации» средствами SCADA Trace Mode 6 // Молодёжная наука – XXI век: материалы IV межмуниципальной молодёжной научно-практической конференции / Отв. редактор В.П. Сухинин. – Самара. Самар. гос. техн. ун-т, 2014. с. 176. С. 40-41.

10. Кузичкин А.А. Экономическое обоснование использования имитационных моделей для исследования и управления сложными системами // Молодёжная наука – XXI век: материалы IV межмуниципальной молодёжной научно-практической конференции / Отв. редактор В.П. Сухинин. – Самара. Самар. гос. техн. ун-т, 2014. с. 176. С. 114-115.

Разрешено к печати диссертационным советом Д 212.217.07

Протокол №6 от 21 сентября 2018 г.

Заказ № . Формат 60x84 1/16. Бумага тип. №1.

Отпечатано на ризографе. уч.-изд. л. 1,0. Тираж 120 экз.

Самарский государственный технический университет

Типография СамГТУ

443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, Главный корпус