

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 004.021:004.942

**Акиншева Ирина Владиславовна**

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕАКТОРАМИ  
ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ  
ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)

Минск 2011

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель

**КУЗЬМИЦКИЙ Иосиф Фелицианович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехника учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

**КУЛАКОВ Геннадий Тихонович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тепловые электрические станции учреждения образования «Белорусский национальный технический университет»

**ЛУКЪЯНЕЦ Степан Валерьянович**, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры систем управления учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Опонирующая организация

Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-российский университет»

Защита состоится «25» октября 2012 г. в 14.00 ч на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время автоматическое управление как процессами, так и отдельными аппаратами применяется в различных отраслях промышленности. Это продиктовано, прежде всего, все более повышающимися требованиями к качеству выпускаемой продукции, а также к условиям труда производственных рабочих. Чтобы осуществить на практике управление процессом, разрабатываются и внедряются в производство системы управления. Они могут представлять собой целые комплексы, реализующие ведение процессов на всех иерархических уровнях управления.

В процессах химической промышленности свойства компонентов являются критическими и реакторы должны работать при условиях, которые на выходе дают продукты, удовлетворяющие относительно узким требованиям спецификаций. Одним из таких процессов является процесс получения полиэтилентерефталата (ПЭТФ), который описывается нелинейной математической моделью. Он разделен на две основные стадии: перэтерификации и поликонденсации. Поликонденсация является заключительным этапом в производстве ПЭТФ. Поэтому важной производственной задачей является поддержание оптимальных значений параметров процесса и контроль качества ПЭТФ на стадии поликонденсации. При изменении производительности установки, ввиду изменения спроса на продукцию, необходимо настраивать систему управления процессом, что приводит к увеличению затрат как на трудовые, так и на энергетические ресурсы.

Таким образом, актуальным является построение системы управления процессом поликонденсации с целью снижения затрат на энергоресурсы и повышения качества ПЭТФ.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Государственной комплексной программой научных исследований «Механика» (задание 3.2.31), включенной в План важнейших научно-исследовательских работ в области естественных, технических, гуманитарных и социальных наук Республики Беларусь на 2006–2010 гг., утвержденный постановлением президиума НАН Беларуси № 20 от 24.02.2006 г., в рамках которой автором проводились исследования на кафедре автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» по госбюджетной научно-исследовательской работе ГБ № 26-141

«Разработка методов анализа, синтеза, алгоритмов программного обеспечения и создание высокоэффективных систем автоматизации на основе современных информационных технологий и программно-аппаратных комплексов» (2006–2010 гг.), а также на кафедре автоматизации технологических процессов и производств учреждения образования «Могилевский государственный университет продовольствия» в рамках этапов ХД № 2007-01 МГУП «Разработка оптимизированной математической модели синтеза полиэтилентерефталата в химическом цехе Завода органического синтеза» и госбюджетной научно-исследовательской работы ГБ № 36-16 «Разработка и исследование математических моделей ресурсосбережения в системах автоматизации пищевой и химической промышленности» (2010–2014 гг.).

#### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационного исследования является сокращение затрат на энергоресурсы и повышение качества полиэтилентерефталата за счет построения автоматизированной адаптивной системы управления процессом поликонденсации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель процесса поликонденсации, отражающую динамические свойства исследуемого объекта;
- разработать алгоритм оптимизации процесса поликонденсации;
- разработать алгоритм определения области устойчивости аппроксимированных функциональными рядами динамических характеристик;
- разработать адаптивную систему управления процессом поликонденсации.

Объектом исследования является процесс поликонденсации. Предмет исследования – способы адаптивного управления процессом поликонденсации.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель динамики процесса поликонденсации, включающая как кинетику процесса, так и идентификацию динамических характеристик, аппроксимация которых производится интегральными рядами Вольтера второго порядка с применением методики регуляризации, за счет которой достигается высокая точность идентификации выходных параметров процесса поликонденсации, что позволяет впервые исследовать процесс поликонденсации с учетом его нелинейных свойств.

2. Методика оптимизации процесса поликонденсации, позволяющая определить аналитическую зависимость оптимальных законов управления процессом поликонденсации от изменения выходных переменных.

3. Методика определения асимптотической устойчивости динамических характеристик процесса поликонденсации, аппроксимированных функциональными рядами выбранной структуры, которая позволяет определить диапазон задания динамических характеристик процесса.

4. Адаптивная система управления процессом поликонденсации, включающая алгоритмы реализации математической модели кинетики процесса, идентификации, оптимизации и вычисления концентрации карбоксильных

групп в полиэтилентерефталате, позволяющая улучшить качество получаемого полимера и управления процессом.

**Личный вклад соискателя** заключается в анализе кинетики химических процессов, протекающих в реакторах поликонденсации, разработке методики проведения активного эксперимента на ОАО «Могилевхимволокно», обсуждении и обработке полученных экспериментальных данных, разработке математической модели процесса, составлении оптимального критерия качества системы и алгоритма вычисления концентрации карбоксильных групп в ПЭТФ, создании программного обеспечения для реализации системы управления процессом поликонденсации, а также в формулировке теоретических выводов о проведенных исследованиях. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

#### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: V-я Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2007); 72-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2008); 73-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2009); VII-я Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2009); Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, 2009); 74-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2010); VIII-я Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2010); V-я научно-практическая конференция с международным участием «Математическое и имитационное моделирование систем МОДС'2010» (Чернигов, 2010); 75-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2011); IX-я Международная научно-техническая конференция «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 2011); Международная научно-техническая конференция «Системный анализ и информационные технологии SAIT 2011» (Киев, 2011); Международная научная конференция «Информационные технологии и системы» (БГУИР, Минск, 2011); Международная научно-практическая конференция-семинар «Перспективы технологии и оборудование для производства и переработки волокнистых и пленочных материалов «Волокна и пленки»» (Могилев, 2011).

#### **Опубликованность результатов диссертации**

По тематике представленной диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, из них 7 статей в республиканских и международных научных журналах, материалы 2 докладов на научно-практических конференциях и тезисы 9 докладов на научно-технических конференциях. Результаты работы включены в 3

отчета о НИР.

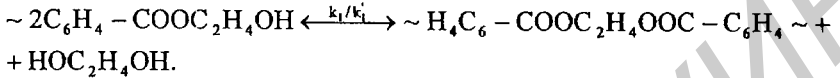
Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,77 авторских листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. В первой главе описан процесс производства ПЭТФ, представлен механизм реакций, протекающих в реакторах предварительной (ППК) и основной поликонденсации (ОПК), проведен обзор существующих систем автоматизации процесса получения ПЭТФ, выявлены их достоинства и недостатки. Из процесса получения ПЭТФ как наиболее значимая выделена стадия поликонденсации. При исследовании стадии поликонденсации как объекта управления выделены основные каналы управления. Кроме того, описаны качественные характеристики ПЭТФ и методы их определения. Рассмотрены способы построения математической модели динамики и оптимизации процесса поликонденсации. На основе проведенного обзора систем управления предложено использовать адаптивную систему управления процессом поликонденсации. Во второй главе описана математическая модель кинетики процесса поликонденсации, предложена методика проведения эксперимента по снятию динамических характеристик процесса, механизмы идентификации динамических характеристик процесса, аппроксимированных рядами Вольтерра второго порядка, и регуляризации параметров аппроксимации математической модели. Путем сравнения степени полимеризации и вязкости ПЭТФ найдена взаимосвязь между кинетикой и идентификацией динамических характеристик процесса поликонденсации. В третьей главе представлен механизм определения оптимальных управляющих переменных процесса поликонденсации, в результате аппроксимации которых получены аналитические зависимости законов оптимального управления. Также представлена процедура определения области асимптотической устойчивости идентифицированных динамических характеристик. В четвертой главе описан процесс синтеза адаптивной системы управления процессом поликонденсации, обоснована необходимость включения в систему управления алгоритма, реализующего вычисление концентрации карбоксильных групп в полимере, с целью повышения его качества, программная реализация и оценка эффективности внедрения системы управления процессом поликонденсации. В приложении приведены результаты опытов по снятию динамических характеристик объекта управления, текст программы определения параметров математической модели процесса поликонденсации, текст программы интерполяции управляющих переменных процесса поликонденсации, акты внедрения результатов диссертационной работы.

Полный объем диссертации составляет 150 страниц, в том числе 56 рисунков на 25 страницах, библиографический список из 134 наименований на 14 страницах, 8 приложений на 30 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе подробно описан процесс производства полиэтилентерефталата. Выделена стадия поликонденсации как наиболее существенная в процессе получения полимера. Представлены реакции, протекающие в аппаратах процесса, в том числе и реакция поликонденсации:



Наряду с другими сопутствующими реакциями, реакция поликонденсации протекает в реакторах ППК и ОПК.

Произведен обзор существующих систем управления процессом поликонденсации, на основании которого выявлено, что существующая система управления не обеспечивает энергосберегающего режима ведения технологического процесса, что требует системного анализа и разработки новой системы управления. Реакторы поликонденсации представлены в виде системы, для описания которой были выделены следующие параметры.

Входными параметрами реактора ППК являются: количество поступающего дигликольтерефталата (ДГТ)  $Q_0(t)$ , степень полимеризации расплава  $DP_0(t)$ , вязкость поступающего ДГТ  $v_0(t)$ ; количество полученного полимера  $Q_1(t)$ , вязкость полученного полимера  $v_1(t)$ , степень полимеризации полиэтилентерефталата (ПЭТФ)  $DP_1(t)$ ; управляющими воздействиями – температура реакции  $T_1(t)$  и давление в реакторе ППК  $P_1(t)$ .

Входными параметрами реактора ОПК являются выходные переменные реактора ППК; выходными переменными – степень полимеризации ПЭТФ  $DP_2(t)$ , количество полученного ПЭТФ  $Q_2(t)$ , вязкость ПЭТФ  $v_2(t)$ ; управляющими воздействиями – температура реакции  $T_2(t)$  и давление в реакторе ОПК  $P_2(t)$ .

Структурная схема, наглядно поясняющая вышесказанное, представлена на рисунке 1.

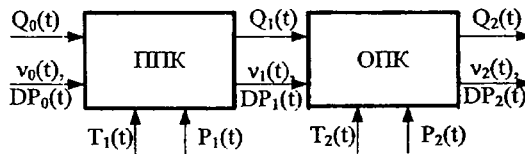


Рисунок 1 – Схема распределения переменных процесса поликонденсации

Наряду с вязкостью качественной характеристикой полимера является степень полимеризации  $DP(t)$ . Данная переменная также является динамической характеристикой процесса и зависит от концентрации продуктов реакций,

образующихся в реакторах ППК и ОПК. Установлена необходимость разработки новых способов автоматического измерения состава полимера – концентрации образующихся побочных групп.

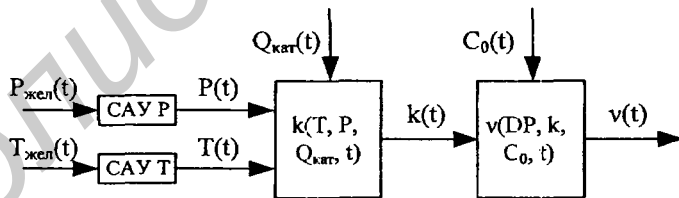
Процесс поликонденсации является многосвязным объектом, имеющим сложную по своей аналитической форме математическую модель. Анализ кинетических зависимостей показал, что они не отражают в полном объеме динамику происходящих процессов. Существует необходимость в идентификации динамических характеристик процесса поликонденсации.

Во второй главе описано моделирование процессов, происходящих внутри реакторов поликонденсации, приведен механизм определения концентраций веществ, полученных в ходе реакций, протекающих в реакторах совместно с реакцией поликонденсации. По концентрациям веществ в расплаве полимера можно судить о степени полимеризации  $DP(t)$  ПЭТФ

$$DP(t) = \left( \frac{(C_{Eg}(t) + C_{Ea}(t) + C_{Ev}(t) + C_{EPEO}(t) + 2C_z(t))_{\text{выход}}}{(C_{Eg}(t) + C_{Ea}(t) + C_{Ev}(t) + C_{EPEO}(t))_{\text{кход}}} \right), \quad (1)$$

где  $t$  – время пребывания ПЭТФ в реакторах поликонденсации;  $C_{Eg}(t)$ ,  $C_{Ea}(t)$ ,  $C_{Ev}(t)$ ,  $C_z(t)$  – концентрации гидроксильных, карбоксильных, винильных, диэфирных концевых групп, соответственно;  $C_{EPEO}(t)$  – концентрация диэтиленгликоля в расплаве полимера.

Для вычисления  $DP(t)$ , согласно (1), необходимо измерить концентрации веществ в расплаве, что является сложной задачей. Непосредственно в ходе технологического процесса измеряется вязкость полимера. Степень полимеризации влияет на вязкость ПЭТФ. Структурная схема определения вязкости полимера представлена на рисунке 2.



$P(t)$  – давление в реакторах поликонденсации;  $T(t)$  – температура в реакторах поликонденсации;  $P_{\text{жел}}(t)$  – заданные значения давления в реакторах поликонденсации;  $T_{\text{жел}}(t)$  – заданные значения температуры в реакторах поликонденсации; САУ P, САУ T – составляющие системы управления, выполненной на локальных средствах автоматизации, содержащие программы управления температурой и давлением в реакторах поликонденсации;  $Q_{\text{кат}}(t)$  – расход катализатора в процессе;  $k(T, P, Q_{\text{кат}}, t)$  – константы скорости реакций;  $C_0(t)$  – начальные концентрации продуктов реакций;  $v(DP, k, C_0, t)$  – вязкость ПЭТФ

Рисунок 2 – Структурная схема определения вязкости ПЭТФ



В последнем блоке схемы константы скорости реакций  $k_i$  и начальные значения концентраций продуктов реакций  $C_0(t)$  входят в выражение для определения степени полимеризации.

Установлена следующая взаимосвязь:

$$v(t) = \alpha DP(t), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент соотношения степени полимеризации и вязкости ПЭТФ.

Для определения коэффициента соотношения  $\alpha$  необходимо иметь функциональную зависимость не только для степени полимеризации (1), но и вязкости. Разработана методика снятия динамических характеристик. Основными параметрами, влияющими на вязкость полимера, являются температура и давление внутри реакторов. Изменение температуры происходит за счет изменения расхода теплоносителя в рубашках аппаратов. Изменение давления происходит за счет изменения расхода азота, требуемого для конденсации паров этиленгликоля, отгоняемого из реакторов.

После снятия динамических характеристик возникает задача идентификации, решение которой заключается в предварительной аппроксимации весовой функции объекта  $h(t)$  и последующем определении коэффициентов и показателей степеней по результатам наблюдений за входными и выходными сигналами:

$$h(t) = \int_0^t A_i \varphi_i(t) dt, \quad (3)$$

где  $\varphi_i(t)$  – некоторая функция, отражающая динамические свойства объекта и абсолютно интегрируемая на исследуемом интервале времени;  $A_i$  – коэффициенты аппроксимации.

Для достижения требуемой степени точности идентификации приняты специальные меры для регуляризации решения. За оценку точности идентификации принята относительная дисперсия ошибки, задаваемая соотношением:

$$\delta = \frac{\int_0^T (y_i(t) - y_i^*(t))^2 dt}{\int_0^T y_i(t)^2 dt}, \quad (4)$$

где  $T$  – время проведения эксперимента;  $y_i(t)$  – выходные переменные реакторов ППК и ОПК.

Функция  $\varphi(t)$  представлена в виде весовой функции аperiодического звена второго порядка. В данном случае модель объекта имеет следующий вид:

$$v_1(t) = v_0(t) + A_1 \int_0^t (e^{-p_1 \tau_1} - e^{-p_2 \tau_1}) T_1(t - \tau_1) d\tau_1 + A_2 \int_0^t (e^{-p_1 \tau_2} - e^{-p_4 \tau_2}) \times \\ \times P_1(t - \tau_2) d\tau_2 + A_3 \int_0^t \int_0^t (e^{-p_3 \tau_1} - e^{-p_6 \tau_1})(e^{-p_1 \tau_2} - e^{-p_2 \tau_2}) T_1(t - \tau_1) P_1(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad (5)$$

$$Q_1(t) = Q_0(t) + A_4 \int_0^t (e^{-p_3 \tau_1} - e^{-p_6 \tau_1}) T_1(t - \tau_1) d\tau_1 - A_5 \int_0^t (e^{-p_1 \tau_2} - e^{-p_2 \tau_2}) P_1(t - \tau_2) d\tau_2 + \\ + A_6 \int_0^t (e^{-p_3 \tau_3} - e^{-p_4 \tau_3}) v_1(t - \tau_3) d\tau_3 + A_7 \int_0^t \int_0^t (e^{-p_3 \tau_1} - e^{-p_6 \tau_1}) T_1(t - \tau_1) (e^{-p_1 \tau_2} - e^{-p_2 \tau_2}) \times \\ \times P_1(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + A_8 \int_0^t \int_0^t (e^{-p_3 \tau_1} - e^{-p_6 \tau_1}) T_1(t - \tau_1) (e^{-p_1 \tau_3} - e^{-p_2 \tau_3}) v_1(t - \tau_3) d\tau_1 d\tau_3 + \\ + A_9 \int_0^t \int_0^t (e^{-p_1 \tau_2} - e^{-p_2 \tau_2}) P_1(t - \tau_2) (e^{-p_3 \tau_3} - e^{-p_4 \tau_3}) v_1(t - \tau_3) d\tau_2 d\tau_3, \quad (6)$$

$$v_2(t) = v_1(t) + A_{10} \int_0^t (e^{-p_7 \tau_4} - e^{-p_8 \tau_4}) T_2(t - \tau_4) d\tau_4 + A_{11} \int_0^t (e^{-p_3 \tau_5} - e^{-p_6 \tau_5}) \times \\ \times P_2(t - \tau_5) d\tau_5 + A_{12} \int_0^t \int_0^t (e^{-p_3 \tau_4} - e^{-p_6 \tau_4}) T_2(t - \tau_4) (e^{-p_1 \tau_5} - e^{-p_2 \tau_5}) P_2(t - \tau_5) d\tau_4 d\tau_5, \quad (7)$$

$$Q_2(t) = Q_1(t) + A_{13} \int_0^t (e^{-p_3 \tau_4} - e^{-p_6 \tau_4}) T_2(t - \tau_4) d\tau_4 + A_{14} \int_0^t (e^{-p_1 \tau_5} - e^{-p_2 \tau_5}) P_2(t - \tau_5) d\tau_5 + \\ + A_{15} \int_0^t (e^{-p_3 \tau_6} - e^{-p_4 \tau_6}) v_2(t - \tau_6) d\tau_6 + A_{16} \int_0^t \int_0^t (e^{-p_3 \tau_4} - e^{-p_6 \tau_4}) T_2(t - \tau_4) (e^{-p_1 \tau_5} - e^{-p_2 \tau_5}) \times \\ \times P_2(t - \tau_5) d\tau_4 d\tau_5 + A_{17} \int_0^t \int_0^t (e^{-p_3 \tau_4} - e^{-p_6 \tau_4}) T_2(t - \tau_4) (e^{-p_1 \tau_6} - e^{-p_2 \tau_6}) v_2(t - \tau_6) d\tau_4 d\tau_6 + \\ + A_{18} \int_0^t \int_0^t (e^{-p_1 \tau_5} - e^{-p_2 \tau_5}) P_2(t - \tau_5) (e^{-p_3 \tau_6} - e^{-p_4 \tau_6}) v_2(t - \tau_6) d\tau_5 d\tau_6, \quad (8)$$

где  $t$  – время пребывания ПЭТФ в реакторах поликонденсации;  $p_n$  – показатели степени при экспонентах в аperiodических звеньях второго порядка;  $A_i$  – коэффициенты аппроксимации;  $\tau_i$  – сдвиг по времени.

При аппроксимации динамических характеристик выражениями (5)–(8) величина относительной дисперсии ошибки являлась недопустимой для производственного процесса. Поэтому проведена регуляризация параметров модели, в качестве которых приняты коэффициенты  $A_i$ . Для каждого коэффициента, составлена система, включающая корреляционные функции переменных процесса

$$R_{ym}(0) = \sum_{i=1}^N A_i R_{im}(0), \quad m = 1, \dots, N, \quad (9)$$

где

$$R_{ym}(0) = M\{v(t), Q(t), z^n(t)\}, \quad (10)$$

$$R_{in}(0) = M\{z^n(t), z^{n+1}(t)\}, \quad (11)$$

$$z^n(t) = \int_0^t \varphi_n(t) I_i(t) dt. \quad (12)$$

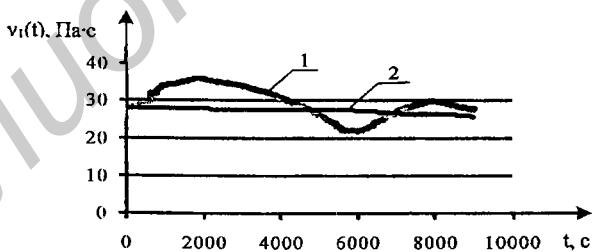
Здесь  $M\{\cdot\}$  – математическое ожидание переменных процесса;  $z^n(t)$  – реакция динамического элемента, реализующего  $n$ -ю аппроксимирующую функцию на рабочий входной сигнал;  $N$  – количество переменных процесса, входящих в выражение аппроксимации.

Решая (9), получим систему линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов  $A_i$ . Систему составим для выражения (5) – аппроксимации вязкости ПЭТФ в реакторе ППК. При этом учтем, что параметры ядер Вольтерра первого и второго порядков вычисляются независимо, поэтому запишем:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{2} M\{v_1(t), z^1(t)\} - M\{v_1(t)\}, \\ A_2 = \frac{1}{2} M\{v_1(t), z^2(t)\} - M\{v_1(t)\}, \\ A_3 = M\{v_1(t), z^3(t), z^4(t)\}. \end{cases} \quad (13)$$

На основании вышеизложенного, проведем идентификацию выходной характеристики (вязкости) для реактора предварительной поликонденсации.

На рисунке 3 представлены графики изменения выходной переменной процесса поликонденсации при внесении в систему возмущений.



1 – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный в результате проведения эксперимента; 2 – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный на основе выражения аппроксимации (5) с применением алгоритма регуляризации

**Рисунок 3 – Графики изменения вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации**

Аналогичные вычисления были применены для остальных коэффициентов модели. Таким образом, решена задача поиска функциональной зависимости вязкости полимера от управляющих переменных. Так как известны значения вышеуказанного параметра в каждой точке временного отрезка, равного времени пребывания расплава в реакторах ППК и ОПК, то можно определить среднее значение коэффициента соотношения степени полимеризации и вязкости ПЭТФ –  $\alpha_{ср}$ .

В третьей главе разработана методика определения оптимальных значений температуры и давления в реакторах ППК и ОПК.

Задача оптимального управления процессом поликонденсации, задаваемого уравнениями (5)–(8), сформулирована как задача минимизации обобщенного интегрального квадратичного критерия:

$$I(t) = \int_0^T \Psi(t) (\alpha(v_1(t) - v_1^*(t))^2 + \beta(v_2(t) - v_2^*(t))^2 + \chi(Q_1(t) - Q_1^*(t))^2 + \gamma(Q_2(t) - Q_2^*(t))^2 + \psi(DP(t) - DP^*(t))^2 + \eta(T_1(t) - T_1^*(t))^2 + \lambda(P_1(t) - P_1^*(t))^2 + \mu(T_2(t) - T_2^*(t))^2 + \pi(P_2(t) - P_2^*(t))^2 - \theta(\dot{T}_1(t) - \dot{T}_1^*(t))^2 + \rho(\dot{P}_1(t) - \dot{P}_1^*(t))^2 + \sigma(\dot{T}_2(t) - \dot{T}_2^*(t))^2 + \xi(\dot{P}_2(t) - \dot{P}_2^*(t))^2) dt, \quad (14)$$

где  $\Psi(t)$  – сглаживающая функция;  $\alpha, \beta, \chi, \gamma, \psi, \eta, \lambda, \mu, \pi, \theta, \rho, \sigma, \xi$  – весовые коэффициенты в критерии оптимального управления.

При применении в качестве критерия оптимизации функции ошибок остается открытым вопрос о выборе значений весовых коэффициентов, входящих в функцию ошибок, для задачи синтеза системы управления.

Из процедуры нормализации следует, что критерий оптимального управления зависит также от отношения весовых коэффициентов. Без потери общности один из коэффициентов принимается равным единице.

Для нахождения оптимальных значений управляющих переменных использовалась теория вариационного исчисления.

Подынтегральное выражение критерия (14) обозначим через  $F(t)$ . Функция, которая минимизирует функционал в (14), должна удовлетворять дифференциальному уравнению второго порядка Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial F(t)}{\partial T_i(t)} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial F(t)}{\partial \dot{T}_i(t)} \right) = 0. \quad (15)$$

Учитывая выражения (14) и (15), запишем систему уравнений для определения минимизирующих функций:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(t)}{\partial T_1(t)} + 2\alpha - 2\xi \frac{d\dot{T}_1(t)}{dt} = 0, \\ \frac{\partial F(t)}{\partial P_1(t)} + 2\beta - 2\chi \frac{d\dot{P}_2(t)}{dt} = 0, \\ \frac{\partial F(t)}{\partial T_2(t)} + 2\gamma - 2\mu \frac{d\dot{T}_2(t)}{dt} = 0, \\ \frac{\partial F(t)}{\partial P_2(t)} + 2\delta - 2\omega \frac{d\dot{P}_2(t)}{dt} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Решение системы сводится к решению системы нелинейных интегродифференциальных уравнений, что является особенностью задач вариационного исчисления. Для решения данной системы использовался метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

Частные производные по  $T_1(t)$ ,  $P_1(t)$ ,  $T_2(t)$ ,  $P_2(t)$  найдены с использованием правила Лейбница. При этом интеграл с переменным верхним пределом вычислен последовательно и в зависимости от значений, принимаемых переменной  $t$ .

На основе вышеизложенного составлен алгоритм вычисления управляющих воздействий.

Так как выражениями (5)–(8) аппроксимированы динамические характеристики процесса поликонденсации, то введем в качестве вспомогательного слагаемого управление по производным, которое позволит учесть не только наличие ошибки, но и тенденцию к ее изменению, увеличивая скорость реакции системы управления, тем самым повышая ее быстродействие. Вследствие нелинейности математического описания объекта закон управления представляет нелинейную зависимость управляющих переменных от значений выходных переменных. Необходимо учесть, что управляющие переменные зависят от ошибок управления по всем выходным переменным, на которые оказывают воздействие, поэтому законы управления имеют следующий вид:

$$T_1(t) = T_{01} + k_1 (\Delta v_1(t))^2 + k_2 (\Delta Q_1(t))^2 + k_3 \frac{d\Delta v_1(t)}{dt} + k_4 \frac{d\Delta Q_1(t)}{dt}, \quad (17)$$

$$P_1(t) = P_{01} + k_5 (\Delta v_1(t))^2 + k_6 (\Delta Q_1(t))^2 + k_7 \frac{d\Delta v_1(t)}{dt} + k_8 \frac{d\Delta Q_1(t)}{dt}, \quad (18)$$

$$T_2(t) = T_1(t) + k_9 (\Delta v_2(t))^2 + k_{10} (\Delta Q_2(t))^2 + k_{11} \frac{d\Delta v_2(t)}{dt} + k_{12} \frac{d\Delta Q_2(t)}{dt}, \quad (19)$$

$$P_2(t) = P_1(t) + k_{13} (\Delta v_2(t))^2 + k_{14} (\Delta Q_2(t))^2 + k_{15} \frac{d\Delta v_2(t)}{dt} + k_{16} \frac{d\Delta Q_2(t)}{dt}. \quad (20)$$

В (17)–(20) символ  $\Delta$  означает ошибку управления по переменной, рядом с которой он определен;  $t$  – время пребывания ПЭТФ в реакторах поликонден-

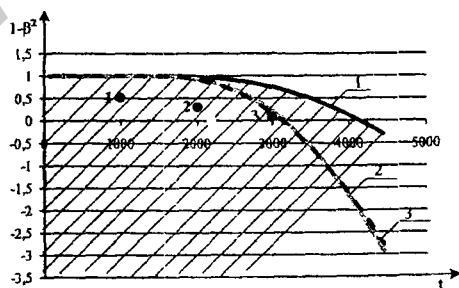
саци:  $T_{01}$  и  $P_{01}$  – начальные значения температуры и давления в реакторе ППК соответственно;  $k_1-k_{16}$  – коэффициенты соотношения переменной структуры.

Для выражений (17)–(20) найдены значения коэффициентов  $k_1-k_{16}$ . Так как неизвестных коэффициентов больше, чем выражений для их определения, то воспользуемся итерационным методом, заранее определив области поиска для каждого из коэффициентов. Для увеличения точности аппроксимации коэффициенты  $k_1-k_{16}$  имеют изменяющуюся во времени структуру:  $k_i = C_{1i}t + C_{2i}t^2$ . Условием сходимости будет стремление к минимальному значению квадрата разности между значениями управляющих переменных. Относительная дисперсия ошибки, выраженная в процентах, для управляющих переменных имеет следующие значения: для температуры в реакторе ППК – 3,4 %; для давления в реакторе ППК – 4,0 %; для температуры в реакторе ОПК – 2,6 %; для давления в реакторе ОПК – 3,8 %.

Установлена область устойчивости полученных выражений для выходных переменных процесса поликонденсации. Объект управления является нелинейным, поэтому речь пойдет только об асимптотической устойчивости в «малом». Исследование объекта на устойчивость в указанной области проводится на основе теории устойчивости А. М. Ляпунова. Разработана методика, применение которой приводит к определению условий устойчивости. В основе представленной ниже процедуры для уравнений Вольтерра лежит использование функций Ляпунова для вспомогательных разностных уравнений, зависящих от конечного, заранее фиксированного числа шагов:

$$1 - \beta_0^2 > 2|\beta_0 - 1| \left| \sum_{t=1}^{\infty} \sum_{\tau=t}^{\infty} A_1(t) \right|, \text{ где } \beta_0 = \sum_{t=0}^{\infty} A_1(t). \quad (21)$$

Используя левую часть неравенства (21), построим область асимптотической устойчивости для выражения (5). На рисунке 4 видно, что выбор границы устойчивости определяется по кривой  $1 - \beta^2$ , образующей с осью ординат наибольшую площадь.



1 – коэффициенты аппроксимации  $A_1(t)$ ; 2 – коэффициенты аппроксимации  $A_2(t)$ ;  
3 – коэффициенты аппроксимации  $A_3(t)$

**Рисунок 4 – Область асимптотической устойчивости вязкости расплава на выходе из реактора ППК**

Из неравенства (21) видно, что значения в правой части всегда положительные, поэтому нет смысла рассматривать область с отрицательными значениями  $1-\beta^2$ , которая обозначена на рисунке 4.

Основное достоинство процедуры заключается в том, что для определения области устойчивости используются только коэффициенты аппроксимации  $A_i(t)$ , полученные в результате регуляризации.

В четвертой главе рассмотрен процесс и структура системы управления процессом поликонденсации.

Включенная в систему математическая модель процесса поликонденсации содержит коэффициенты, которые пересчитываются при изменении режимов работы реакторов ППК и ОГК.

Последовательно во времени определяют неизвестные параметры модели объекта и затем отыскивают оптимальное управление исходя из предположения, что найденные оценки параметров совпадают с истинными значениями. Структурная схема адаптивной системы управления процессом поликонденсации имеет вид, представленный на рисунке 5. При этом алгоритм управления состоит из следующих этапов:

- сбор и обработка информации об объекте;
- корректировка параметров модели с учетом вновь поступивших данных о процессе;
- определение оптимальных значений управляющих координат по скорректированной модели;
- реализация управления объектом.

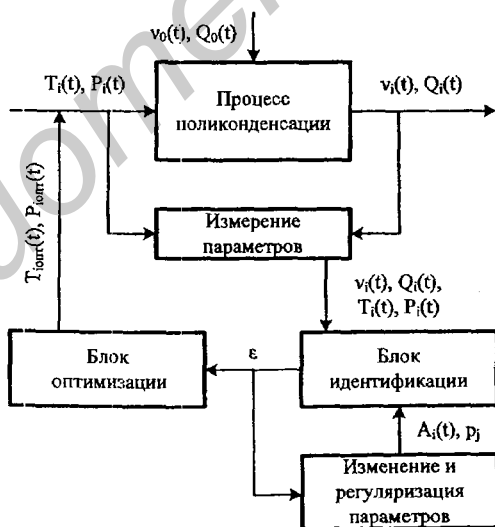


Рисунок 5 – Структурная схема системы управления процессом поликонденсации

В блоке идентификации происходит корректировка параметров математической модели процесса. Минимизация ошибки рассогласования параметров реального процесса и модели осуществляется путем регуляризации коэффициентов аппроксимации модели.

Для улучшения качества получаемого продукта в адаптивную систему включен контур управления по величине концентраций карбоксильных групп в ПЭТФ, разработано средство измерения концентрации карбоксильных групп фотометрическим способом непосредственно в производственном процессе. На рисунке 6 представлена структурная схема системы управления процессом поликонденсации с включенными в обратную связь средством измерения и алгоритмом вычисления концентрации карбоксильных групп.

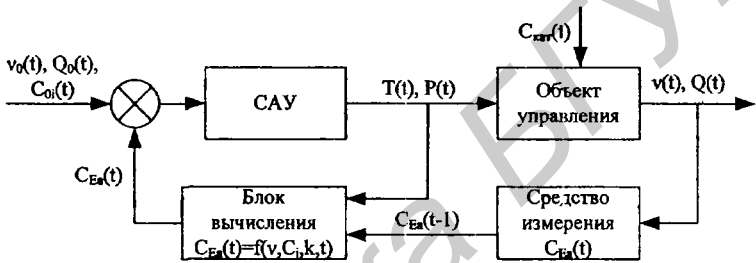
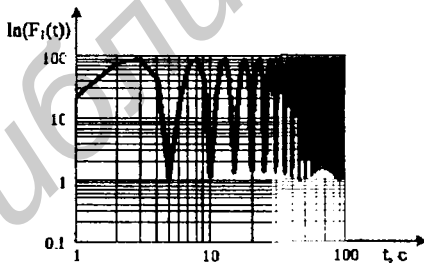
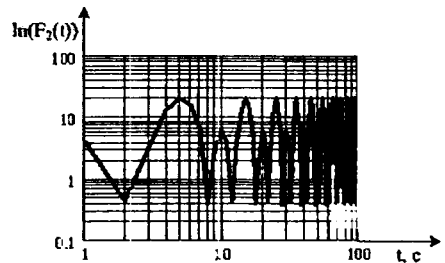


Рисунок 6 – Структурная схема системы управления процессом поликонденсации с алгоритмом вычисления концентрации карбоксильных групп

На рисунке 7а представлен график минимальной ошибки, за которую принят функционал  $F_1(t)$ . При построении графика в выражениях (5)–(8) для нахождения значений выходных переменных использованы значения управляющих переменных. Полученные значения выходных и управляющих переменных подставлены в функционал  $F_1(t)$  выражения (14). Как видно из графика, ошибка имеет установившийся характер в пределах от 0,978 до 86,820.



а) График функции установившейся ошибки, рассчитанной на основе исходных данных



б) График функции установившейся ошибки, рассчитанной с использованием составленных алгоритмов

Рисунок 7 – Графики функции установившейся ошибки



Для определения изменения качества управления построен график минимальной ошибки  $F_2(t)$ . При формировании значений функционала  $F_2(t)$  использованы выражения для определения значений управляющих и выходных переменных на основе законов управления (17)–(20).

График функционала  $F_2(t)$  представлен на рисунке 76. Ошибка имеет установившийся характер в пределах от 0,374 до 19,714.

Указанный для  $F_2(t)$  интервал в 4,5 раза меньше, чем для  $F_1(t)$ , а быстродействие системы увеличилось на 14 % по сравнению с существующей системой, время срабатывания которой составляет 28 секунд, что говорит о повышении качества управления за счет блоков идентификации и оптимизации.

Реализация представленных алгоритмов осуществляется с помощью разработанных в ходе диссертационного исследования программ. В результате внедрения вышеуказанной адаптивной системы управления становится возможным ведение процесса при сниженных температурах и уменьшении давления вакуума. Таким образом, оптимизация значений управляющих переменных привела к снижению затрат электроэнергии на нагрев теплоносителя и работу насосов для удаления этиленгликоля из реакторов поликонденсации. На основании изменения данных характеристик рассчитана оценка эффективности от внедрения предлагаемой системы управления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

В соответствии с поставленной целью и очерченным кругом задач получены следующие научные и практические результаты.

1. Разработана математическая модель динамики процесса поликонденсации, включающая математическую модель кинетики и идентификацию динамических характеристик. Найдены значения концентраций веществ необходимые для определения степени полимеризации, которые входят в реакции, протекающие в реакторах поликонденсации [1–А], [16–А]. Составлено математическое описание динамики процесса на основе интегральных рядов Вольтерра, что позволило впервые описать динамику процесса поликонденсации [2–А], [14–А].

Разработана методика регуляризации, используя которую удалось снизить ошибку идентификации вязкости на выходе из реактора ППК с 2,724 % до 2,271 %; расхода на выходе из реактора ППК с 6,56 % до 5,26 %; вязкости на выходе из реактора ОПК с 35,10 % до 14,99 %; расхода на выходе из реактора ОПК с 3,32 % до 3,01 %. Методика может быть применена при определении динамических характеристик нелинейных промышленных объектов, в которых возможна подача пробных воздействий [3–А], [11–А], [15–А].

2. Разработан алгоритм оптимизации процесса поликонденсации, обоснован выбор интегрального критерия оптимизации. Предложена методика определения весовых коэффициентов критерия оптимизации. Использование составленного алгоритма оптимизации привело к увеличению быстродействия при вычислениях значений управляющих переменных и наглядному представ-

лению оптимального решения [4–А], [10–А], [12–А]. Предложена аппроксимация полученных оптимальных зависимостей на основе нелинейных законов управления [8–А]. Максимальная величина относительной погрешности аппроксимации составляет: для температуры в реакторе ППК – 3,4 %; для давления в реакторе ППК – 4,0 %; для температуры в реакторе ОПК – 2,6 %; для давления в реакторе ОПК – 3,8 %.

3. Разработана оригинальная методика определения области устойчивости системы. Найдены границы асимптотической устойчивости динамических характеристик модели процесса поликонденсации. Основное достоинство процедуры заключается в том, что для определения области устойчивости используются только коэффициенты аппроксимации  $A_i(t)$ , полученные в результате регуляризации [6–А], [18–А].

4. Разработано авторское алгоритмическое и программное обеспечение синтеза адаптивной системы управления. Алгоритм расчета основан на реализации отдельных алгоритмов кинетики процесса, идентификации, оптимизации и интерполяции [4–А], [13–А], [17–А]. Полученные результаты дают возможность изменения оптимальных значений управляющих переменных с целью получения энергосберегающего эффекта от внедрения (12,195 млн. рублей в год в ценах 2010 года) [5–А]. Впервые для производства полимера с требуемым значением степени полимеризации разработан и включен в систему управления блок измерения концентрации карбоксильных групп, позволяющий корректировать значения управляющих переменных [7–А], [9–А]. Разработанная система улучшает качество управления путем снижения значения минимальной ошибки, увеличения быстродействия системы и обеспечивает получение качественного продукта.

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Программное обеспечение, разработанное в ходе диссертационной работы, может применяться для определения динамических характеристик, а также при создании систем управления поликонденсационными процессами. В частности, они используются и внедрены в технологический процесс на ОАО «Могилевхимволокно», а также используются в учебном процессе учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» на кафедре автоматизации производственных процессов и электротехники в лекционном курсе дисциплин «Моделирование объектов и систем управления отпавли» и «Теория автоматического управления».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи

1–А. Алданова, И. В. Математическое описание динамики процесса поликонденсации / И. В. Алданова, И. Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2008. – Вып. XVI. – С. 82–86.

2–А. Алданова, И. В. Идентификация динамических характеристик процесса поликонденсации / И. В. Алданова, И. Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2009. – Вып. XVII. – С. 86–89.

3–А. Aldanova, I. The mathematical description of technological processes in dynamics / I. Aldanova, I. Ivanova // Bioagrotechnical systems engineering – Scientific Journal. – 2009. – Vol. 3 (19). – P. 13–19.

4–А. Акиншева, И. В. Синтез адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И. В. Акиншева, И. Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 104–108.

5–А. Акиншева, И. В. Экономия энергетических затрат в производстве полиэтилентерефталата / И. В. Акиншева, И. Ф. Кузьмицкий // Энергия и менеджмент. – 2010. – №1. – С. 29–32.

6–А. Акиншева, И. В. Исследование устойчивости нелинейных объектов / И.В. Акиншева // Problemy Inzynierii Rolniczej i Lesnej. – 2010. – Vol. 1. – P. 9–20.

7–А. Акиншева, И. В. Автоматическое измерение качественных показателей полиэтилентерефталата на стадии поликонденсации / И. В. Акиншева, И. Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2011. – № 6(144). – С. 74–77.

### Материалы конференций

8–А. Акиншева, И. В. Формирование оптимальных управляющих воздействий процесса поликонденсации / И. В. Акиншева // Информационные технологии и системы 2011 (ИТС 2011): материалы международной научной конференции, БГУИР, Минск, Беларусь, 26 октября 2011 г / редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2011. – С. 68–69.

9–А. Акиншева, И. В. Построение адаптивной системы управления процессом поликонденсации с контуром коррекции по содержанию карбоксильных групп в полиэтилентерефталате / И. В. Акиншева, И.Ф. Кузьмицкий // Волокна и пленки 2011: перспективные технологии и оборудование для производства и переработки волокнистых и пленочных материалов: материалы международной научно-практической конференции-семинара, Могилев 28 октября 2011 г. / Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО «МГУП», 2011. – С. 141–145.

## Тезисы докладов

10–А. Алданова, И. В. Многокритериальная оптимизация реактора поликонденсации при производстве полимера полиэтилентерефталата / И.В. Алданова // Техника и технология пищевых производств – 2007: тез. докл., Могилев, 23–24 апр. 2007 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2007. – С. 38.

11–А. Алданова, И. В. Идентификация динамических характеристик процесса поликонденсации с использованием рядов Вольтерра второго рода / И. В. Алданова, И. Ф. Кузьмицкий // Техника и технология пищевых производств – 2009: тез. докл., Могилев, 21–22 мая 2009 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2009. – С. 56.

12–А. Алданова, И. В. Оптимальное управление процессом поликонденсации / И. В. Алданова, И. Ф. Кузьмицкий // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов – 2009: тез. докл., Минск, 28–29 октября. 2009 г. / Бел. гос. технол. ун-т. – Минск, 2009. – С. 12.

13–А. Акиншева, И. В. Построение адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И. В. Акиншева, Н. Н. Дорогов // Техника и технология пищевых производств – 2010: тез. докл., Могилев, 23–24 апреля. 2010 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2010. – С. 56.

14–А. Акиншева, И.В. Математическое моделирование стадии поликонденсации в производстве полиэтилентерефталата / И.В. Акиншева // Математическое и имитационное моделирование систем МОДС'2010: тез. докл., г.Киев, 21–25 июня 2010 г. / Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка. – Киев, 2010. – С. 32.

15–А. Акиншева, И. В. Идентификация динамических характеристик существенно нелинейных объектов / И. В. Акиншева // Системный анализ и информационные технологии: материалы Международной научно-технической конференции SAIT 2011, Киев, 23–28 мая 2011г. – К.: УЭК «ИПСА» ННТУ «КПИ», 2011. – С. 49.

16–А. Акиншева, И. В. Математическое моделирование кинетики процесса поликонденсации / И. В. Акиншева, Н. Н. Дорогов // Техника и технология пищевых производств – 2011: тез. докл., Могилев, 27–28 апреля 2011 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2011. – С. 113.

17–А. Акиншева, И. В. Комплексная реализация адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И. В. Акиншева, И. Ф. Кузьмицкий // Техника и технология пищевых производств – 2011: тез. докл., Могилев, 27–28 апреля 2011 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2011. – С. 112.

18–А. Акиншева, И. В. Анализ устойчивости адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И. В. Акиншева // Техника и технология пищевых производств – 2011: тез. докл., Могилев, 27–28 апреля 2011 г. / Могилевский гос. ун-т продовольствия. – Могилев, 2011. – С. 114.

## РЕЗЮМЕ

Акиншева Ирина Владиславовна

### Оптимальное управление реакторами поликонденсации в производстве полиэтилентерефталата

**Ключевые слова:** полиэтилентерефталат, поликонденсация, кинетика химических процессов, идентификация динамических объектов, регуляризация, оптимизация, критерий качества, карбоксильные группы, синтез адаптивной системы управления процессом.

**Цель работы:** сокращение затрат на энергоресурсы и повышение качества полиэтилентерефталата за счет построения автоматизированной адаптивной системы управления процессом поликонденсации.

**Объект исследования:** процесс поликонденсации.

**Предмет исследования:** способы адаптивного управления процессом поликонденсации.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем: разработана математическая модель процесса поликонденсации, отличительной особенностью которой является определение концентраций продуктов реакций и возможность идентификации динамических характеристик объекта исследования с высокой степенью точности, достигающейся за счет использования алгоритма регуляризации коэффициентов аппроксимации модели; разработан алгоритм поиска оптимальных значений управляющих переменных, основанный на минимизации интегрального квадратичного критерия качества используемой модели; составлены законы управления, которыми произведена аппроксимация результатов оптимизации; разработана методика определения области устойчивости, благодаря которой определяются границы задания переменных процесса; разработаны алгоритм и структура синтеза адаптивной системы управления процессом поликонденсации, включающая блок вычисления концентрации карбоксильных групп в полимере, что позволяет производить настройку параметров математической модели при изменении режимов работы аппаратов, снизить затраты на электроэнергию и повысить качество полиэтилентерефталата.

**Область применения:** производство полимеров, в частности, полиэтилентерефталата, что подтверждено внедрением и использованием результатов исследования в химическом цехе Завода органического синтеза ОАО «Могилевхимволокно».

## РЭЗІЮМЭ

### Акіншэва Ірына Уладзіславаўна Аптымальнае кіраванне рэактарамі полікандэнсацыі ў вытворчасці поліэтылентэрэфталату

**Ключавыя словы:** поліэтылентэрэфталат, полікандэнсацыя, кінетыка хімічных працэсаў, ідэнтыфікацыя дынамічных аб'ектаў, рэгулярызацыя, аптымізацыя, крытэрыі якасці, карбаксільныя групы, сінтэз адаптыўнай сістэмы кіравання працэсам.

**Мэта даследавання:** скарачэнне выдаткаў на энергарэсурсы і павышэнне якасці поліэтылентэрэфталату за кошт пабудовы аўтаматызаванай адаптыўнай сістэмы кіравання працэсам полікандэнсацыі.

**Аб'ект даследавання:** працэс полікандэнсацыі.

**Прадмет даследавання:** спосабы адаптыўнага кіравання працэсам полікандэнсацыі.

Навуковая навізна атрыманых аўтарам вынікаў выражаецца ў наступным: распрацавана матэматычная мадэль працэсу полікандэнсацыі, адметнай асаблівасцю якой з'яўляецца вызначэнне канцэнтрацый прадуктаў рэакцый і магчымасць ідэнтыфікацыі дынамічных характарыстык аб'екта даследавання з высокай ступенню дакладнасці, дасягаецца за кошт выкарыстання алгарытму рэгулярызацыі каэфіцыентаў апраксімацыі мадэлі; распрацаваны алгарытм пошуку аптымальных значэнняў кіруючых пераменных, заснаваны на мінімізацыі квадратычнага крытэрыя якасці выкарыстэмай мадэлі; складзены законы кіравання, якімі праведзена апраксімацыя вынікаў аптымізацыі; распрацавана метадыка вызначэння вобласці ўстойлівасці, дзякуючы якой вызначаюцца межы задання пераменных працэсу; распрацаваны алгарытм і структура сінтэзу адаптыўнай сістэмы кіравання працэсам полікандэнсацыі, якая ўключае блок вылічэння канцэнтрацыі карбаксільных груп у палімеры, што дазваляе выканаць перабудову параметраў матэматычнай мадэлі пры змене рэжымаў работы апаратаў, знізіць выдаткі на электраэнергію і павысіць якасць поліэтылентэрэфталату.

**Вобласць прымянення:** вытворчасць палімераў, у прыватнасці поліэтылентэрэфталату, што пацверджана ўкараненнем і выкарыстаннем вынікаў даследавання ў хімічным цэху Завода арганічнага сінтэзу ААТ «Магілёўхімвалакно».

## SUMMARY

Irina V. Akinsheva

### **Optimal control of polycondensation reactors in the production of polyethylene terephthalate**

**Key words:** polyethylene terephthalate, polycondensation, the kinetics of chemical processes, the identification of dynamic objects, regularization, optimization, quality criteria, carboxyl groups, the synthesis of an adaptive process control system.

**The aim of research:** To reduce energy costs and increase the quality of polyethylene terephthalate by creating the automatic adaptive system that controls the process of polycondensation.

**Object of research:** the process of polycondensation.

**Subject of research:** methods of adaptive control of the polycondensation process.

The scientific novelty of the author's results is as follows: a mathematical model of the polycondensation of specific in the determination of the concentrations of the products of the reactions and the ability to identify the dynamic characteristics of the object of study with a high degree of accuracy has been generated by using the regularization algorithm of approximation coefficients; an algorithm for optimal values of the control variables, based on the minimization of a quadratic criterion of quality of the model used has been developed; definite control laws, which were used for conducting the approximation of the optimization results, have been written; the technique of determining the area of sustainability, which is used for defining the boundaries of setting a process variables, has been worked out; the structure and synthesis algorithm of the adaptive control system for the polycondensation process, including calculation unit concentration of the carboxyl groups in the polymer, has been developed, which allows to reconstruct the parameters of the mathematical model when changing modes of the percolation process, to reduce energy costs and improve the quality of polyethylene terephthalate.

**Applications:** Production of polymers, particularly polyethylene terephthalate, which is confirmed by the introduction and use of research results in the chemical department of the organic synthesis plant «Mogilevchimvolokno».

Научное издание

Акиншева  
Ирина Владиславовна

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕАКТОРАМИ  
ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ  
ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА**

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

по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»

Ответственный за выпуск И. В. Акиншева

---

Подписано в печать 18.09.2012.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,5.	Тираж 60 экз.	Заказ 454.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009  
220013, Минск, П. Бровки, 6