

На правах рукописи



МОЖАРОВСКИЙ ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ МАССООБМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПОДСИСТЕМЫ АСУТП ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ВЫХОДНЫХ ПРОДУКТОВ**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владивосток
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт автоматики и процессов управления» Дальневосточного отделения Российской академии наук и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса».

Научный руководитель: **Торгашов Андрей Юрьевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Виктор Михайлович Дозорцев**
доктор технических наук, директор по развитию бизнеса ООО «Центр цифровых технологий», г. Москва

Сергей Дмитриевич Фарунцев
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», доцент кафедры автоматизации и робототехники, г. Омск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится «25» февраля 2022 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 99.0.073.03 на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт автоматики и процессов управления» Дальневосточного отделения Российской академии наук, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем морских технологий» Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5, ауд. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ДВФУ по адресу г. Владивосток, о. Русский, кампус ДВФУ, корпус А, 10-й этаж и на сайте https://www.dvfu.ru/science/dissertation-tips/analytical-platform-of-dissertations/detail.php?ID=57710628&IBLOCK_ID=1156

Автореферат разослан «___» _____ 202_ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.0.073.03,
доктор технических наук, профессор



Жирабок Алексей Нилович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В связи с повышающимися требованиями к качеству основных видов нефтепродуктов, предприятия нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности вынуждены непрерывно повышать экономическую эффективность производства и качество выпускаемой продукции. Эффективность производства может быть улучшена с помощью систем виртуального мониторинга (подсистемы автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП)) и контроля показателей качества выходного продукта. Для этого необходима разработка более точных математических моделей для оценки показателей качества (ММОПК) выходных продуктов для подсистемы АСУТП, описывающих нелинейные процессы, протекающие в ректификационных колоннах (РК). ММОПК входят в структуры систем виртуального мониторинга и позволяют оценить качество выходного продукта массообменного технологического процесса без установки дополнительных поточных анализаторов (физических датчиков), которые требуют постоянной калибровки.

Для построения ММОПК используются результаты лабораторных исследований и промышленные данные (данные со встроенных измерительных приборов) массообменных процессов, протекающих в ректификационных колоннах. Если включить адекватную математическую модель для оценки качества выходного продукта РК в систему усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП), то возможен контроль технологического процесса (ТП) в режиме реального времени. Установка программных датчиков стоит в десятки раз меньше, чем физических, и они не требуют постоянного обслуживания. Использование ММОПК в составе подсистемы АСУТП позволяет операторам производства оценивать качество выходного продукта РК, своевременно реагировать на технические сбои и оперативно настраивать режимы работы колонны оптимальным образом для достижения наилучшей продуктивности и сокращения затрат на производство.

Дополнительное преимущество таких моделей заключается в своевременном выявлении и устранении некондиционной продукции на производстве, вследствие чего не требуется последующая дорогостоящая переработка отбракованного сырья. В связи с этим исследования в рамках разработки новых методов построения адекватных математических моделей на промышленном производстве являются востребованными и актуальными.

Актуальность выбранного направления исследований подтверждается грантом Российского фонда фундаментальных исследований ДВО РАН «Математическое моделирование предельных режимов функционирования массообменных технологических процессов для задач управления» (проект № 11-08-98500-р_восток_a).

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы научных исследований Института автоматики и процесса управления ДВО РАН по теме «Развитие теорий и методов повышения эффективности сложных технических систем и процессов» (№01201353010 и № АААА-А17-117040450016-7).

Степень научной разработанности проблемы. Актуальность применения ММОПК в промышленности, а также использование различных подходов для их

построения представлены в работах отечественных ученых: Н. Н. Бахтадзе, А. П. Веревкина, Р. А. Аузан, А. А. Мусаева, В. Г. Горского и др.

В зарубежных трудах L. Breiman, J. Friedman, D. Wang, M. Murphy, S. Hengl и других описан алгоритм условных чередующихся математических ожиданий (alternating conditional expectations – ACE) в применении к построению статистических моделей. В работах M. T. Kuhn, A. Pani, T. Mejdell, S. Skogestad, E. Zamprogn, J. O. Street, R. J. Carroll, D. A. Ruppert, C. Lee, T. Chatterjee, M. Dam, D. N. Saraf, C. Shang применены различные методы построения ММОПК, такие как нейронные сети, методы множественной линейной регрессии и др. Однако для слабоформализованных нелинейных объектов приходится сталкиваться с проблемой выбора структуры модели. Это приводит к неоднозначности получения оценок неизвестных параметров модели, когда одной и той же выборке экспериментальных данных одинаково хорошо соответствует не одна, а сразу множество моделей. Такая ситуация свидетельствует о неидентифицируемости структуры модели. Понятие идентифицируемости объекта представлено в трудах E. Walter, L. Pronzato, T. Quaiser, W. Marquardt, M. Mönnigmann, M. J. Chappell, K. R. Godfrey, N. Meshkat. Для анализа структурной идентификации предлагается множество различных методов и алгоритмов, представленных в работах R. Bellman, K. J. Astrom, M. J. Chappell, K. R. Godfrey, C. Cobelli, J. J. Distefano.

Объект исследования: промышленные массообменные технологические объекты (МТО) – ректификационная колонна процесса вторичной перегонки бензинов С-6 и РК процесса производства метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) К-1.

Предмет исследования: алгоритмы и методы построения математических моделей для оценки качества выходных продуктов промышленных РК.

Цель и задачи диссертационной работы: разработка методов построения ММОПК, на основе экспериментальных данных, для оценки показателей качества выходных продуктов ректификационных колонн в условиях структурной неопределённости модели технологического процесса.

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

1. Разработка метода определения индекса структурной идентифицируемости массообменного технологического процесса при построении ММОПК для подсистемы АСУТП, основанного на алгоритме ACE с использованием дополнительной входной переменной, некоррелируемой с выходом.

2. Создание метода определения порогового значения индекса структурной идентифицируемости массообменного технологического процесса на основе использования его физико-химических закономерностей.

3. Разработка методики учета физико-химических закономерностей массообмена при построении статистических моделей для оценки качества выходных продуктов промышленных РК.

4. Создание методологии построения математических моделей на основе экспериментальных данных, отличающейся способом использования алгоритма ACE для анализа идентифицируемости и определения структуры ММОПК для подсистемы АСУТП массообменного технологического процесса.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методики построения математических моделей для оценки показателей качества

выходных продуктов промышленных ректификационных колонн в условиях структурной неопределенности объекта исследования.

1. Впервые использован алгоритм условных чередующихся математических ожиданий АСЕ для построения математических моделей для оценки показателей качества выходных продуктов промышленных ректификационных колонн, что позволило улучшить точность модели в сравнении с известными методами предсказательного моделирования.

2. Разработан метод определения порогового значения индекса структурной идентифицируемости массообменного технологического процесса при построении ММОПК для подсистемы АСУТП, основанный на алгоритме АСЕ с использованием дополнительной входной переменной, некоррелируемой с выходом, что позволило определить информативность исходной выборки данных (возможность построения адекватной математической модели).

3. Предложена и обоснована методика выбора регрессоров (входных переменных) ММОПК для подсистемы АСУТП на основе использования алгоритма АСЕ и дополнительного стохастического входа с отсутствием его корреляции с выходом, т. е. его удаленности от порогового значения индекса структурной идентифицируемости, что позволило определить информативность входных переменных.

4. Предложен метод устранения «пробелов» в обучающей выборке, которые возникают из-за малого диапазона изменчивости значений важной (в термодинамическом смысле) входной переменной, с использованием априорных знаний, что позволило повысить точность математической модели для оценки качества выходного продукта РК процесса вторичной перегонки бензинов С-6.

5. Предложен подход к построению математических моделей для оценки качества выходных продуктов промышленных РК С-6 и К-1 с использованием непараметрических моделей на основе алгоритма АСЕ, что позволило получить адекватные статистические модели для оценки качества выходных продуктов в условиях структурной неопределенности МТО для подсистемы АСУТП.

Практическая значимость и внедрение результатов работы. Применение разработанных математических моделей для оценки показателей качества выходных продуктов с применением предлагаемых методов в подсистемах АСУТП позволило обеспечить заданную точность прогноза качества продуктов РК С-6, что привело к снижению потерь С4 (бутанов) со стабильным бензином и минимизации содержания С5 (изо-пентана) в верхнем продукте в среднем на 0,2%. Также были сокращены потери производства и создан запас по качеству, обеспечивающий получение МТБЭ марки А.

Разработанные математические модели для оценки качества выходного продукта внедрены на производственных объектах АО «Газпромнефть-ОНПЗ».

Практическая значимость работы подтверждается двумя свидетельствами государственной регистрации программы для ЭВМ и актом о внедрении.

Методология и методы исследования. Использовались методы параметрической и непараметрической регрессии; структурный синтез; методы аппроксимации и идентификации систем; методы математического и имитационного моделирования; современные средства разработки программных комплексов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Предложен и обоснован подход к определению индекса структурной идентифицируемости массообменного технологического объекта при построении ММОПК для подсистемы АСУТП, основанный на алгоритме АСЕ с использованием дополнительной входной переменной, некорродируемой с выходом.

2. Разработан метод определения порогового значения индекса структурной идентифицируемости при построении ММОПК для подсистемы АСУТП промышленных ректификационных колонн С-6 и К-1 на основе использования физико-химических закономерностей массообменных процессов.

3. Разработана методика учета физико-химических закономерностей массообмена при построении математической модели оценки качества выходного продукта промышленной РК С-6.

4. Предложен подход к построению математических моделей на основе экспериментальных данных, отличающийся применением алгоритма АСЕ как для анализа идентифицируемости, так и для определения структуры ММОПК МТО.

Достоверность и обоснованность определяется корректным применением методов математического моделирования и обработки экспериментальных данных. Обоснованность полученных методов и алгоритмов основывается на сопоставлении полученных результатов с результатами, полученными другими известными методами и алгоритмами.

Реализация и внедрение. Полученные математические модели для оценки показателей качества товарных продуктов внедрены в составе АСУТП промышленной установки на предприятии АО «Газпромнефть-ОНПЗ». Отмечен положительный эффект от внедрения программного обеспечения в виде: адекватной оценки качества выходного продукта промышленной РК по температуре начала кипения стабильного бензина и содержанию углеводородов С5 в режиме реального времени; оперативности реагирования на сбой режимов работы РК обслуживающим персоналом; возможности настройки РК оптимальным образом в соотношении энергозатраты/качество выходного продукта.

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы реализованы в виде программного комплекса с возможностью адаптации его для необходимых технологических процессов, интеграции его в СУУТП. По результатам работы получено авторское свидетельство о регистрации программы на ЭВМ №2013615544 «Виртуальный анализатор» и №2019613404 «Программа для определения индекса структурной идентифицируемости объекта на основе алгоритма АСЕ и дополнительного не коррелируемого с выходом входа».

Апробация и внедрение результатов исследования. Основные результаты исследований, выполненных по теме диссертации, представлены на международных и всероссийских конференциях: «Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск, 2011 г.); «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.); «Идентификация систем и задачи управления» (г. Москва, 2012 г.); «Труды международного симпозиума надежность и качество» (г. Пенза, 2012 г.); «IEEE 4th International Conference on Modelling, Identification and Control» (КНР, г. Ухань, 2012 г.); XXVI международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Новгород, 2013 г.); «7th IFAC conference on

manufacturing modeling, management and control» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); XXVII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Саратов, 2014 г.); «19th IFAC World Congress» (г. Кейптаун, 2014 г.); «Идентификация систем и задачи управления/System identification and control problems SICPRO'15», (г. Москва 2015 г.); XXXI международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); XXXII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); XXXIII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Казань, 2020 г.); XXXVI международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Публикации. По результатам проведенных исследований и практических разработок опубликовано 22 научные работы: 7 статей в журналах из списка ВАК; 4 публикации в материалах конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science; 11 публикаций в материалах конференций, индексируемых в РИНЦ; получено 2 авторских свидетельства о регистрации программ для ЭВМ; акт внедрения.

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Автор принимал участие в постановке цели и задач по теме исследования, разработал численно-аналитические алгоритмы решения и соответствующие комплексы программ для проведения вычислительного эксперимента: построение математических моделей для оценки показателей качества выходных продуктов на основе ACE алгоритма; определение индекса структурной идентифицируемости процесса на основе алгоритма ACE и дополнительного некоррелируемого с выходом входа. Автор принимал участие в обсуждении полученных результатов, в написании научных статей, принимал участие в конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка используемой литературы, состоящего из 130 наименований, 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, включая 40 рисунков и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи, а также определены методы решения задач. Раскрыты научная новизна и практическая значимость работы, приводятся положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В первой главе приведен обзор состояния исследований по проблемам построения математических моделей для оценки качества выходных продуктов ректификационных колонн с использованием виртуальных анализаторов (ВА). На рисунке 1 представлена схема взаимодействия подсистемы АСУ ТП виртуального анализа и СУУТП.

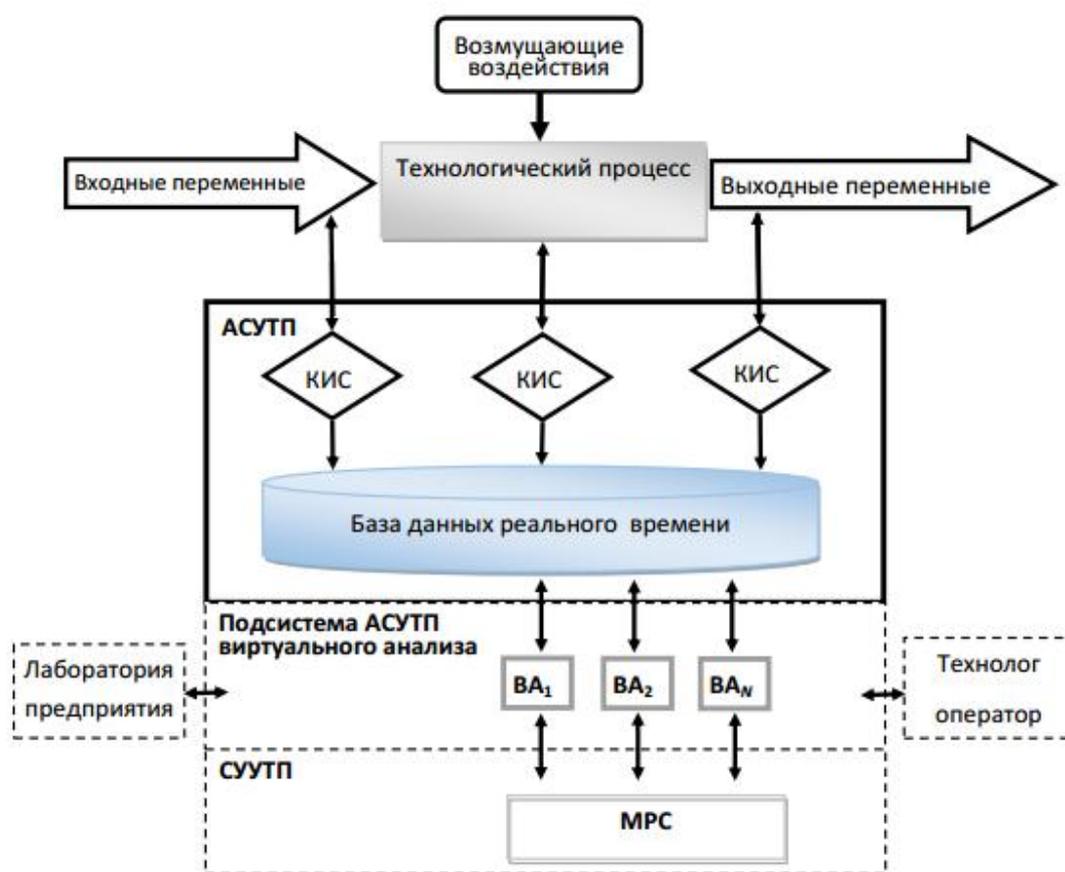


Рисунок 1 – Взаимодействие подсистемы АСУ ТП виртуального анализа с технологическим процессом, АСУ ТП и СУУ ТП (КИС – контрольно-измерительные средства; МРС – model predictive control)

ВА взаимодействуют с АСУ ТП технологической установки и с помощью СУУ ТП формируются оптимальные значения управляющих воздействий, что способствует повышению качества основных видов нефтепродуктов с минимальными энергетическими и экономическими затратами.

В связи с этим одной из основных тенденций развития СУУ ТП является распространение более совершенных технологий разработки и поддержки виртуальных анализаторов, использующих современные достижения прикладной статистики и робастного управления.

В первой главе описаны проблемы, связанные с построением прогнозирующих математических моделей для оценки показателей качества промышленных РК. Одной из основных задач при их разработке является определение структуры модели для нелинейных процессов. Подробно рассмотрены существующие подходы и методы предсказательного моделирования, а также приведен алгоритм АСЕ для объектов исследования.

Во второй главе предложен алгоритм для определения индекса структурной идентифицируемости объекта исследования, под которым понимается информативность входных переменных относительно выхода модели.

Исходной информацией для оценки индекса структурной идентифицируемости служат базовая матрица (матрица, сформированная из выборки, содержащей значения входных и выходной переменных), число M возмущенных матриц данных, получаемых из базовой матрицы путем добавления к ее элементам малых случайных чисел.

Шаг 1. Базовую матрицу преобразуем в расширенную матрицу данных размера $(K \times (n+2))$, включая в нее некоррелируемый с выходом дополнительный нормально распределенный вход ξ с параметрами $0;1$ ($\xi \in N(0, 1)$).

Шаг 2. Получаем базовый набор векторов оптимальных преобразований Φ по каждому входу исследуемого объекта, применяя алгоритм АСЕ к расширенной матрице данных,

$$\Phi_i^b(X_i) = (\Phi_i^{b,1}, \dots, \Phi_i^{b,j}, \dots, \Phi_i^{b,K})^T, \quad i = 1, \dots, n+2, \quad X_{n+1} = \xi, \quad X_{n+2} = Y, \quad (1)$$

и вектор разностей

$$\Delta\Phi_i^{b,k} = \Phi_i^{b,k+1} - \Phi_i^{b,k}, \quad (2)$$

в котором

$$\Delta\Phi_i^b = (\Delta\Phi_i^{b,1}, \dots, \Delta\Phi_i^{b,k}, \dots, \Delta\Phi_i^{b,K-1})^T, \quad k = 1, \dots, K-1 \quad (3)$$

Шаг 3. Из базовой матрицы формируем набор матриц размера $(K \times (n+2))$ для получения векторов оптимальных преобразований, используя возмущающие воздействия. Для этого к переменным $X_i, i = 1, 2, \dots, n, n+2$, добавляем малые случайные числа $\alpha_i^q = \varepsilon_i^q \in N(0,1), i = 1, 2, \dots, n, n+2, q = 1, \dots, M$.

Шаг 4. Находим множество векторов оптимальных преобразований и разностей:

$$\Phi_i^q(X_{\alpha,i}) = (\Phi_{\alpha,i}^{q,1}, \dots, \Phi_{\alpha,i}^{q,j}, \dots, \Phi_{\alpha,i}^{q,K})^T, \quad i = 1, \dots, n+2, \quad q = 1, \dots, M \quad (4)$$

$$\Delta\Phi_{\alpha,i}^q = (\Delta\Phi_{\alpha,i}^{q,1}, \dots, \Delta\Phi_{\alpha,i}^{q,k}, \dots, \Delta\Phi_{\alpha,i}^{q,K-1})^T, \quad (5)$$

где $X_{\alpha,i} = X_i + \alpha_i^q, \quad \alpha_{n+1}^q = 0, \quad \Delta\Phi_{\alpha,i}^{q,k} = \Phi_{\alpha,i}^{q,k+1} - \Phi_{\alpha,i}^{q,k}, \quad k = 1, \dots, K-1$.

Шаг 5. Преобразуем полученные векторы разностей (2) и (5) к виду

$$\Delta\tilde{\Phi}_i^b = (\Delta\tilde{\Phi}_i^{b,1}, \dots, \Delta\tilde{\Phi}_i^{b,k}, \dots, \Delta\tilde{\Phi}_i^{b,K-1})^T, \quad (6)$$

$$\Delta\tilde{\Phi}_i^q = (\Delta\tilde{\Phi}_i^{q,1}, \dots, \Delta\tilde{\Phi}_i^{q,k}, \dots, \Delta\tilde{\Phi}_i^{q,K-1})^T, \quad q = 1, \dots, M \quad (7)$$

где $\Delta\tilde{\Phi}_i^{b,k} = \Delta\Phi_{\alpha,i}^{b,k} / S_i^b, \quad \Delta\tilde{\Phi}_i^{q,k} = \Delta\Phi_{\alpha,i}^{q,k} / S_i^q,$

$$S_i^b = ((\Delta\Phi_{\alpha,i}^b - \overline{\Delta\Phi_{\alpha,i}^b})^2 / (K-2))^{1/2},$$

$$S_i^q = ((\Delta\Phi_{\alpha,i}^q - \overline{\Delta\Phi_{\alpha,i}^q})^2 / (K-2))^{1/2},$$

$$\overline{\Delta\Phi}_{\alpha,i}^b = \sum_{k=1}^{K-1} (\Delta\Phi_{\alpha,i}^{b,k}) / (K-1),$$

$$\overline{\Delta\Phi}_{\alpha,i}^q = \sum_{k=1}^{K-1} (\Delta\Phi_{\alpha,i}^{q,k}) / (K-1).$$

Шаг 6. Находим отклонения разностей (6) базовых оптимальных преобразований от разностей (7) для каждого $q = 1, \dots, M$:

$$\Delta V_i^{q,k} = \Delta\tilde{\Phi}_i^{b,k} - \Delta\tilde{\Phi}_i^{q,k}, \quad i = 1, \dots, n+2, \quad k = 1, \dots, K-1, \quad (8)$$

из которых формируем последовательность векторов

$$\Delta V_i^q = (\Delta V_i^{q,1}, \dots, \Delta V_i^{q,k}, \dots, \Delta V_i^{q,K-1})^T, \quad i = 1, \dots, n+2. \quad (9)$$

Шаг 7. Получаем количественную оценку отклонений ΔV_i^q из (9)

$$\Delta E_i^q = \sum_{k=1}^{K-1} |\Delta V_i^{q,k}|, \quad i = 1, \dots, n+2, \quad q = 1, \dots, M. \quad (10)$$

Шаг 8. Определяем показатель идентифицируемости по i -ой переменной

$$H_i = \Delta\tilde{E}_{n+1} / \Delta\tilde{E}_i, \quad i = 1, \dots, n+2 \quad (11)$$

где $\Delta\tilde{E}_i = \sum_{q=1}^M \Delta E_i^q / M$, а ΔE_i^q вычисляется по (10).

Шаг 9. Сравниваем полученные показатели идентифицируемости H_i из (11) с соответствующим пороговым значением H_p . Если $H_i > H_p$, то объект идентифицируем, в противном случае он не идентифицируем на основе предоставленных данных.

Заметим, что единой методики для определения порогового значения H_p не существует. При неизвестной структуре модели для его задания приходится учитывать особенности конкретных объектов или процессов и условия их функционирования. Вычислительные эксперименты показали, что точность показателя идентифицируемости H_i зависит от числа M возмущенных матриц, устанавливаемого опытным путем. Он рассчитывается для каждого набора данных, зависит от случайных возмущений, используемых в алгоритме АСЕ, а его окончательное значение находится усреднением полученных величин.

Предложенная методика иллюстрируется следующим примером. Пусть объект задается функциональной зависимостью вида:

$$Y = X_1^2 + \sin(3X_2) + (X_3 + 3) + \ln(X_4). \quad (12)$$

По уравнению (12) и входным переменным $X_i, i = 1, 2, 3, 4$, на которые наложены ограничения $-2.5 \leq X_1 \leq 2.5$, $0 \leq X_2 \leq 5$, $0 \leq X_3 \leq 1$, $0 < X_4 \leq 2$, формируется выборка объема $K = 1000$, представляющая собой матрицу размера $(K \times 5)$. Она преобразуется в расширенную выборку включением дополнительного некоррелированного с выходом Y входа X_5 с параметрами $0; 1$ ($X_5 \in N(0, 1)$). Анализ коэффициентов парной корреляции и корреляционных отношений, полученных по исходной выборке (таблица 1), не позволяет сделать вывод о возможной структуре модели. Применяя алгоритм АСЕ к расширенной выборке, формируем базовый набор векторов оптимальных преобразований $\Phi_i^b(X_{\alpha,i})$.

Таблица 1 – Коэффициенты корреляционных связей

Переменные	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
Корреляционные связи						
Коэффициенты парной корреляции	0.0507	-0.0042	0.2665	0.3866	0.0167	1.0000
Корреляционные отношения	0.7621	0.2703	0.3119	0.3982	0.1148	1.0000

Для оценки индекса структурной идентифицируемости выбрано $M = 20$, где M это количество итераций цикла, предназначенного для усреднения значений, итого получено 20 векторов оптимальных преобразований (рис.2).

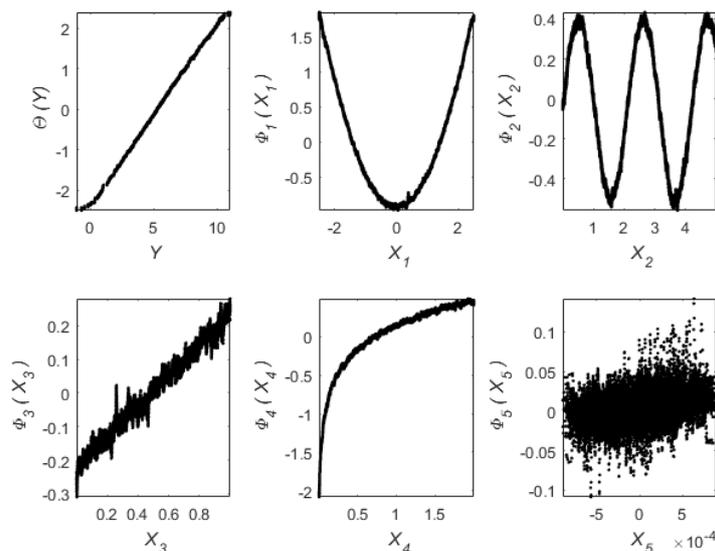


Рисунок 2 – Результат применения алгоритма ACE к сформированным матрицам данных

В таблице 2 представлены результаты оценки индекса структурной идентифицируемости, полученные с использованием предложенного подхода.

Таблица 2 – Оценка индекса структурной идентифицируемости

Параметр (i)	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
$\Delta \tilde{E}_i$	0,043	0,107	0,132	0,113	1,45	0,032
H_i	81,31	31,61	12,27	46,15	1,00	103,34

Значение $\Delta \tilde{E}_5 = 1,45$ для входа X_5 соответствует его неидентифицируемости. Остальные значения $\Delta \tilde{E}_i$ (средние суммы расстояний между точками базовой оценки модели от текущей оценки модели для выхода и каждого входа) полностью подтверждают существование нелинейной модели для исследуемого объекта и могут служить признаком его идентифицируемости. Величины H_i отражают вклад каждой переменной относительно неидентифицируемого дополнительного входа, при этом вход X_1 дает наибольший вклад в модель, вход X_3 – наименьший, и полученные результаты не противоречат описанию (12). Таким образом, объект идентифицируем, поскольку значение индекса структурной идентифицируемости для выхода

$H_Y = 103,34$, что значительно больше заданного порогового значения $H_p > 16$, которое определяется по алгоритму, приведенному ниже.

Алгоритм нахождения порогового значения индекса структурной идентифицируемости исследуемого технологического объекта.

Численный алгоритм определения порогового значения индекса структурной идентифицируемости в рамках задачи разработки ММОПК для подсистемы АСУТП промышленной РК включает следующие шаги.

Шаг 1. Формирование эталонной выборки данных заданного объема с учетом выбранной структуры модели.

Шаг 2. Вычисление индекса идентифицируемости по выходной переменной H_Y для эталонной выборки данных.

Шаг 3. Определение допустимых диапазонов изменения параметров, используемых в модели на основе существующих технологических регламентов.

Шаг 4. Преобразование эталонной выборки и определение по ней показателей идентифицируемости H_Y с учетом различных погрешностей, наложенных на исходную выборку данных, т.е. эмулируется неучтенное влияние на нее размером 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 % и т.д. от текущего значения.

Шаг 5. Выбор порогового значения H_p показателя идентифицируемости модели на основании полученных результатов.

Результаты расчета порогового значения индекса структурной идентифицируемости объекта (12) приведены на рисунке 3.

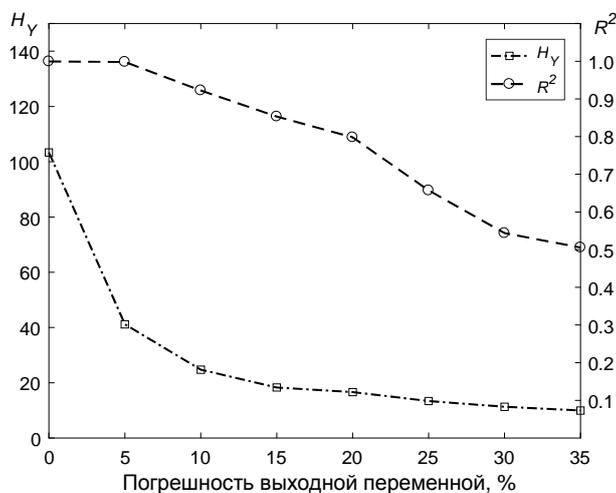


Рисунок 3 – Зависимость H_Y и R^2 от зашумленности синтетических данных

Из рисунка 3 можно сделать вывод, что при значении индекса структурной идентифицируемости $H_Y > 16$ для выбранного объекта исследования модель может быть адекватной.

Предложенный алгоритм нахождения H_p объекта исследования позволяет оценить процент неучтенной информации, содержащийся в исследуемой выборке данных. Такой подход к анализу данных позволяет на раннем этапе разработки ММОПК для подсистемы АСУТП оценить репрезентативность используемой выборки данных. В случае ее нерепрезентативности следует заменить входные переменные модели, которые имеют наименьшее значение индекса структурной

идентифицируемости, на более информативные. Это существенно упрощает процесс подбора входов в модель и формирование выборки данных для описания объекта исследования.

Дополнительным преимуществом предложенного подхода является возможность быстрой оценки используемой выборки данных на репрезентативность. Это существенно экономит время разработки адекватной математической модели.

В третьей главе приводится описание ректификационной колонны С-6 вторичной перегонки бензинов. Схема РК и процесс массообмена в ней представлены на рисунке 4.

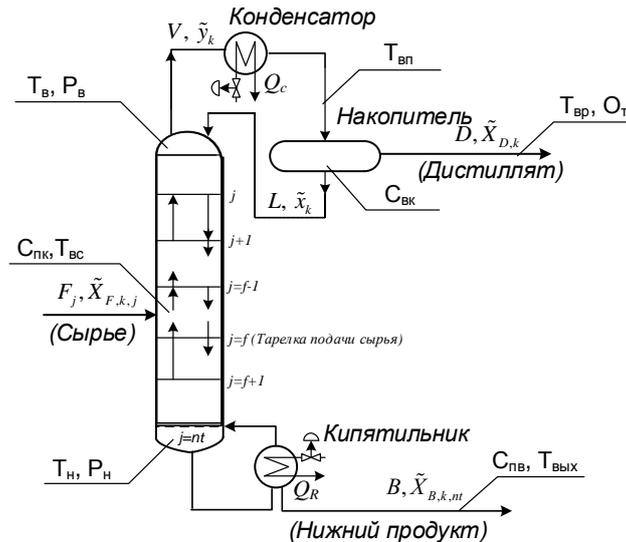
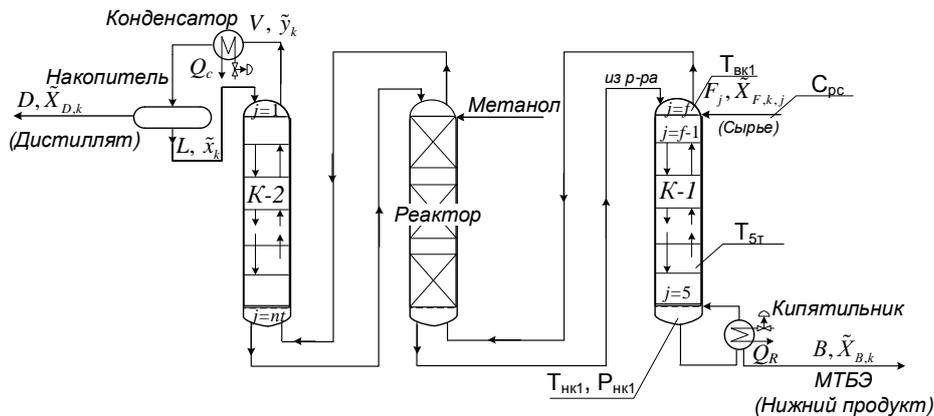


Рисунок 4 – Схематическое изображение ректификационной колонны С-6

Нестабильный бензин поступает в РК С-6. С верха колонны С-6 отходят пары пропан-бутановой фракции и сероводород (рефлюкс). Необходимо проводить оценку концентрации изо-пентана, а также содержание бензолобразующих компонентов в верхнем продукте (дистилляте).

Также представлена технологическая схема процесса производства высокооктановой добавки бензинов – метил-трет-бутилового эфира (рисунок 5).



К-1, К-2 – ректификационные колонны; MeOH – метанол; МТБЭ – метил-трет-бутиловый эфир

Рисунок 5 – Технологическая схема процесса производства МТБЭ

При осуществлении данного процесса особое внимание уделяется выбору соотношения изобутилен-метанол. Неправильно заданное количество метанола приводит к перерасходу исходного сырья, недополучению готовой продукции и

снижению ее качества. По окончании процесса выход МТБЭ должен составлять 98 %. Основным показателем качества данного процесса является содержание метанола в МТБЭ. Массовая доля метанола не должна превышать 1,5 % в товарном продукте МТБЭ по техническому регламенту.

Приводится калибровка аналитических моделей объектов исследования (подбор КПД по Мерффи, при котором достигается максимальное соответствие между экспериментальными данными и аналитической модели ТО). Применен метод определения порогового значения индекса структурной идентифицируемости массообменных технологических объектов, на основе использования их физико-химических закономерностей.

Результаты влияния погрешности измерения выходной переменной на величину индекса структурной идентифицируемости ММОПК для подсистемы АСУТП по концентрации изо-пентана и бензолообразующих в дистилляте РК С-6 вторичной перегонки бензинов приведены на рисунке 6а и 6б, соответственно.

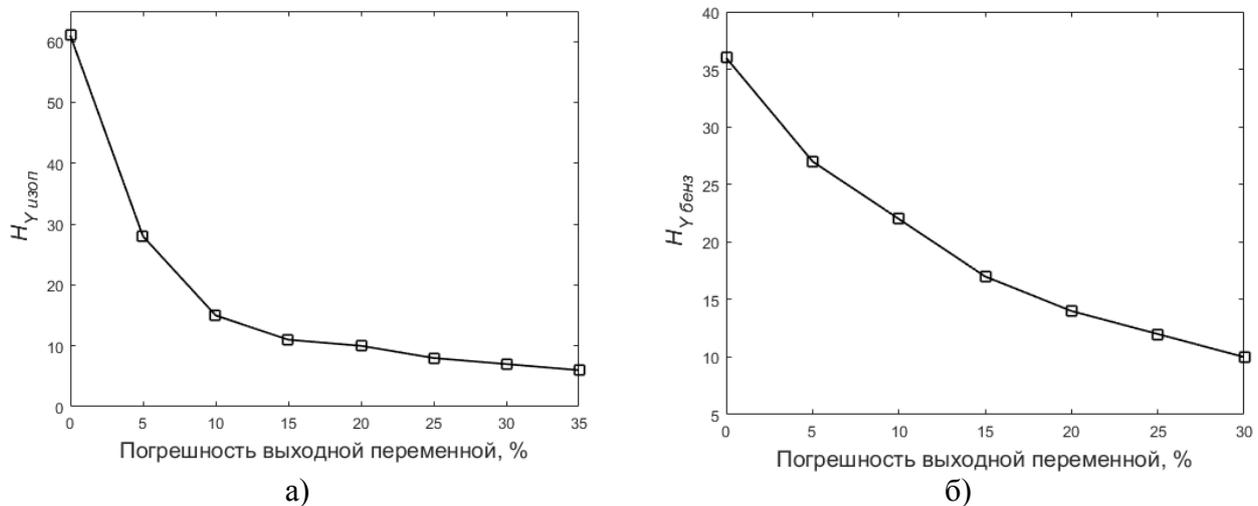


Рисунок 6 – Влияние погрешности измерения выхода на величину индекса структурной идентифицируемости: а) концентрации изопентана; б) концентрации бензолообразующих

Из рисунка 6 можно сделать вывод, что модель может быть адекватной в случае, если индекс структурной идентифицируемости для выбранного объекта исследования при $H_{Y_{изоп}} > 6$ и $H_{Y_{бенз}} > 10$, так при меньшем значении индекса структурной идентифицируемости, модель будет содержать более 25% неучтенной ошибки, что позволит построить адекватную математическую модель. Следовательно, пороговое значение индекса структурной идентифицируемости для построения ММОПК по концентрации изо-пентана и бензолообразующих в дистилляте РК С-6 составит $H_p = 6$ и $H_p = 10$, соответственно.

Пороговое значение индекса структурной идентифицируемости ММОПК по метанолу в выходном (нижнем) продукте РК К-1 процесса производства метил-трет-бутилового эфира $H_{p_{MeOH}}$ определялось на сформированной выборке данных откалиброванной аналитической модели процесса в интервале ошибки (%) $[0; 25]$ от среднего значения каждой входной переменной. Влияния погрешности измерения выходного значения на H_Y приведены на рисунке 7.

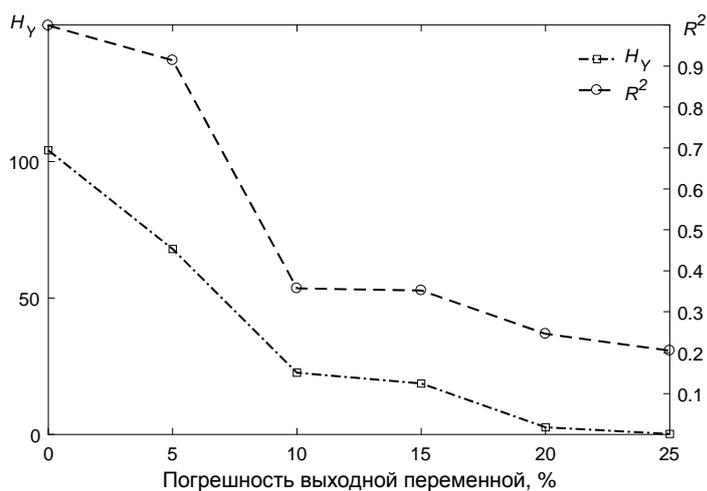


Рисунок 7 – Зависимость H_Y и R^2 от зашумленности данных аналитической модели

В данном случае $R^2 < 0,7$ тогда, когда зашумленность данных составляет около 10 %, что соответствует пороговому значению $H_{p \text{ MeOH}} = 22,65$.

Рассчитанные значения индекса структурной идентифицируемости при построении ММОКП по концентрации изо-пентана и бензолообразующих составили $H_{Y \text{ изоп}} = 10,59$ и $H_{Y \text{ бенз}} = 15,39$, соответственно, что превышает пороговые значения. При разработке ММОПК по метанолу в нижнем продукте РК К-1 значение индекса структурной идентифицируемости составило $H_Y = 68,14$. Объекты являются структурно-идентифицируемыми, так как их значения показателей индекса структурной идентифицируемости для выхода превышают их пороговые значения.

Алгоритм построения ММОПК на основе данных аналитической модели

В случае построения ММОПК для подсистемы АСУТП по концентрации изо-пентана в РК С-6 вторичной перегонки бензинов вход по давлению (X_m) почти не изменяется, поэтому параметр модели при нем будет статистически незначимым. Однако в реальных условиях возможны отклонения по давлению, которые оказывают существенное влияние на значение выхода. В таких случаях предлагается использовать алгоритм построения ММОПК с использованием априорных знаний, полученных с помощью аналитической модели МТП, который включает в себя следующие шаги:

Шаг 1. Формируется расширенная выборка путем увеличения диапазона изменчивости входа X_m с учетом его физико-химических свойств (с применением физико-химической модели для возможности расширения выборки).

Шаг 2. По полученной выборке строится модель $Y_m = f(X_m)$. Возможно построение модели с помощью полиномиальной аппроксимации, так как зачастую связь таких входов является нелинейной.

Шаг 3. Вычисляется корректирующая поправка, и в исходной выборке данных переменная Y преобразуется к виду $Y_d = Y - f(X_m)$.

Шаг 4. По полученной на шаге 3 выборке строится модель от $(m-1)$ переменных

$$\hat{Y}_d = a_0 + \sum_{i=1}^{m-1} a_i X_i.$$

Шаг 5. Определяется истинное значение выходной переменной: $\hat{Y}_M = \hat{Y}_d + f(X_m)$.

Скорректированная математическая модель с учетом априорных знаний о влиянии давления на качество выходного продукта для оценки концентрации изо-пентана в дистилляте РК С-6 имеет следующий вид:

$$Y_{изоп} = 108668,120 + 0,497 \cdot X_1 - 0,368 \cdot X_2 - 1724,243 \cdot X_3 - 1,123 \cdot X_4 - 2677,233 \cdot X_5 + 4,999 \cdot 10^{-3} \cdot X_2^2 + 854,206 \cdot X_3^2 + 22,238 \cdot X_5^2 - 139,679 \cdot X_3^3 - 6,156 \cdot 10^{-2} \cdot X_5^3.$$

Результаты применения алгоритма для построения математической модели для оценки концентрации изо-пентана в дистилляте РК С-6 без учета влияния давления и с учетом влияния давления на проверочной (тестовой) выборке приведены на рисунке 8а и 8б, соответственно.

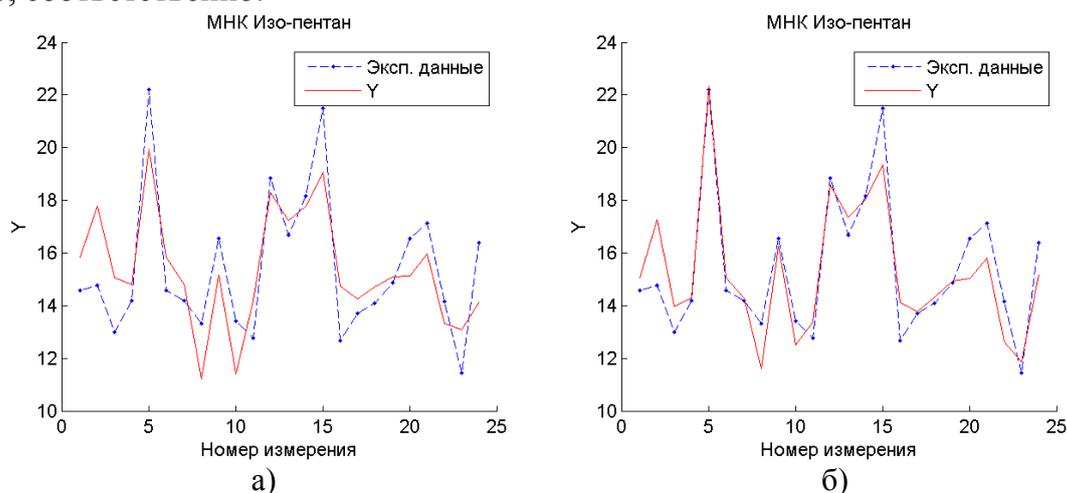


Рисунок 8 – Результат функционирования модели на проверочной выборке
а) без учета влияния давления б) с учетом влияния давления

В данной главе также представлен подход к построению адекватных математических моделей для оценки качества выходных продуктов с использованием нового подхода построения непараметрических моделей на основе алгоритма АСЕ:

Этап 1. Сформировать выборки данных для построения ММОПК.

Этап 2. Определить пороговое значение индекса структурной идентифицируемости (H_p) исследуемого объекта по алгоритму, описанному в главе 2.

Этап 3. Определить индекс структурной идентифицируемости (H_y) математической модели для оценки показателя качества выходного продукта по алгоритму, описанному в главе 2.

Если $H_y > H_p$, то переходим на этап 4, иначе переход к этапу 1.

Этап 4. По циклу выполнить для каждой строки выборки:

А) Взять текущую строку и временно вычеркнуть её из выборки данных;

Б) На основе оставшихся данных построить непараметрическую модель с помощью алгоритма АСЕ.

В) С помощью интерполяции построить кривые зависимостей $\phi_i(X_i)$ от X_i .

Затем интерполировать Y от $\theta(Y)$, где $\theta(Y) \approx \sum_{i=1}^p \phi_i(X_i)$.

Г) Для вычеркнутой строки рассчитать значение выхода Y на основе интерполированных кривых из пункта В) и значений входов исключенной строки из выборки (восстановление выходного значения модели).

Д) Сравнить рассчитанное значение Y со значением, известным из измерений, и вычислить критерий точности модели.

Подход построения математических моделей для оценки показателей качества выходных продуктов была протестирована на примере РК К-1 процесса производства МТБЭ. Математическая модель по концентрации метанола в нижнем продукте РК К-1 имеет следующий вид:

$$\hat{Y} = 551,78 - 9,95 \cdot X_1 + 0,05 \cdot X_1^2 + 369,01 \cdot X_2 + 77,24 \cdot X_2^2 - 3,51 \cdot X_1 X_2. \quad (13)$$

В таблице 3 представлены коэффициенты детерминации (R^2) и квадратного корня средней квадратической ошибки ($RMSE$) параметрических моделей, полученных методом наименьших квадратов (МНК), робастной регрессией (РР), модели (13) и непараметрической модели, построенной на основе алгоритма ACE для обучающей ($обуч$) и проверочной ($пров$) выборок.

Таблица 3 – Значения R^2 и $RMSE$ для представленных моделей.

Метод построения модели	$R^2_{обуч}$	$R^2_{пров}$	$RMSE_{обуч}$	$RMSE_{пров}$
Метод наименьших квадратов	0,7755	0,8767	0,1821	0,1365
Робастная регрессия	0,7646	0,8769	0,1864	0,1363
Проекция на скрытые структуры	0,7755	0,8767	0,1821	0,1365
Нейронная сеть с обратной связью	0,7857	0,8992	0,1780	0,1234
Модель, построенная на основе алгоритма ACE	0,9996	0,9820	0,0032	0,0521

Согласно результатам, представленным в таблице 3, очевидно, что наиболее точно описывает исследуемый МТО непараметрическая модель, построенная на основе алгоритма ACE, в сравнении с другими методами. Результаты функционирования непараметрической модели, построенной на основе алгоритма ACE, и экспериментальные данные приведены на рисунке 9.

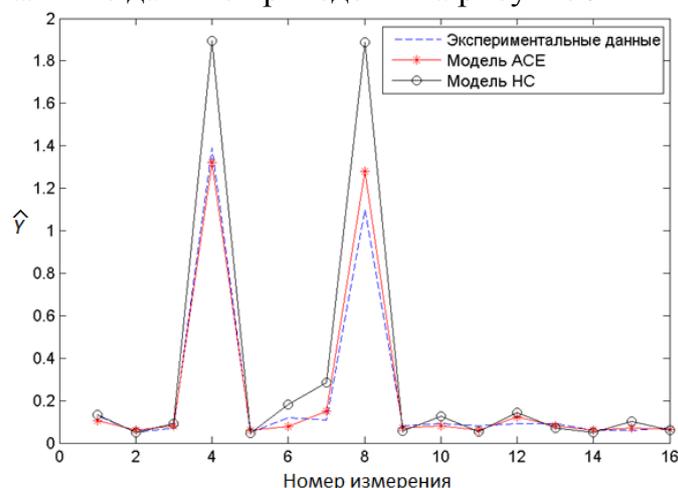


Рисунок 9 – Результаты функционирования непараметрической модели, построенной на основе алгоритма ACE, для оценки показателя качества выходного продукта на проверочной выборке

Из рисунка 9 видно, что использование непараметрической модели, построенной на основе алгоритма АСЕ, для оценки показателя качества выходного продукта на проверочной выборке позволяет достаточно точно описать исследуемый процесс.

Устойчивость модели (12) рассчитывали путем добавления случайной нормально распределенной ошибки $0 \leq \varepsilon \leq 1$ в обучающую выборку данных. Величина ошибки изменялась в диапазоне 0% до 20% относительно среднего значения соответствующей входной переменной. Для ММОПК, полученной на промышленных данных процесса производства МТБЭ, устойчивость анализировалась аналогичным способом. Ошибка имеет случайное нормальное распределенное значение в диапазоне $[-1; 1]$. Величина ошибки увеличивается от 0 % до 0,6 %. Результатом анализа устойчивости будет являться график зависимости рассчитанного R^2 от наложенной ошибки измерений. Графики зависимости рассчитанных значений R^2 от наложенной ошибки измерений представлены на рисунке 10а) и 10б).

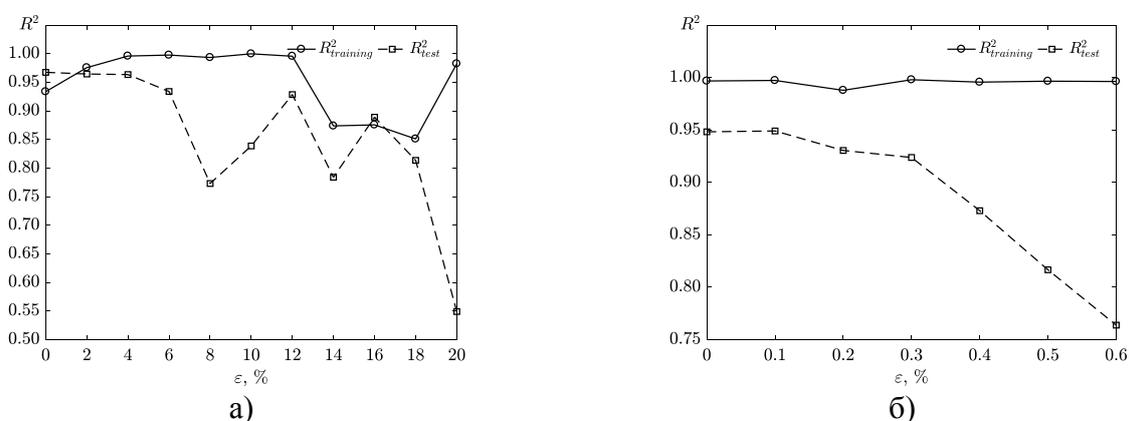


Рисунок 10 – Результаты анализа устойчивости моделей:
а) для модели (12); б) ММОПК процесса производства МТБЭ.

По представленным рисункам 10а) и 10б) можно сделать вывод: критерий точности ММОПК имеет устойчивую тенденцию к снижению при увеличении ошибки измерений.

В четвертой главе сформулирована постановка задачи разработки ММОПК в составе подсистемы АСУТП. Описаны основные функции и общая характеристика решения задачи на ЭВМ. Приведена блок-схема многоуровневой обработки выборки данных при построении ММОПК.

Уровень 1 – определение индекса структурной идентифицируемости ММОПК и порогового значения индекса структурной идентифицируемости. При положительном результате алгоритм переходит на 2й уровень, при отрицательном программа формирует отчет.

Уровень 2 – учет априорной информации. Если у исследователя нет дополнительных сведений о ТП, то этот уровень можно пропустить, если есть, то программа преобразует основную выборку с учетом априорных знаний о ТП.

Уровень 3 – определение структуры ММОПК для подсистемы АСУТП. Программа строит графики, отражающие функциональную взаимосвязь входной и выходной переменных с помощью алгоритма АСЕ, после чего каждый вход аппроксимируется квадратичными функциями. В результате формируется структура модели, равная сумме аппроксимированных кривых, а также рассчитывается «вес» для каждой входной переменной.

Уровень 4 – построение ММОПК. Данный уровень предназначен для определения параметров модели регрессионным методом с учетом замещения нелинейных входов на линейные путем преобразования с помощью подхода, описанного в главе 3.

Уровень 5 – построение итоговой ММОПК. На данном уровне происходит последнее преобразование данных в виде перехода от нелинейной структуры модели к линейной за счет замены переменных и расчет параметров модели любым из предложенных методов регрессионного анализа.

После выполненных преобразований программа создает формы отчетов о разработанном ВА с информацией:

- о виде конечной модели;
- о коэффициенте детерминации на обучающей выборке, на тестовой выборке;
- о параметре идентифицируемости;
- о пороге идентифицируемости;
- о текущем состоянии качества выходного продукта в режиме реального времени;
- о состоянии ТП, отклонениях от модели.

Для осуществления контроля и предотвращения аварийных ситуаций, возможных при сбоях работы сложного оборудования, предлагается механизм контроля, который основан на заранее определенном диапазоне значений коэффициента детерминации ММОПК для подсистемы АСУТП, сформированный исходя из технологических регламентов производства. То есть при условии полноценной работы всех систем РК математическая модель для оценки показателей качества выходных продуктов будет находиться в заданных интервалах коэффициента детерминации при онлайн мониторинге ТП. В случае выхода из строя какого-либо параметра, влияющего на ВА, система определит понижение коэффициента детерминации.

Такое оповещение позволит оперативно реагировать на сбои РК и своевременно устранять неполадки. Быстрая реакция операторов позволит сократить издержки производства некачественного продукта и т.д.

Данный многоуровневый алгоритм позволяет строить ММОПК для слабо формализованных технологических процессов, в частности процесса ректификации промышленных ТП.

В заключении перечислены основные полученные научные и практические результаты работы. В приложении к диссертации находятся акт внедрения и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие новые научные и практические результаты:

1. Разработан метод определения индекса структурной идентифицируемости массообменного технологического процесса при построении его модели, основанный на алгоритме АСЕ с использованием дополнительной входной переменной, некоррелируемой с выходом. Предложен метод определения порогового значения индекса структурной идентифицируемости массообменного технологического

процесса, разработанный на основе использования его физико-химических закономерностей.

2. Проведена оценка индекса структурной идентифицируемости H_y с учетом порогового значения H_p , которое определяется на основе аналитической модели МТП. Предлагаемый подход проиллюстрирован на синтетических данных и данных технологического процесса. При разработке ММОПК для подсистемы АСУТП по концентрации изо-пентана и бензолообразующих в дистилляте РК С-6 пороговые значения индекса структурной идентифицируемости составили $H_p = 6$ и $H_p = 10$, соответственно, и по концентрации метанола в кубовом продукте РК К-1 пороговое значение индекса структурной идентифицируемости составило $H_{p_{MeOH}} = 22,65$. Исследуемые объекты являются структурно-идентифицируемыми, так как значения показателей индексов идентифицируемости для выходных переменных проверочной выборки превышают их пороговые значения.

3. Предложена методика учета физико-химических закономерностей массообмена при построении математических моделей для оценки качества выходных продуктов промышленных РК. Использование предложенной методики позволило учесть влияние давления при построении ММОПК для оценки концентрации изопентана в дистилляте РК С-6 и повысить ее точность.

4. Предложен подход к построению математических моделей на основе экспериментальных данных, отличающийся применением алгоритма ACE как для анализа идентифицируемости, так и для определения структуры моделей подсистемы АСУТП виртуального анализа. Применение предложенного подхода при построении статистической модели для оценки концентрации метанола в кубовом продукте РК К-1 позволило повысить точность модели до 10 % R^2 в сравнении с моделью, полученной на основе нейронной сети.

Внедрение разработанного программного комплекса для построения ММОПК для подсистемы АСУТП позволит сократить время построения математических моделей для оценки показателей качества выходных продуктов. Программный комплекс протестирован на экспериментальных данных промышленной РК С-6. ВА, полученные с помощью разработанного программного комплекса, внедрены в АО «Газпромнефть-ОМПЗ».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, периодических изданиях, включенных в перечень ВАК при Министерстве образования и науки РФ:

1. Можаровский И.С., Использование алгоритма условных чередующихся математических ожиданий для построения математических моделей с целью оценки показателей качества выходных продуктов / И. С. Можаровский, С. А. Самотылова, Е.С. Баулин // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2021. – №2. – С. 51-70.
2. Можаровский И.С., Построение прогнозирующих моделей массообменного технологического процесса для оценки качества выходного продукта промышленной ректификационной колонны / И. С. Можаровский // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 6. – С. 93-95.
3. Идентификация моделей виртуальных анализаторов слабо формализованного объекта / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Вопросы современной науки и практики. – 2014. – № 4(54). – С. 46-52.
4. Можаровский, И. С. К проблеме идентифицируемости нелинейных объектов управления / И. С. Можаровский // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 44-50.
5. Метод разработки виртуальных анализаторов для нелинейных технологических объектов / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Информатика и системы управления. – 2013. – № 3(27). – С. 13-24.
6. Анализ идентифицируемости нелинейных объектов управления слабо формализованной структуры / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Информатика и системы управления. – 2012. – № 4(33). – С. 34-46.
7. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Информатика и системы управления. – 2011. – № 4(30). – С. 17-27.

Статьи в журналах и трудах международных конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science:

8. Mozharovsky, I. S. Predictive modeling of mass-transfer of plant using an algorithm of alternating conditional expectations / I. S. Mozharovsky, S. A. Samotylova, A. Yu. Torgashov // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2020. – Vol. 12, No. 6. – P. 915-925.
9. Evaluation of nonlinear inferential models to estimate the products quality of industrial distillation process / G. Digo, N. Digo, I. Mozharovskii, A. Torgashov // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2014. – № 19. – P. 1284-1289.
10. Analysis of identifiability of nonlinear plants with weakly formalized structure / G. Digo, N. Digo, I. Mozharovskii, A. Torgashov // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2013. – № 46(9). – P. 1224-1229.
11. Mozharovskii, I. S. The comparative study of virtual analyzers models for industrial distillation column / I. S. Mozharovskii, A. Yu Torgashov // Proceedings of 2012 International Conference on Modelling, Identification and Control, ICMIC. – 2012. – P. 544-549.

В научных сборниках и официальных изданиях:

12. Можаровский, И. С. Построение математических моделей для оценки показателей качества выходного продукта в условиях неопределенности / И. С. Можаровский, С. А. Самотылова // XXXIV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-34». – 2021. – Т. 1. – С. 74-78.

13. Можаровский, И. С. Сравнительный анализ непараметрических методов при построении моделей для оценки качества выходного продукта / И. С. Можаровский, С. А. Самотылова // XXXIII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-33». – 2020. – Т. 5. – С. 21-24.

14. Можаровский, И. С. Способ построения непараметрической модели на основе алгоритма асе / И. С. Можаровский // XXXII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-32». – 2019. – Т.9. – С. 39-43.

15. Можаровский, И. С. Применение алгоритма АСЕ для построения прогнозирующей модели ректификационной колонны / И. С. Можаровский, С. А. Самотылова, А. Ю. Торгашов // XXXI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-31». – 2018. – Т.3. – С. 123-126.

16. Проблемы построения моделей виртуальных анализаторов слабо формализованных технологических объектов / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // В сборнике: Идентификация систем и задачи управления: Труды X Международной конференции. Proceedings of the X International Conference. Труды X Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления". Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. – 2015. – С. 438-445.

17. Идентификация моделей виртуальных анализаторов слабо формализованного технологического объекта / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов. // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2014. – № 3(62). – С. 20-23.

18. Идентификация моделей массообменных технологических процессов при недостаточном объеме данных / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2013. – № 2. – С. 54-57.

19. Разработка моделей показателей качества ректификационных колонн, функционирующих в предельных режимах / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'12. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2012. – С. 211-221.

20. Можаровский, И. С. Исследование идентифицируемости нелинейных моделей объектов управления на примере массообменного технологического процесса / И. С. Можаровский // Труды международного симпозиума «Надежность и качество» Том 1, Россия, г. Пенза. – 2012. – Т. 1. – С. 44-47.

21. Исследование идентифицируемости нелинейных моделей неизвестной структуры / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // В сборнике: материалы конференции "Управление в технических, эргатических, организационных

и сетевых системах ". Под редакцией С.Н. Васильева, И.А. Каляева, Д.А. Новикова, Г.Г. Себрякова. – 2012. – С. 384-387.

22. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, И. С. Можаровский, А. Ю. Торгашов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 4. – С. 17.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

23. Можаровский И. С. Виртуальный анализатор // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615544 (дата регистрации 13.06.2013).

24. Можаровский И. С., Самотылова С. А. Программа для определения индекса структурной идентифицируемости объекта на основе алгоритма АСЕ и дополнительного не коррелируемого с выходом входа // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613404 (дата регистрации – 15.03.2019).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д-ру техн. наук А.Ю. Торгашову за ценные консультации, советы и идеи. Автор благодарит канд. техн. наук С. А. Самотылову – за помощь в редакторской работе, предоставлении некоторых расчетных данных и написании статей; Г. Б. Диго, Н. Б. Диго – за помощь в редактировании статей.