Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматики и процессов управления  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи

САМОТЫЛОВА СВЕТЛАНА АЛЕКСАНДРОВНА

**РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАССООБМЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО**

**ЭФИРА**

Специальность: 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (в промышленности)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д-р техн. наук, доцент Торгашов Андрей Юрьевич

Владивосток - 2020

**Оглавление**

Введение 5

1. [Обзор современных проблем построения систем управления](#bookmark14)

технологическими процессами 12

* 1. Назначение ВА в СУУ ТП 13
  2. [Обзор проблем построения СУУ ТП на основе виртуальных](#bookmark16)

анализаторов 16

* + 1. Проблема выбора входных переменных модели 19
    2. Проблема неточного времени отбора пробы 21
    3. Проблема выбросов данных 24
    4. Проблема коллинеарности данных 25
    5. Проблема нелинейности технологического процесса 28
    6. Проблема малой выборки данных 31
  1. [Разработка ВА для реакционно-ректификационных процессов 33](#bookmark27)
  2. [Постановка цели и задачи исследования 35](#bookmark29)
  3. Выводы по главе 1 36

1. [Описание объекта исследования и концепция разработки виртуальных](#bookmark31)

анализаторов 37

* 1. [Описание процесса производства метил-трет-бутилового эфира 37](#bookmark33)
  2. [Химические реакции процесса производства метил-трет-бутилового](#bookmark34)

[эфира 39](#bookmark36)

* 1. [Материальный баланс процесса производства метил-трет-бутилового](#bookmark37)

[эфира 41](#bookmark39)

* 1. [Концепция разработки моделей ВА для оценки показателя качества](#bookmark41)

[процесса производства МТБЭ 50](#bookmark43)

* + 1. Концепция разработки моделей ВА для оценки показателя качества производства МТБЭ в условиях неточного времени отбора пробы 50
    2. [Концепция разработки моделей ВА для оценки показателя](#bookmark45)

[качества производства МТБЭ в условиях малого объема](#bookmark45)

обучающей выборки 52

* 1. Выводы по главе 2 54

1. Идентификация реакционно-ректификационного технологического объекта производства МТБЭ в условиях неточного времени отбора пробы 55
   1. [Алгоритм разработки модели ВА при неточном времени отбора пробы 56](#bookmark51)
   2. [Определение параметров модели ВА при неточном времени отбора](#bookmark53)

[пробы на синтетическом примере 58](#bookmark55)

* 1. [Определение параметров модели ВА при неточном времени отбора](#bookmark57)

[пробы на экспериментальных данных 61](#bookmark59)

* + 1. [Определение параметров модели ВА для оценки содержания](#bookmark60)

метанола в МТБЭ 61

* + 1. [Определение параметров модели ВА для оценки содержания](#bookmark62)

2-метилпропан-2-ола в МТБЭ 65

* 1. [Использование прогнозирующего фильтра в контуре обратной связи... 69](#bookmark63)
  2. Выводы по главе 3 71

1. [Разработка алгоритма построения модели виртуального анализатора с](#bookmark76)

использованием аналитической модели технологического объекта 73

* 1. [Аналитическая модель ректификационной зоны реакционно­ректификационной колонны 74](#bookmark78)
  2. [Алгоритм доформирования обучающей выборки 78](#bookmark80)
  3. [Определение параметров модели ВА для производства МТБЭ в](#bookmark81)

условиях ограниченного объема обучающей выборки 79

* 1. [Целесообразность применения алгоритма доформирования](#bookmark87)

обучающей выборки 82

* 1. Выводы по главе 4 89

1. [Интеграция виртуальных анализаторов в составе систем](#bookmark91)

усовершенствованного управления технологическими процессами 90

* 1. [Настройка ПИД-регуляторов входящих в состав СУУ ТП 94](#bookmark93)
     1. Настройка ПИД-регулятора 96
  2. [Использование разработанных ВА в составе СУУ ТП процесса](#bookmark95)

производства МТБЭ 99

* 1. Выводы по главе 5 102

Заключение 103

Обозначения и сокращения 105

Термины и определения 111

Список литературы 113

Приложение А Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 130

Приложение Б Акт внедрения АО «Газпромнефть-ОНПЗ» 131

Приложение В Акт внедрения АО «Хоневелл» 132

Заключение

В работе получены следующие новые научные и практические результаты:

1. Предложен алгоритм для разработки модели виртуального анализатора при неточном времени отбора проб, основанный на Е и М шагах ЕМ- алгоритма совместно с гребневой регрессией для оценки параметров модели на М шаге и бутстреп анализа для формирования нескольких начальных значений параметров модели на основе бутстреп выборок. Применение предлагаемого алгоритма для определения временной задержки отбора пробы позволил улучшить точность оценки показателя качества метанола и трет-бутанола (2- метилпропан-2-ола) в нижнем (выходном) продукте до 17 % и 5,5 % RMSE на проверочной выборке в сравнении с методом без учета задержки.
2. Показана возможность включения в модель ВА контура обратной связи, что позволило улучшить точность модели. RMSE модели с обратной связью, вычисленная на проверочной выборке, оказалась на 8 % меньше, чем RMSE модели без обратной связи.
3. Предложен алгоритм доформирования обучающего набора данных для разработки модели ВА в условиях малого объема обучающей выборки. Доформирование происходит посредством добавления в исходную ОВ данных вспомогательной выборки, полученных на откалиброванной аналитической модели ТО. Использование доформированной обучающей выборки позволяет учитывать данные технологического режима на всем диапазоне изменения качества продукта.
4. На примере построения модели ВА по содержанию МеОН в МТБЭ, показано, что применение предложенного алгоритма доформирования ОВ

целесообразно при ЛЕ1 < 0,3 и ЛЕ2 < 0,1. Достаточной для доформирования обучающей выборки является площадь области пересечения выборок S = 0,2 при

условии, что ЛЕ1 < 0,3 . При ЛЕ2 < 0,1 наблюдается увеличение S до 1. Это связано с тем, что в ДОВ попадают значения, которые не встречаются в реальных условиях. В сравнении с бутстреп анализом предложенный алгоритм позволяет повысить точность модели до 40 % RMSE на проверочной выборке.

Использование возможностей СУУ ТП позволяет более точно подавать на синтез требуемое количество метанола. При одинаковых средних составах сырья по изобутилену (~14 %) достигнуто снижение потребления метанола на 2,4 % в отчетном периоде. Создан запас по качеству, обеспечивающий получение МТБЭ марки А