

На правах рукописи

**БУТОРИН ДЕНИС ВИТАЛЬЕВИЧ**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ  
ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ  
ПОЛЯРНОСТИ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (промышленность)

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

Иркутск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС), г. Иркутск.

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
**Лившиц Александр Валерьевич**

**Официальные оппоненты:**

**Дунаев Михаил Павлович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
г. Иркутск, профессор кафедры электропривода  
и электрического транспорта;

**Бочаров Алексей Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский государственный  
университет науки и технологий имени  
академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск,  
доцент кафедры информационно-управляющих  
систем

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Новосибирский государственный  
технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится 30 ноября 2018 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева по адресу: 660037 г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева и на сайте <https://www.sibsau.ru>.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Панфилов  
Илья Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Полимерные материалы в последние десятилетия стали одним из исследуемых и широко применяемых классов материалов в различных отраслях промышленности, включая и транспортное машиностроение. Из полимеров изготавливается широкий ассортимент деталей с различным комплексом конструкционных, антикоррозионных, эстетических, диэлектрических и др. эксплуатационных свойств. Все это обеспечивается большим рядом научных исследований, посвященных изучению структуры, свойств и состояний полимеров, технологиям их получения, обработки и переработки. Исследованиями в указанных направлениях занимались Бурлов В. В., Войлов Ю. В., Ефремова А. И., Иванова Л. Л., Крыжановский В. К., Киселева Т. Ф., Новиков Г. Ф., Павлов Н. Н., Паниматченко А. Д., Песецкий С. С., Тагер А. А. и другие авторы.

Но, наряду с этим, на сегодняшний день остается много проблем связанных с обработкой, хранением и эксплуатацией полимерных изделий, решение которых требует дальнейшего изучения и интенсификации свойств полимеров, а также совершенствования существующих технологических процессов их изготовления и обработки.

При обработке и производстве полимеров важную роль играют температурные режимы их обработки. Так, в настоящее время к наиболее прогрессивным способам обработки полимерных деталей следует отнести энерго- и ресурсосберегающие технологии, связанные с методом высокочастотной (ВЧ) электротермии.

В работах отечественных и зарубежных авторов (Архангельский Ю. С., Донской С. Н., Калганова С. Г., Каргапольцев С. К., Коновалов Н. П., Ларченко А. Г., Лившиц А. В., Марков А. В., Попов С. И., Румынский А. В., Трофимов Н. В., Федорова И. Г., Филиппенко Н. Г., Юленец Ю. П., Potente H., Tinga W., Nilson S., Ohe T., Yoshimura Y. и др.) сделан значительный шаг вперед в развитии ВЧ-электротермии, в частности диагностики, сушки, сварки и восстановления прочностных свойств полимерных изделий. При этом остается большое количество вопросов, требующих своего решения. Так необходимо отметить, что существуют ограничения в применении предложенных технологий даже в отношении полярных полимеров в зависимости от их степени полярности. Снятие таких ограничений на основе формирования новых контролируемых параметров, развития автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) ВЧ-электротермии позволит расширить номенклатуру обрабатываемых полимерных материалов, получить новые знания об изменении их электрофизических параметров в процессе обработки, расширить применимость ВЧ-электротермии.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что разработка автоматизированных систем управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов разной степени полярности является актуальной задачей.

**Цель диссертационной работы:** повышение качества и эксплуатационных свойств изделий из полимерных материалов разной степени полярности за счет автоматизации управления технологическими процессами их высокочастотной обработки.

**Для реализации поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:**

1. На основе анализа существующей автоматизированной системы научных исследований высокочастотной обработки (АСНИ ВЧ) провести модернизацию ее аппаратно-программной части для повышения точности результатов исследований.

2. Исследовать взаимосвязь электрофизических параметров ВЧ-оборудования и обрабатываемых полимерных материалов для организации контроля процесса ВЧ-обработки, учитывая различные виды диэлектрических потерь.

3. Разработать математическую модель процессов высокочастотного нагрева полимерных материалов, как составную часть АСНИ ВЧ, позволяющую анализировать объемное распространение тепла в процессе ВЧ-электротермии при обработке полимерных изделий, как простой, так и сложной формы.

4. Разработать алгоритмы автоматизированного управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов с различной степенью полярности и реализовать их применительно к промышленному оборудованию.

**Объектом исследования** являются процессы высокочастотной электротермии термопластичных полимерных материалов разной степени полярности.

**Предметом исследования** являются взаимозависимости электрофизических параметров электротермического оборудования и полимеров, позволяющие организовать автоматизированное управление технологическими процессами высокочастотной электротермии для материалов разной степени полярности.

**Методы исследований.** Исследования проводились на основе математического моделирования с использованием метода конечных разностей, физико-химии полимерных материалов, термодинамики, электротехники и основ проектирования автоматизированных систем. Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием методов контроля тепловых деформаций и полей, хроноамперометрического метода.

**Научная новизна диссертационной работы включает следующие пункты:**

1. Выявлены новые контролируемые параметры процесса высокочастотной обработки полимерных материалов и критерии их оценки, отличающиеся возможностью определения неявных релаксационных состояний на основе контроля:

- скорости изменения анодного тока ВЧ-генератора при непрерывном воздействии;

- анодного тока ВЧ-генератора при импульсном воздействии.

2. Разработана новая методика управления процессом ВЧ-обработки полимерных изделий разной степени полярности, основанная на контроле:

- момента достижения экстремальных точек скорости изменения анодного тока ВЧ-генератора;

- наличия экстремальной точки отдельного импульса анодного тока ВЧ-генератора.

3. Разработана математическая модель нагрева технологической системы, представляющая собой систему дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла, отличающаяся трехмерной постановкой задачи (3D постановка), возможностью изменения количества слоев технологической системы и учетом температурозависимой теплопроводности.

4. Разработаны новые алгоритмы автоматизированного управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов разной степени полярности, отличающиеся использованием в качестве контролируемого параметра скорости изменения анодного тока, стабилизацией заданной температуры электродов.

**Достоверность полученных научных результатов обоснована:** корректным использованием методов классической теории автоматического управления, электродинамики, основ физико-химии полимеров; использованием существующих методов численного анализа и методов аппроксимации; согласованностью теории и

результатов экспериментальных исследований (в т. ч. результатов экспериментальных исследований процессов высокочастотной электротермии сторонних авторов).

**Теоретическую значимость составляют:** обоснование возможности разработки новой классификации полимерных материалов по управляемости при построении экстремальных систем управления; новые контролируемые параметры процесса высокочастотной обработки полимерных материалов, позволяющие реализовать поэтапное управление различными технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров разной степени полярности на основе контроля скорости изменения анодного тока при непрерывном ВЧ-воздействии и анодного тока при импульсном ВЧ-воздействии; математическая модель нагрева технологической системы в 3D постановке с изменяемым количеством слоев технологической системы и учетом температурозависимой теплопроводности, позволяющая анализировать объемный разогрев в процессе ВЧ-электротермии при обработке изделий как простой, так и сложной формы, изготовленных из широкой номенклатуры полимерных материалов; закономерности влияния температуры неизолированного электрода на смещение координаты точки максимального нагрева при последовательной обработке партии деталей, позволяющие получить новые знания об управлении ВЧ-электротермией с целью решения задач повышения энергоэффективности и качества обработки.

**Практическая значимость работы.** Усовершенствованная АСНИ ВЧ позволяет в автоматизированном режиме производить контроль температурной зависимости линейного расширения полимера и построение амперометрической зависимости диэлектрических потерь от температуры в исследуемых материалах разной степени полярности.

Разработана методика идентификации процесса высокочастотной обработки полимерных материалов на основе анализа их степени полярности, позволяющая создавать АСУ ВЧ-электротермией промышленного применения. Сформированы критерии оценки выявленных контролируемых параметров процесса электротермии с точки зрения реализации управляющего воздействия.

На основе разработанной в рамках настоящей диссертационной работы математической модели нагрева технологической системы в 3D постановке разработаны алгоритмы расчета тепловых полей, позволяющие решать задачи практического характера, связанные с определением необходимости замены изоляторов и положения координаты точки максимального нагрева, необходимые для повышения качества обрабатываемых изделий.

Разработана автоматизированная система управления процессом ВЧ-электротермии, позволяющая производить различные технологические процессы обработки полимерных материалов разной степени полярности.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Выявленные новые параметры процесса высокочастотной обработки полимерных материалов (скорость изменения анодного тока ВЧ-генератора при непрерывном воздействии, анодный ток ВЧ-генератора при импульсном воздействии) и критерии их оценки позволяют реализовать поэтапное управление различными технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров разной степени полярности в соответствии с их релаксационными состояниями.

2. Разработанная методика управления процессом ВЧ-обработки полимерных изделий разной степени полярности позволяет формировать управляющие сигналы

систем автоматизированного управления различными технологическими процессами высокочастотной обработки, основанные на контроле: момента достижения экстремальных точек скорости изменения анодного тока ВЧ-генератора; наличия экстремальной точки отдельного импульса анодного тока ВЧ-генератора.

3. Разработанная математическая модель нагрева технологической системы в 3D постановка позволяет анализировать объемный разогрев в процессе ВЧ-электротермии при обработке полимерных изделий как простой, так и сложной формы с целью решения исследовательских и практических задач.

4. Разработанные алгоритмы автоматизированного управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов разной степени полярности позволяют повысить качественные и эксплуатационные свойства изделий из полимерных материалов разной степени полярности в процессе их автоматизированной высокочастотной обработки.

**Реализация результатов работы.** Основные результаты работ были внедрены на предприятии полиграфической отрасли (ОАО «ПОЛИГРАФИСТ» г. Иркутск). Экономический эффект от внедрения составил более 1 млн. руб. в год.; в учебный процесс в образовательную программу 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (уровень магистратуры) по дисциплинам «Современное материаловедение и термическая обработка», «Технологии обработки полимеров и композитов»; в образовательную программу 23.05.03 Подвижной состав железных дорог (уровень специалитета) по дисциплине «Процессы механической и физико-технической обработки».

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены и обсуждены на: V и VI Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 16-18 апреля 2015 г., 13-16 апреля 2016 г.); Седьмой и восьмой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 29 марта – 01 апреля 2016 г., 28 марта – 01 апреля 2017 г.); Международной молодежной научно-практической конференции «Россия – Монголия» (г. Иркутск, Россия, 16-21 мая 2016 г.; г. Улан-Батор, Монголия, 5-10 сентября 2016 г.); Седьмой международной конференции «Recent trend in Science and Technology management» (г. Лондон, Англия, 27-29 июля 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (г. Москва, Россия, 31 июля 2018 г.).

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 19 научных работах, из них 7 работ в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК; получен 1 патент на изобретение, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы «Автоматизация процесса управления электротермической обработкой термопластичных полимерных материалов», зарегистрированной ФГНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти», рег. № АААА-А17-117032210036-4 от 31.08.2017 г.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа объемом 174 страницы машинописного текста содержит 81 рисунок, 8 таблиц и список литературы, включающий 162 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана краткая характеристика направления исследования, представлена научная новизна результатов работы и их практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проанализировано современное состояние, проблемы обработки, эксплуатации и ремонта изделий из полимерных материалов в транспортном машиностроении. Исследованы существующие способы нагрева с целью определения наиболее прогрессивного и энергоэффективного метода обработки полимерных материалов, которым стал ВЧ метод обработки полимеров с частотой воздействия, равной 27,12 МГц.

Рассмотрены основные факторы (величина диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ ), определяющие способность полимерных диэлектриков нагреваться в переменном электромагнитном поле даже в случае их неполярности.

В ходе литературного обзора проанализированы существующие методы управления и рекомендации по организации контроля процессов ВЧ-обработки полимерных материалов. Наиболее информативным контролируемым параметром является косвенный показатель – анодный ток  $I_a$  высокочастотного генератора.

В главе проанализированы недостатки существующих АСУ ТП ВЧ-электротермии: ориентация только на процессы сушки и сварки; низкая помехозащищенность при контроле фазовых состояний полимера, что не гарантирует получения качественных изделий; не учитывается степень полярности полимерных материалов и контроль технологических процессов привязан только к двум релаксационным состояниям (экстремумы  $I_a$ ), что ограничивает применяемость ВЧ-электротермии; существующие АСУ ТП при обработке различных материалов не учитывают низкие пороги термостойкости, наступающие у некоторых полимеров до состояния плавления.

Проанализирована существующая АСНИ ВЧ, состоящая из двух взаимодополняющих друг друга частей – аппаратно-программной части регистрации, визуализации, обработки и анализа информации и системы выявления взаимовлияния физических параметров элементов технологической системы (программный комплекс Aleo\_HFH), нуждающаяся в доработке и совершенствовании.

На основании проведенного литературно-патентного исследования в заключительной части главы сформулирована цель диссертационной работы и вытекающие из нее задачи.

**Во второй главе** диссертации изложены результаты работ по совершенствованию АСНИ ВЧ, заключающиеся в исключении влияния пресса на нагрев и тепловое расширение исследуемого образца и разделении по времени измерений температуры и работы ВЧ-генератора (рисунок 1).

В работе приведены результаты активных экспериментов по исследованию взаимосвязей электрофизических параметров электротермического оборудования и широко применяемых в транспортном машиностроении полимерных материалов, таких как поливинилхлоридный пластикат ОМБ-60, полиамид ПА6, стеклонаполненный полиамид (армамид ПА СВ 30-1 ЭТМ) и полиуретан марки СКУ-7Л с использованием усовершенствованной АСНИ ВЧ. На рисунке 2 показаны температурные зависимости анодного тока  $I_a = f(T)$  и линейного теплового расширения  $l = f(T)$  для указанных материалов.

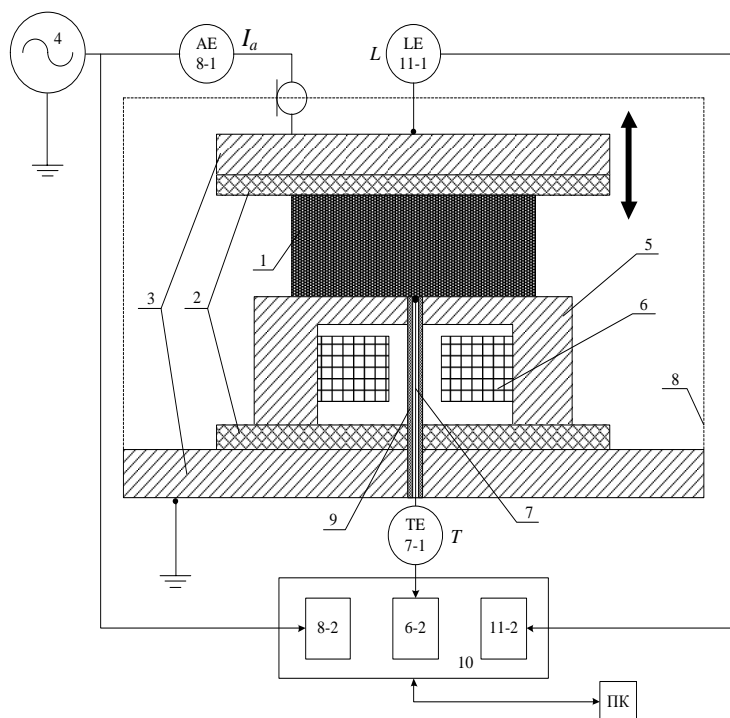
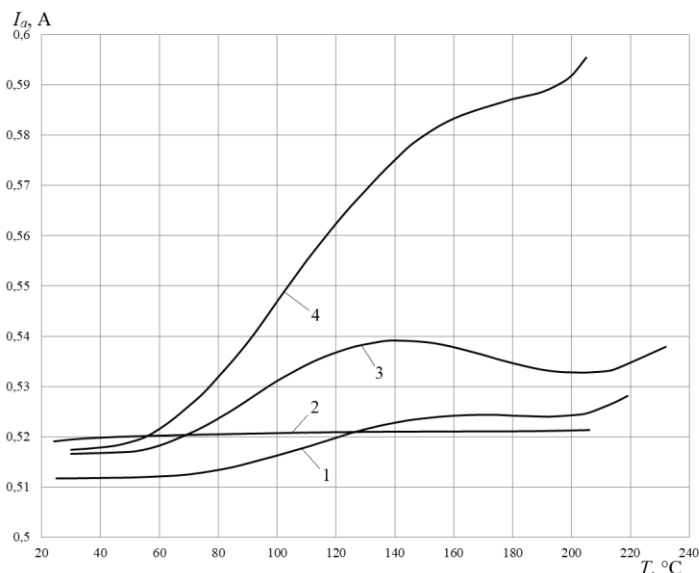
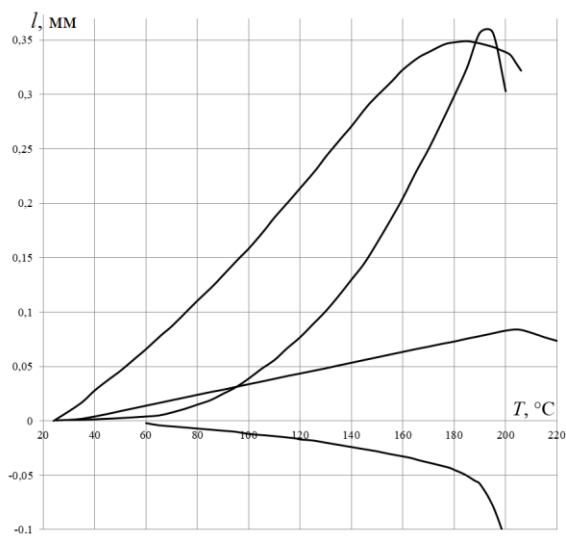


Рисунок 1 – Схема автоматизированной экспериментальной установки по определению амперметрической зависимости диэлектрических потерь в полимерных материалах, где 1 – образец; 2, 9 – тепло-электро-изоляторы; 3 – электроды рабочего конденсатора; 4 – ВЧ-генератор; 5 – приспособление для нагрева образца; 6 – электронагревательный элемент; 7 – термопара; 7-1 – термопара-термометр; 8 – защитный экран; 8-1 – датчик анодного тока; 10 – вычислительный блок; 11-1 – датчик линейных перемещений.



а



б

Рисунок 2 – Графики зависимостей  $I_a = f(T)$  (а) и  $l = f(T)$  (б) для полимерных материалов: 1 – арамид ПА СВ 30-1 ЭТМ; 2 – полиуретан марки СКУ-7Л; 3 – полиамид ПА6; 4 – пластикат ПВХ ОМБ-60.

Анализ графиков (рисунок 2а) показывает, что наиболее характерные изменения в виде экстремумов значений  $I_a$ , среди исследованных материалов, наблюдаются только в полиамидах (полиамид ПА6, стеклонаполненный полиамид). По другим материалам экстремумов выявлено не было, что отражает невозможность построения экстремального управления процессами ВЧ-обработки.

Детальный сравнительный анализ диэлектрических свойств исследованных полимеров позволил сделать вывод, что наличие или отсутствие температурных экстремумов зависит от степени полярности полимерных материалов и определяется значением  $\epsilon'$  (таблица 1). Так все полимеры в зависимости от величины  $\epsilon'$  можно условно разделить на: неполярные ( $1,8 < \epsilon' < 2,3$ ), малополярные ( $2,3 < \epsilon' < 3,0$ ), полярные ( $3,0 < \epsilon' < 4,0$ ) и сильнополярные ( $\epsilon' > 4,0$ ). Отсюда, полиуретан и пластикат



ПВХ – сильнополярные; полиамид ПА6 и арзамид – полярные. Экспериментальные исследования показывают, что именно у сильнополярных полимеров отсутствуют экстремальные точки и, следовательно, возможность построения экстремальных систем управления ВЧ-электротермией на основе анализа  $I_a(T)$ .

Таблица 1 – Значения  $\varepsilon'$  и  $tg\delta$  исследуемых полимерных материалов из различных источников

Полимерный материал	Условия измерения	$\varepsilon'$	$tg\delta$
Полиамид ПА6	частота $10^6$ Гц	3,0 – 3,6	0,025 – 0,03
Стеклонаполненный полиамид	–	3,0 – 3,5	0,01 – 0,04
Полиуретан	частота 50 Гц, температура 20 °С	4,0 – 5,0	0,012 – 0,018
	при частоте $10^6$ Гц	4,5 – 4,8	0,0114
Пластикат ПВХ	частота $10^6$ Гц, температура 20 °С	3,3 – 4,5	0,04 – 0,09
	–	3,2 – 4,5	0,014 – 0,1

При этом, в диссертационном исследовании определилась еще одна возможность контроля и управления – по скорости изменения анодного тока  $dI_a/dT$ . На рисунке 3 приведены графики температурной зависимости скорости изменения анодного тока  $dI_a/dT$  для исследуемых материалов, полученные с использованием дифференциального оператора левой конечной разности первого порядка аппроксимации.

Анализ графиков показал, что  $dI_a/dT$  можно использовать в качестве контролируемого параметра обработки. При организации ВЧ-обработки сильнополярных полимеров – для обеспечения возможности управления процессом, а полярных полимеров (рисунок 3а, б) – для идентификации ранее не контролируемых релаксационных состояний.

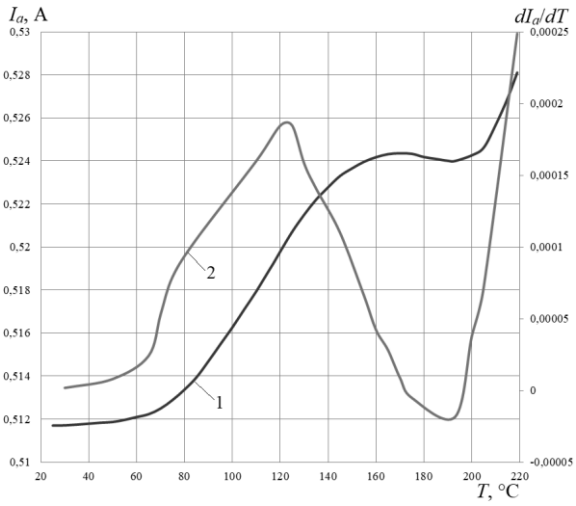
Также, в рамках настоящего исследования впервые определено, что второй экстремум (минимум)  $dI_a/dT$  сильнополярных полимеров (пластикат ПВХ и полиуретан) соответствует началу фазы плавления.

Первый экстремум (максимум)  $dI_a/dT$  можно использовать при организации технологических процессов высокочастотной сушки, термической обработки с целью восстановления прочностных свойств и пропитки полимерных материалов с низкой температурой деструкции ( $T_{дест.} < T_{пл.}$ ).

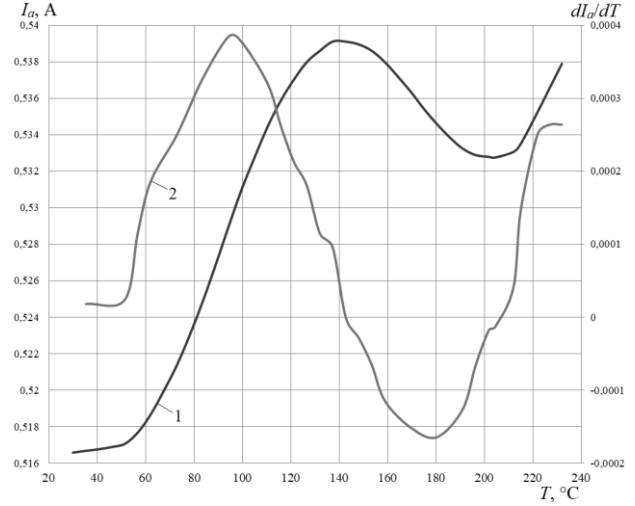
Важно отметить, что отличный друг от друга характер температурных зависимостей диэлектрических потерь полимерных материалов с различной степенью полярности, выявленных в рамках настоящего диссертационного исследования, требует классифицирования всех полимеров по управляемости при построении экстремальных систем.

В главе проанализировано влияние импульсного ВЧ-воздействия на полимер, что позволило выявить новую зависимость анодного тока в процессе обработки от состояния материала. Результаты представлены на рисунке 4.

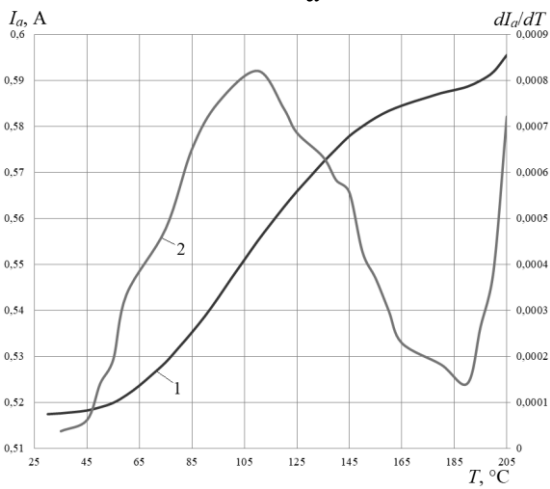
Годограф, проведенный к вершинам импульсов  $I_a$  показывает отсутствие экстремумов, что позволяет отнести данный полимер к сильнополярным (рисунок 4а). При этом достижение различных релаксационных состояний можно контролировать, оценивая фронт, спад и центральную часть импульса. Так каждый из представленных импульсов отражает характерное изменение угла наклона графика изменения анодного тока ВЧ-генератора в процессе обработки.



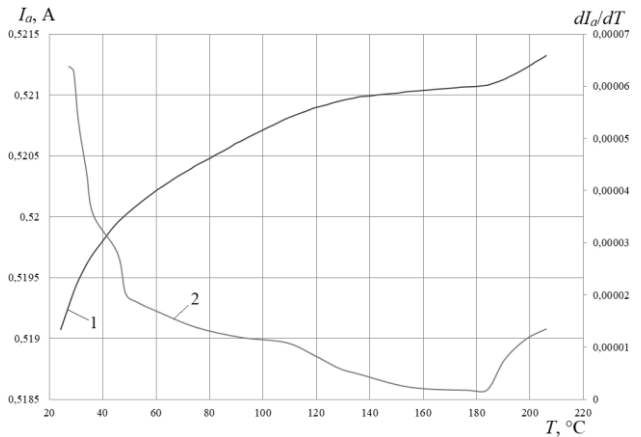
а



б

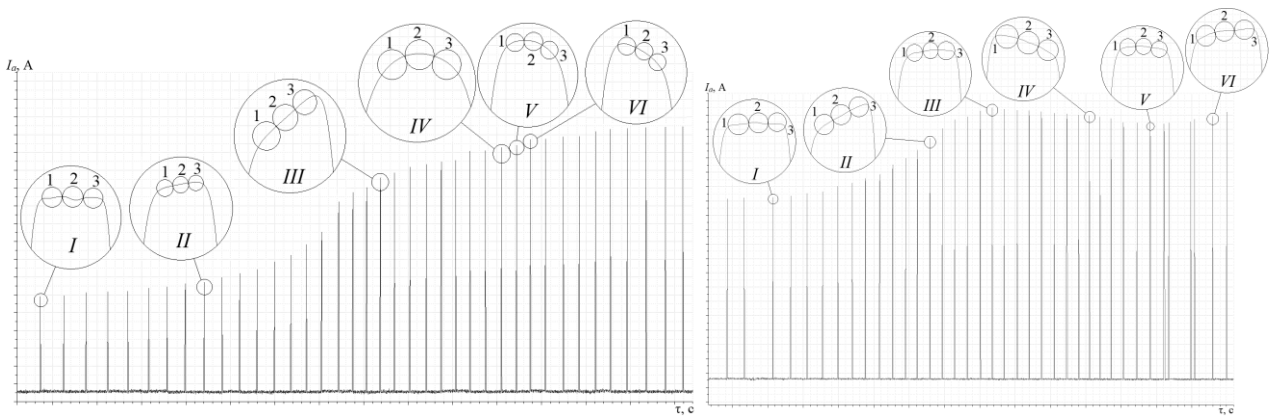


в



г

Рисунок 3 – Графики зависимостей  $I_a = f(T)$  (1) и  $dI_a/dT$  (2) при исследовании: а – арамида ПА СВ 30-1 ЭТМ; б – полиамида ПА6; в – пластика ПВХ ОМБ-60; г – полиуретана марки СКУ-7Л.



а

б

Рисунок 4 – ВЧ-импульсы (I – VI) по каналу  $I_a$  при исследовании пластика ПВХ ОМБ-60 (а) и полиамида ПА6 (б): 1-3 – фронт, центральная часть и спад ВЧ-импульса соответственно

Полученные результаты можно применить при построении системы автоматизированного управления процессами, на сегодняшний день мало исследованной, импульсной высокочастотной обработки.

Новые контролируемые параметры применены для построения новой методики управления процессом ВЧ-обработки полимерных изделий разной степени полярности, позволяющей формировать управляющие сигналы систем автоматизированного управления различными технологическими процессами высокочастотной обработки.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию нагрева технологической системы в 3D постановке на основе технологической системы, включающей изменяемое количество: электродов, изоляторов и обрабатываемых материалов.

Система уравнений, описывающая объемное распределение температуры в процессе обработки в многослойной технологической системе, представлена ниже (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{11} C_{p11}(T_{11}) \frac{\partial T_{11}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{11}(T_{11}) \frac{\partial T_{11}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{11}(T_{11}) \frac{\partial T_{11}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{11}(T_{11}) \frac{\partial T_{11}}{\partial z} \right) \\ \dots \\ \rho_{1k} C_{p1k}(T_{1k}) \frac{\partial T_{1k}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{1k}(T_{1k}) \frac{\partial T_{1k}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{1k}(T_{1k}) \frac{\partial T_{1k}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{1k}(T_{1k}) \frac{\partial T_{1k}}{\partial z} \right) \\ \rho_{21} C_{p21}(T_{21}) \frac{\partial T_{21}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{21}(T_{21}) \frac{\partial T_{21}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{21}(T_{21}) \frac{\partial T_{21}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{21}(T_{21}) \frac{\partial T_{21}}{\partial z} \right) + P_{21}(T_{21}) \\ \dots \\ \rho_{2m} C_{p2m}(T_{2m}) \frac{\partial T_{2m}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{2m}(T_{2m}) \frac{\partial T_{2m}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{2m}(T_{2m}) \frac{\partial T_{2m}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{2m}(T_{2m}) \frac{\partial T_{2m}}{\partial z} \right) + P_{2m}(T_{2m}) \\ \rho_{31} C_{p31}(T_{31}) \frac{\partial T_{31}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{31}(T_{31}) \frac{\partial T_{31}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{31}(T_{31}) \frac{\partial T_{31}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{31}(T_{31}) \frac{\partial T_{31}}{\partial z} \right) \\ \dots \\ \rho_{3s} C_{p3s}(T_{3s}) \frac{\partial T_{3s}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{3s}(T_{3s}) \frac{\partial T_{3s}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{3s}(T_{3s}) \frac{\partial T_{3s}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{3s}(T_{3s}) \frac{\partial T_{3s}}{\partial z} \right) \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\rho_i$ ,  $\lambda_i(T_i)$ ,  $C_{pi}(T_i)$  – плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость материала  $k$ -го,  $s$ -го и  $m$ -го слоя  $i$ -той группы технологической системы соответственно;  $T_i$  – температура  $k$ -го,  $s$ -го и  $m$ -го слоя  $i$ -той группы технологической системы;  $P_{2m}$  – удельная мощность  $m$ -го внутреннего источника тепла 2-ой группы технологической системы;  $\tau$  – время;  $i = 1 \dots 3$  – номер группы технологической системы: 1 – группа высокопотенциального электрода, 2 – группа внутренних источников тепла, 3 – группа низкопотенциального электрода;  $k$  – количество слоев 1-ой группы технологической системы;  $m$  – количество слоев 2-ой группы технологической системы;  $s$  – количество слоев 3-ей группы технологической системы.

Начальные условия:

$$T|_{\tau=0} = T_n, \quad 0 \leq x \leq X, \quad 0 \leq y \leq Y, \quad 0 \leq z \leq Z, \quad (2)$$

где  $T_n$ ,  $T$  – начальная и текущая температура соответственно;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – текущая координата рассматриваемого слоя технологической системы.

Здесь необходимо отметить, что разработанная математическая модель впервые была применена для имитации обработки партии деталей. При единичной обработке начальная температура слоев каждой группы технологической системы равна температуре нормальных условий. При обработке партии температура первой

заготовки (2 группа слоев технологической системы) и остальных слоев 1-ой и 2-ой группы технологической системы также равна температуре нормальных условий, а при обработке следующих заготовок температура остальных слоев 1-ой и 2-ой группы равна температуре соответствующего слоя предыдущей обработки.

Взаимосвязь между потоком тепла от твердой стенки, слоев рассматриваемых групп технологической системы, и тепловым потоком из окружающей среды соответствует граничным условиями третьего рода (3):

$$-\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=0, X} = \alpha_i \cdot \Delta T_i, \quad -\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=0, Y} = \alpha_i \cdot \Delta T_i, \quad (3)$$

граничные условия на внешних границах электродов:

$$-\lambda_{11}(T_{11}) \frac{\partial T_{11}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{11} \cdot \Delta T_{11}, \quad -\lambda_{3s}(T_{3s}) \frac{\partial T_{3s}}{\partial z} \Big|_{z=Z} = \alpha_{3s} \cdot \Delta T_{3s}, \quad (4)$$

где  $\Delta T_i$  – разница температур поверхности тела (слоя) и окружающей среды;  $\alpha_i$  – коэффициент теплообмена  $k$ -го,  $s$ -го и  $m$ -го слоя  $i$ -той группы технологической системы.

Учитывая относительно низкие температуры плавления исследуемых термопластов и высокую динамику их разогрева, при обработке первых и единичных заготовок теплообменом технологической системы с окружающей средой можно пренебречь. При моделировании обработки партии деталей используется тоже предположение, дополнительно имея ввиду низкие коэффициенты теплоотдачи обрабатываемого материала полимера и теплоизолятора – картона. Тем самым, при решении системы уравнений (1), граничные условия, описанные в уравнениях (3, 4), принимаем равными нулю.

Тепловое взаимодействие между слоями описывается граничными условиями четвертого рода, при этом на границах слоев температуры и тепловые потоки равны:

$$\begin{cases} T_j = T_{j+1} \\ \lambda_i(T_i) \frac{\partial T_j}{\partial z} = \lambda_{i+1}(T_i) \frac{\partial T_{j+1}}{\partial z} \end{cases}, \quad \text{при } z = z_j \quad (j = 1 \dots k \dots m \dots n), \quad (5)$$

где  $T_j$  – температура на границе  $k$ -го,  $s$ -го и  $m$ -го слоя  $i$ -той группы технологической системы,  $j$  – граница  $k$ -го,  $s$ -го и  $m$ -го слоя  $i$ -той группы технологической системы.

Удельная мощность  $P_i(T)$  отлична от нуля только для термопласта (2 группа слоев технологической системы), а для остальных:

$$P_1(T_1) = P_3(T_3) = 0 \quad (6)$$

На рисунке 5 представлена 3D пятислойная технологическая схема ВЧ-обработки, соответствующая изложенному выше математическому описанию.

Для разработанной математической модели определены: сходимость, степень универсальности, точность и область адекватности.

Решение (1) с учетом изложенных начальных и граничных условий реализовано методом сеток с использованием программного комплекса MSC Sinda. Расчет температурного поля технологической системы при ВЧ-сушки и ВЧ-сварке партии деталей выполнен по алгоритму, представленному на рисунке 6. Это позволило определить нецелесообразность замены изоляторов при обработке партии деталей, изолированных с обеих сторон теплоизоляционным картоном. Более того, при организации управления процессом сушки партии деталей, соответствующей симметричной технологической системе, отсутствует необходимость контроля температуры электродов и изоляторов.

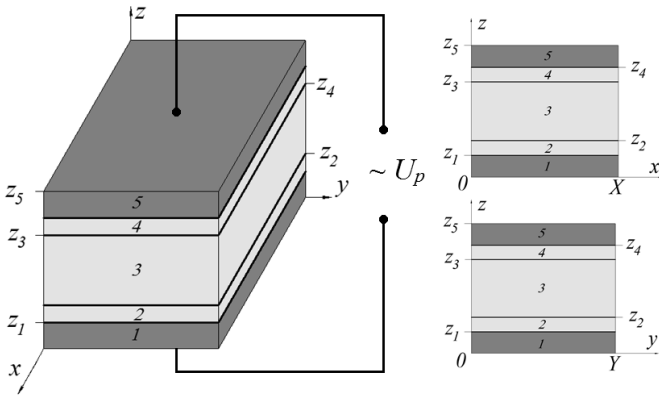


Рисунок 5 – 3D технологическая схема ВЧ-обработки, где 1-ую группу технологической системы составляют: 1 – низкопотенциальный электрод рабочего конденсатора, 2 – изолятор; 2-ую группу: 3 – обрабатываемый полимер (внутренний источник тепла); 3-ью группу: 5 – высокопотенциальный электрод рабочего конденсатора, 4 – изолятор;  $X, Y, z_i$  – координаты границ слоев;  $U_p$  – напряжение на рабочем конденсаторе.

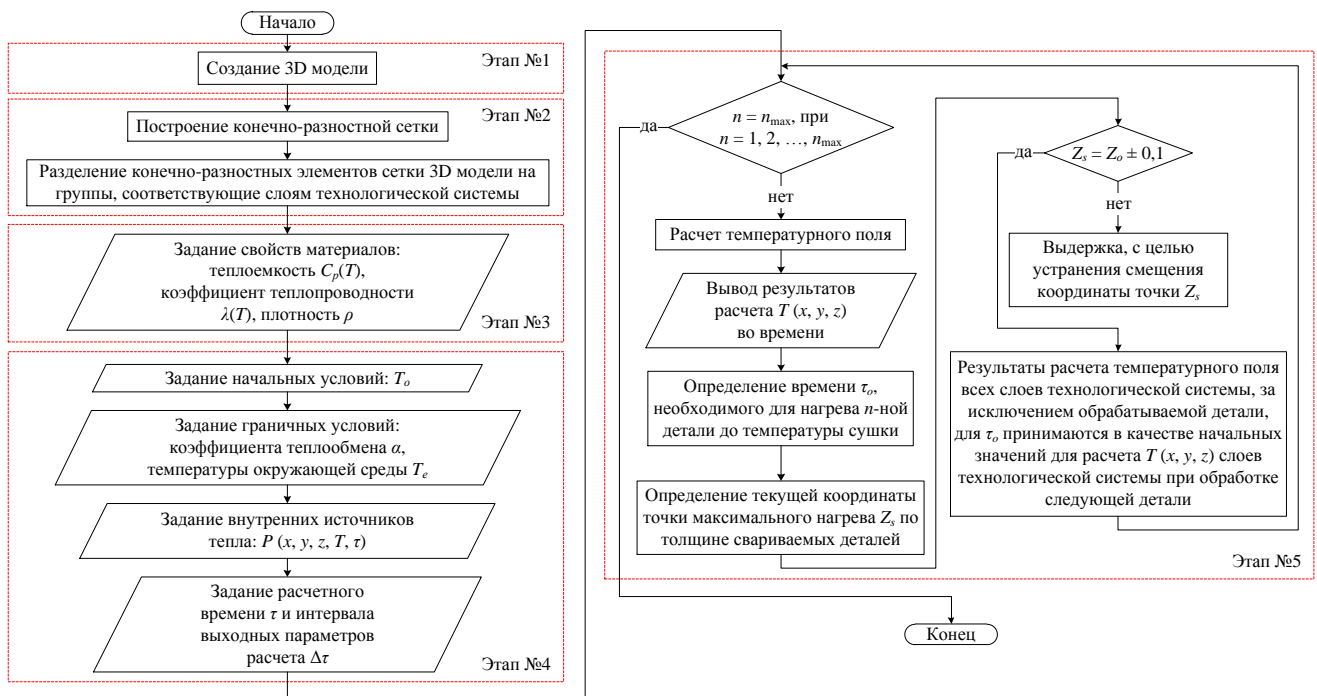


Рисунок 6 – Блок-схема расчета температурных полей при нагреве технологической системы.

Моделирование процесса ВЧ-сварки партии деталей в технологической системе с образцом из ПА6, изолированного только с одной стороны, позволило определить и оценить неоднозначное влияние нагревающегося неизолированного электрода на смещение координаты точки максимального нагрева  $Z_s$  (рисунок 7а). При последовательной обработке партии деталей при относительно низких температурах (до 55 °С) неизолированного электрода координата точки  $Z_s$  смещается в сторону изолятора. С повышением температуры неизолированного электрода направление смещения меняет свой знак.

Из этого следует, что необходимое положение координаты точки  $Z_s$  можно обеспечить следующим образом:

1. подбором материала и толщины каждого изолятора;
2. определением температуры неизолированного электрода, соответствующей необходимому смещению  $Z_s$  и последующим поддержанием данной температуры.

Представленная блок-схема расчета (рисунок 6) может дополняться требуемым количеством этапов в зависимости от задач реализуемых технологических процессов обработки.

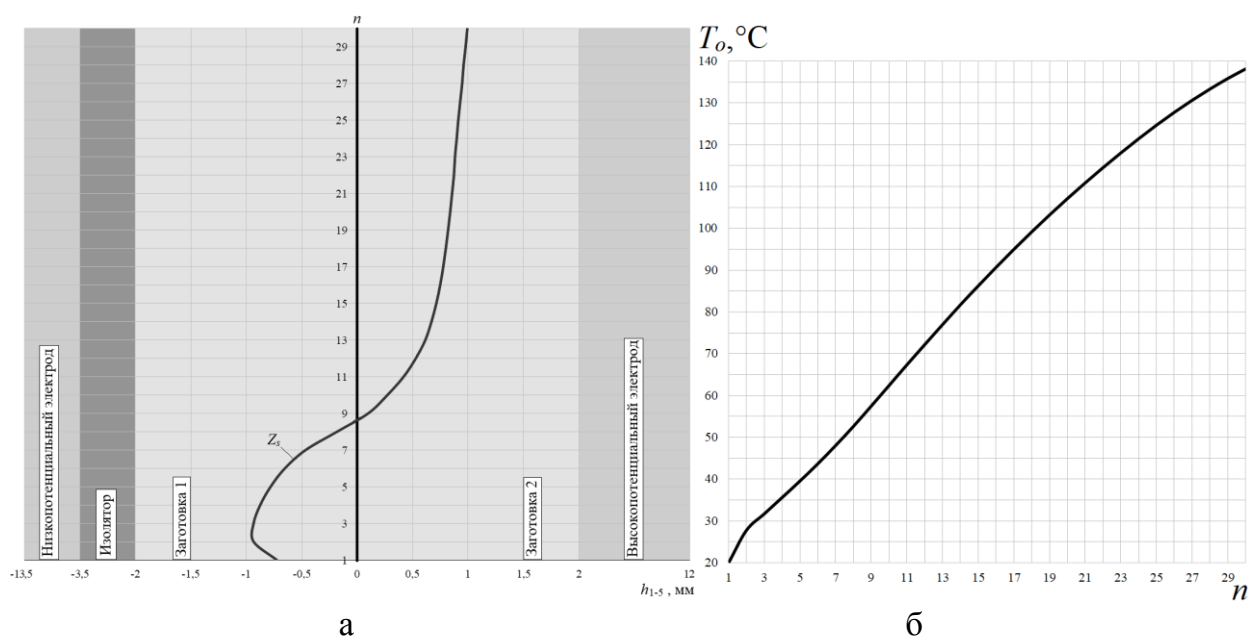


Рисунок 7 – Положение координаты точки  $Z_s$  относительно толщины свариваемых заготовок с одним изолятором (а), при последовательно увеличивающейся начальной температуре  $T_o$  неизолированного электрода (б).

**Четвертая глава** посвящена формированию на основе проведенных в предыдущих главах с использованием усовершенствованной АСНИ ВЧ исследований автоматизированной системы управления ВЧ-электротермией промышленного применения (АСУ ВЧ).

На рисунке 8 представлен разработанный алгоритм автоматизированного управления различными процессами ВЧ-обработки полимерных материалов, а на рисунке 9 схема блока автоматизации устройства реализации и управления процессами ВЧ-электротермии полимеров разной степени полярности, разработанная в рамках данной диссертационной работы.

В главе определены подзадачи формирования управляющего воздействия по разным экстремальным параметрам, включающие:

1. Выбор необходимого контролируемого параметра – анодный ток или скорость его изменения.
2. Выбор необходимого экстремума – максимум или минимум.
3. Выбор необходимого количества экстремумов – количество контрольных максимумов или минимумов.

Сформирована система управления различными технологическими процессами ВЧ-обработки, учитывающая степень полярности обрабатываемых полимерных материалов и организующая управление по следующим видам экстремумов:

- первый максимум анодного тока  $I_{a \max}$  – сушка и восстановление прочностных свойств полимерных изделий;
- первый минимум анодного тока  $I_{a \min}$  – сварка, склеивание, горячее тиснение, заварка трещин, каландрирование, прокатка и изготовление полимерных форм для высокой и глубокой печати;
- первый максимум скорости изменения анодного тока  $(dI_a/d\tau)_{\max}$  – пропитка (маслонаполнение), а также сушка и восстановление прочностных свойств полимерных материалов с низким порогом термостойкости;
- первый минимум скорости изменения анодного тока  $(dI_a/d\tau)_{\min}$  – сварка, склеивание, горячее тиснение, заварка трещин, каландрирование, прокатка и

изготовление полимерных форм для высокой и глубокой печати сильнополярных полимерных материалов таких, как полиуретан.

Также в данной главе определены подзадачи организации всех представленных процессов ВЧ-обработки.

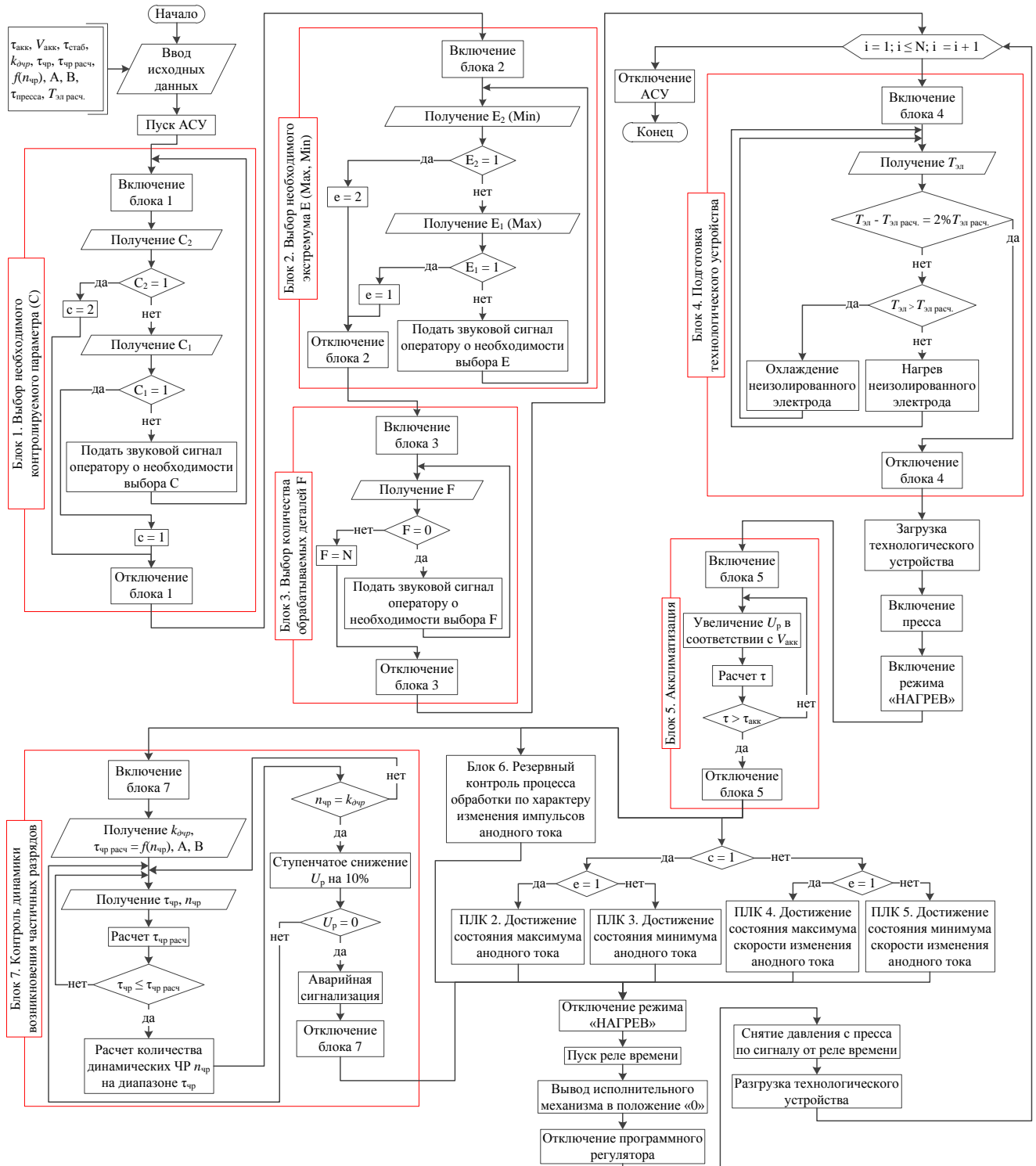


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма автоматизированного управления различными процессами ВЧ-обработки полимерных материалов разной степени полярности.

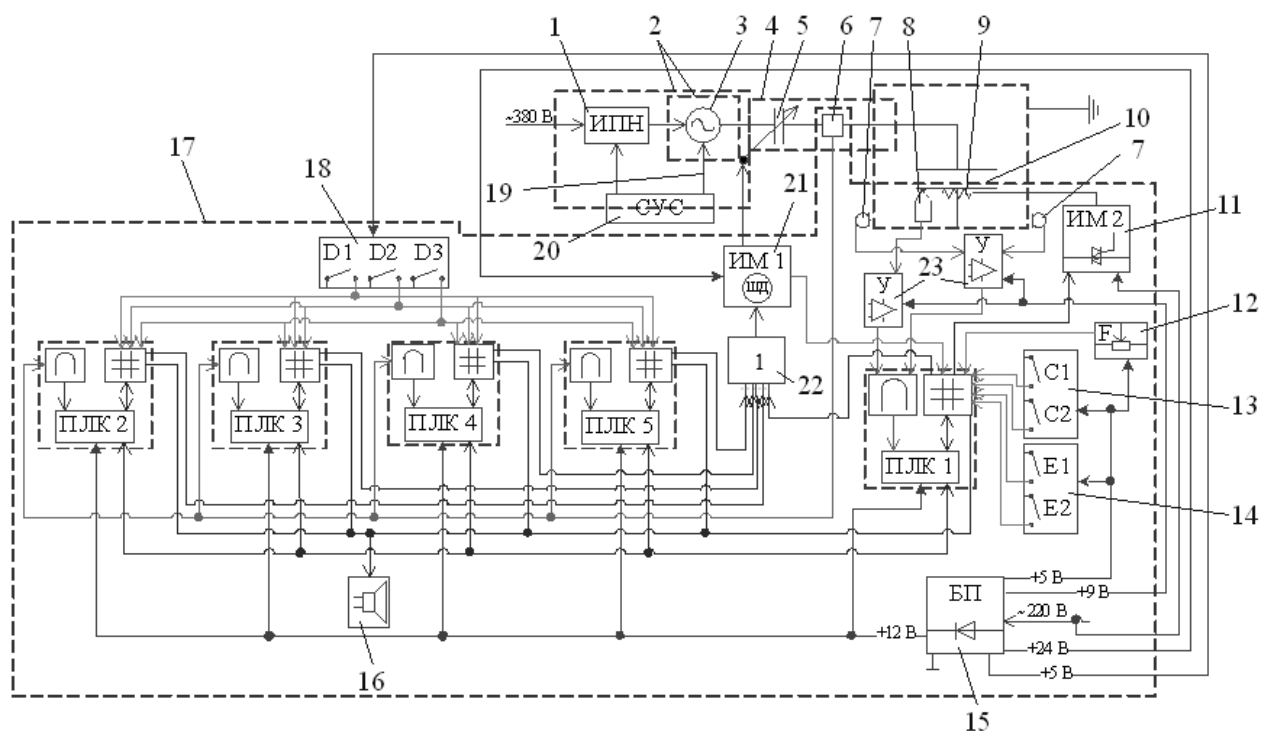


Рисунок 9 – Схема блока автоматизации устройства реализации и управления процессами ВЧ-электротермии полимеров разной степени полярности, где: 1 – источник постоянного напряжения; 2 – экранирующий корпус; 3 – высокочастотный генератор; 4 – коаксиальный кабель; 5 – переменный конденсатор; 6 – линейный токовый датчик; 7 – акустические датчики (микрофон) регистрации частичных разрядов; 8 – терморпара; 9 – нагревательный прибор; 10 – рабочий конденсатор; 11 – исполнительный механизм нагревательного прибора (ИМ 2); 12 – потенциометр, выполняющий функцию выбора количества обрабатываемых деталей в партии; 13 – панель выбора необходимого контролируемого параметра; 14 – панель выбора необходимого экстремума; 15 – блок питания; 16 – динамик, оповещающий оператора о необходимости выбора параметров обработки; 17 – блок автоматизации; 18 – панель выбора количества контрольных экстремумов; 19 – цепь управления генератором; 20 – система управления сигнализация; 21 – исполнительный механизм (ИМ 1) шагового двигателя (ШД); 22 – логический элемент «ИЛИ»; 23 – отдельные усилители для терморпары и акустических датчиков.

Результаты диссертационного исследования внедрены:

– на предприятии полиграфической отрасли (ОАО «ПОЛИГРАФИСТ» г. Иркутск) для изготовления полимерных форм для высокой печати и горячего тиснения, прессового соединения (сварки) продукции из материалов ПВХ, бесшовного склеивания корешков блоков клеевыми полиуретановыми материалами, а также сушки фотополимерных форм акцидентных работ. Внедрение АСУ с контролем фазового и релаксационных состояний полимера, автоматическим поддержанием точки максимального нагрева и температуры, необходимой для сварки и тиснения, обеспечивает качественную обработку полимерных материалов и за счет контроля релаксационных состояний приводит к снижению брака продукции с 5% до 1%. Также это позволило увеличить межремонтный период дорогостоящей штамповой оснастки. При этом годовой экономический эффект от внедрения составил 1 026 539 руб;



– в учебный процесс в курсы дисциплин «Современное материаловедение и термическая обработка», «Технологии обработки полимеров и композитов» направления подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (уровень магистратуры) и дисциплины «Процессы механической и физико-технической обработки» специальности 23.05.03 Подвижной состав железных дорог (уровень специалитета).

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

На основе проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области автоматизации процессов управления высокочастотной электротермией полимерных материалов разной степени полярности, внедрение которых обеспечивает повышение качества обработки и эксплуатационных свойств, а также вносит значительный вклад в развитие отраслей промышленности, связанных с электротермической обработкой материалов, производством, использованием полимеров. В том числе:

1. Усовершенствована аппаратно-программная часть АСНИ ВЧ, отличающаяся разделением этапов обработки материала и измерения контролируемых параметров, наличием ПИ-регулятора для обеспечения траектории нагрева, позволяющая производить контроль температурной зависимости линейного расширения полимера и построение амперометрической зависимости диэлектрических потерь от температуры в исследуемых материалах разной степени полярности.

2. Выявлены новые контролируемые параметры процесса высокочастотной обработки полимерных материалов и критерии их оценки, отличающиеся возможностью определения неявных релаксационных состояний, позволяющие реализовать поэтапное управление различными технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров разной степени полярности в соответствии с их релаксационными состояниями на основе контроля скорости изменения анодного тока ВЧ-генератора при непрерывном воздействии и анодного тока ВЧ-генератора при импульсном воздействии.

3. Разработана новая методика управления процессом ВЧ-обработки полимерных изделий разной степени полярности, позволяющая формировать управляющие сигналы систем автоматизированного управления различными технологическими процессами высокочастотной обработки, основанная на контроле момента достижения экстремальных точек скорости изменения анодного тока ВЧ-генератора и наличия экстремальной точки отдельного импульса анодного тока ВЧ-генератора.

4. Разработана математическая модель нагрева технологической системы в 3D постановке, представляющая собой систему дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла, отличающаяся трехмерной постановкой задачи (3D постановка), возможностью изменения количества слоев технологической системы и учетом температурозависимой теплопроводности, позволяющая анализировать объемный разогрев в процессе ВЧ-электротермии при обработке полимерных изделий как простой, так и сложной формы, изготовленных из широкой номенклатуры полимерных материалов.

5. Установлены закономерности влияния нагревающегося неизолированного электрода на смещение координаты точки максимального нагрева при последовательной обработке партии деталей.

6. Предложена методика смещения и поддержания зоны максимального нагрева по толщине обрабатываемых деталей, позволяющая для повышения качества обработки смещать зону расплава при сварке разнотолщинных деталей и поддерживать зону расплава в необходимом положении при сварке партии симметричных деталей.

7. Разработаны новые алгоритмы автоматизированного управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов разной степени полярности, реализованные в виде автоматизированной системы управления, отличающиеся использованием в качестве контролируемого параметра скорости изменения анодного тока, стабилизацией заданной температуры электродов, позволяющие повысить качественные и эксплуатационные свойства изделий из полимерных материалов разной степени полярности в процессе их автоматизированной высокочастотной обработки.

В качестве возможностей развития темы исследования выделим следующие направления:

1. Формирование на основе использования АСНИ ВЧ новой классификации полимерных материалов по управляемости при построении экстремальных систем.

2. Совершенствование математической модели нагрева технологической системы в 3D постановке в отношении учета теплообмена технологической системы с окружающей средой, электро-химических и химических процессов, протекающих при нагреве полимеров, а также скин-эффектов, характерных для процессов электротермии.

3. Исследование процесса импульсной ВЧ-обработки полимерных материалов.

4. Исследование влияния ВЧ-энергии на процесс пропитки полимерных изделий смазочными веществами.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК:**

1. Буторин, Д. В. Разработка методики определения структурных превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, С. Н. Филатова, А. В. Лившиц, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2015. – Вып. 4(48) – С. 80-86.

2. Буторин, Д. В. Автоматизация контроля структурных превращений в полимерных материалах при электротермической обработке / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, С. Н. Филатова, А. В. Лившиц, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2016. – Вып. 1(49) – С. 117-125.

3. Буторин, Д. В. Комплексированный метод автоматизированного высокочастотного контроля фазовых превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – Москва: Издательство "Научтехлитиздат", 2016. – Вып. 10. – С. 10-18.

4. Буторин, Д. В. Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Информационные системы и технологии. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2017. - №1 (99). – С. 44-53.

5. Буторин, Д. В. Автоматизация измерения температуры полимерного материала при высокочастотном электротермическом нагреве / Д. В. Буторин, Н. Г.

Филиппенко, А. В. Лившиц // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2017. – № 1(53). – С. 96-103.

6. 6. Буторин, Д. В. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Автоматизация. Современные технологии. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. Т. 71. - №4. – С. 171-175.

7. Буторин, Д. В. Методика расчета и проектирования технологической оснастки для высокочастотной обработки полиуретановой накладки фрикционного клина вагонной тележки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2018. – № 2(58). – С. 125-132.

**Патент и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

8. Способ определения границ фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах. Патент на изобретение №2625630 / Буторин Д. В., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Каргапольцев С. К. // Патентообладатель: ФГБОУ ВО ИрГУПС. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 17.07.2017.

9. Программный модуль обеспечения равномерного нагрева образца при функционировании автоматизированной системы научных исследований высокочастотной электротермической обработки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614765 / Буторин Д. В., Лившиц А. В., Лившиц И. А., Филиппенко Н. Г., Филатова С. Н. // Правообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.04.2015.

10. Программный модуль обеспечения исследования взаимосвязи параметров высокочастотного электротермического оборудования и электрофизических параметров полимеров. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614766 / Буторин Д. В., Лившиц А. В., Лившиц И. А., Филиппенко Н. Г., Филатова С. Н. // Правообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.04.2015.

**В других изданиях, включая сборники трудов конференций:**

11. Буторин, Д. В. Некоторые аспекты автоматизированных исследований фазовых превращений полимерных материалов / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Журнал Молодой учёный. – Казань: Изд-во Молодой учёный, №1, 2015 – С. 57-60.

12. Буторин, Д. В. Автоматизация научных исследований фазовых превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, С. Н. Филатова // Сб. статей V Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (Иркутск, 16-18 апреля, 2015 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015. – С. 169-174.

13. Буторин, Д. В. Автоматизация процесса контроля фазовых состояний полимерных материалов в поле высокой частоты / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. трудов. – Иркутск: ИрГУПС, 2015. Вып. 26. – С. 90-97.

14. Буторин, Д. В. Комплексированный метод автоматизированной высокочастотной параметрии контроля фазовых превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Седьмой международной научно-практической конференции, посвященной 355-летию со дня основания города

Иркутска, 29 марта – 01 апреля 2016 г. Иркутск: в 2 т., Т.2. – Иркутск: ИрГУПС, 2016. – С. 485-489.

15. Буторин, Д. В. Автоматизация процесса контроля структурных превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Седьмой международной научно-практической конференции, посвященной 355-летию со дня основания города Иркутска, 29 марта – 01 апреля 2016 г. Иркутск: в 2 т., Т.2. – Иркутск: ИрГУПС, 2016. – С. 467-471.

16. Буторин, Д. В. Комплексированный метод автоматизированного высокочастотного контроля фазовых превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Материалы Международной молодежной научно-практической конференции «Россия – Монголия» (г. Иркутск, Россия, 16-21 мая 2016 г.; г. Улан-Батор, Монголия, 5-10 сентября 2016 г.). – Иркутск: Издательство Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2016. – С. 155-157.

17. Буторин, Д. В. Математическое моделирование процесса высокочастотной сушки партии полимерных изделий, изолированных от электродов рабочего конденсатора с обеих сторон // Международный журнал научных публикаций «Colloquium-journal». – Голая пристань: ГРЦЗ, 2018. - №7(18). – С. 14-23.

18. Butorin, D. V. Mathematical modeling of electrothermic processes on the example of high-frequency welding of the party of polymeric products // The collection includes 7th International Conference «Recent trend in Science and Technology management» by SCIEURO in London, 27-29 July 2018. – London: SCIEURO, 2018. – P. 49-59.

19. Буторин, Д. В. Имитационное моделирование процесса высокочастотной сварки партии полимерных изделий // Сборник материалов Международных научно-практических конференции, г. Москва, 31 июля 2018 г. – М.: Центр научного развития «Большая книга», 2018. – С. 53-62.