

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

доцент А.В. Лившиц

Иркутск – 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Современное состояние и направления развития технологии обработки полимеров в транспортном машиностроении	11
1.1 Анализ современного состояния полимерной индустрии	11
1.2 Полимерные изделия и проблемы их обработки, эксплуатации и ремонта в транспортном машиностроении	12
1.3 Электротермия как наиболее прогрессивный, энергоэффективный метод обработки полимерных материалов	21
1.4 Полимеры, подверженные высокочастотному нагреву	28
1.5 Методы управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов ..	32
1.6 Анализ существующих решений по автоматизации процесса управления высокочастотной электротермией.....	37
1.7 Решения и проблемы математического моделирования высокочастотной обработки	48
1.8 Постановка цели и задач диссертационного исследования.....	53
2 Совершенствование автоматизированной системы научных исследований высокочастотной обработки.....	54
2.1 Модернизация аппаратно-программного модуля АСНИ ВЧ	55
2.2 Исследование возможностей полученной аппаратно-программной части АСНИ ВЧ	65
2.3 Практическая значимость нового контролируемого параметра – скорости изменения анодного тока.....	74
2.4 Исследование процессов импульсного высокочастотного воздействия.....	76
2.5 Совершенствование программного комплекса расчета нагрева элементов технологической системы при высокочастотной термической обработке.....	84
2.6 Выводы по главе.....	84
3 Математическая модель нагрева технологической системы в 3D постановке....	86
3.1 Математическое описание объемного нагрева технологической системы ..	86

3.2 Алгоритм расчета температурного поля при нагреве технологической системы.....	90
3.3 Проверка выполнения требований, предъявляемых к математическим моделям	98
3.4 Использование математической модели нагрева технологической системы в 3D постановке при моделировании технологических процессов	100
3.4.1 Моделирование процесса сушки партии полимерных деталей	100
3.4.2 Моделирование процесса сварки партии полимерных деталей	107
3.5 Выводы по главе.....	113
4 Автоматизация управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов с разной степенью полярности	115
4.1 Разработка автоматизированной системы управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов с разной степенью полярности	115
4.2 Проектирование блока автоматизированной системы управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов с разной степенью полярности	130
4.3 Внедрение АСУ ТП ВЧ-обработкой полимерных изделий разной степени полярности	134
4.4 Выводы по главе.....	136
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	138
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	141
ПРИЛОЖЕНИЯ	160

ВВЕДЕНИЕ

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, переработки и обработки. 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, к наиболее прогрессивным способам термической обработки полимерных деталей в настоящее время следует отнести энерго- и ресурсосберегающие технологии, связанные с методом высокочастотной (ВЧ) электротермии.

Представленная работа является продолжением научного исследования, направленного на создание теоретических и прикладных основ автоматизации управления технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров, повышение качества и эксплуатационных свойств изделий из них. 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. Существующие автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) ВЧ-электротермии ориентированы только на реализацию процессов сушки и сварки полимерных изделий, причем без учета их степени полярности и низких порогов термостойкости, наступающие у некоторых полимеров до состояния плавления. Все это ограничивает применимость ВЧ-электротермии.

Формирование новых контролируемых параметров, развитие АСУ ТП ВЧ-электротермии с учетом изложенных ограничений позволит расширить номенклатуру обрабатываемых полимерных материалов, получить новые знания об изменении их электрофизических параметров в процессе обработки, расширить применимость ВЧ-электротермии.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключалась в повышении 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.

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.

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 амперметрической 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.

Методология и методы исследования. Для решения задач диссертационной работы использовались теоретические и экспериментальные методы исследования 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.

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.

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).

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», посвященной 355-летию со дня основания города Иркутска (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.).

Работа выполнена на кафедре Автоматизация производственных процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИРГУПС) 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.

1 Современное состояние и направления развития технологии обработки полимеров в транспортном машиностроении

1.1 Анализ современного состояния полимерной индустрии

Полимерные материалы на сегодняшний день являются одними из перспективнейших материалов, используемых в различных отраслях промышленности [98]. Так, согласно статистическим данным в 2015 году мировое производство пластмасс достигло 269 млн. тонн, а уже в 2016 году составило около 335 млн. тонн. При этом лидирующие позиции занимает Китай, производящий около четверти доли от общего объема мирового производства, и Европа (60 млн. тонн), а на страны СНГ, включая Россию, приходится всего 2,6 % от мирового производства [146].

Также необходимо отметить, что и уровень поставок российских полимеров на мировой рынок весьма незначителен. В наибольших объемах экспортируется полипропилен: объем экспорта превысил в 2015 г. 390 тыс. тонн, баланс по внешней торговле впервые стал положительным (+228 тыс. тонн), доля в мировой торговле увеличилась до 1,4% с 0,4% в 2013 г. Доля других российских полимеров в мировой торговле пока составляет менее 1%, объемы поставок полистирольных пластиков в 2015 г. достигли 111 тыс. тонн, 49 тыс. тонн поливинилхлоридные (ПВХ), из которых 23 тыс. тонн – композиции, 79 тыс. тонн полиэтилентерефталатных (ПЭТ). Однако положительные тенденции есть [47]. Так, на политическом уровне проблема производства и поставок российских полимеров не стоит на месте, в связи с чем по итогам правительственного совещания по вопросу развития нефтехимической промышленности от 15 октября 2013 года Президентом РФ В. В. Путиным был подписан перечень поручений, включающий приоритетные задачи развития полимерной индустрии, одной из которых было создание собственных производств, призванных преодолеть дефицит в полимерах на внутреннем рынке, составляющий приблизительно 1,5 млн. тонн (в 2012 г. производство полимеров составило 3,5 млн. тонн, а

потребление 5 млн. тонн) [12, 98, 146], а главной целью государственной стратегии ставился переход от экспортно-сырьевой модели развития к инновационно-инвестиционной за счет увеличения глубины переработки [47]. Но, необходимо отметить, что первый вариант плана развития нефтегазохимии, принятый в 2012 г. и предполагавший превращение РФ из нетто-импортера в крупного экспортера полимеров, разошелся с реальностью, а планы дальнейшего развития были скорректированы в 2016 г. в сторону почти двукратного уменьшения [13, 47], что говорит о недостаточной готовности страны к критичным изменениям текущей рыночной ситуации.

Тем самым, выполнение поставленных стратегических задач основывается на передовых достижениях отечественной науки и техники, интенсификации производства, широком внедрении автоматизированных систем управления, что в свою очередь позволит улучшить качество выпускаемой продукции и существенно повысить эффективность производства полимерного сырья и деталей [82]. Вышесказанное в полной мере относится и к одной из базовых отраслей народного хозяйства – транспортному машиностроению.

1.2 Полимерные изделия и проблемы их обработки, эксплуатации и ремонта в транспортном машиностроении

В транспортном машиностроении полимеры, наряду с металлами, занимают одно из ведущих мест среди конструкционных материалов. Прежде всего, это объясняется возможностью удешевления продукции, также улучшаются и технико-экономические параметры изделий: уменьшается масса, повышаются долговечность, надежность и др. В результате внедрения полимеров высвобождается металлоемкость изделий. Согласно общеизвестных данных среднее значения коэффициента использования пластмасс примерно в 2 раза выше, чем для металлов.

В источнике [124] приведено большое многообразие полимерных деталей применяемых в машиностроении, включая и транспортное (рисунок 1).

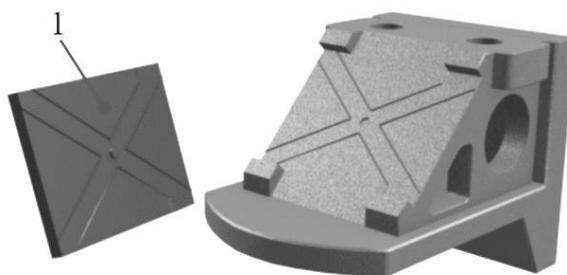


Рисунок 3 – Износостойкая полиуретановая накладка фрикционного клина вагонной тележки

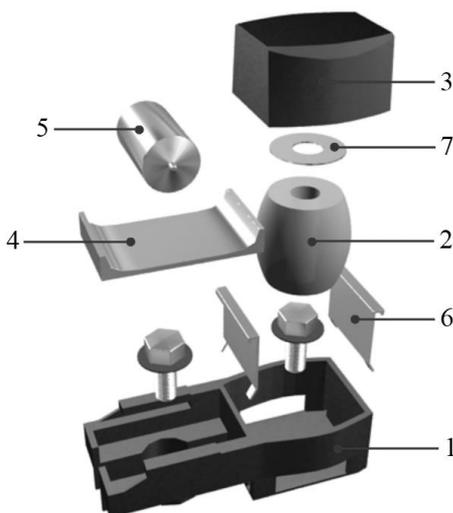


Рисунок 4 – Упруго-катковый скользун тележки:

1 – корпус; 2 – упругий элемент (демпфер); 3 – колпак (3); 4 – вкладыш; 5 – ролик; 6 – два сменных износостойких элемента; 7 – регулировочные прокладки

В ряде стран (США, Канаде, Англии, Индии, странах Латинской Америки, Азии и Австралии) с 2003 года проводится массовое тестирование пластмассовых шпал (рисунок 5), которое показало высокую эффективность и долговечность их использования, значительно превышающую аналогичные показатели деревянных, а по стоимостным показателям – бетонных. Большой интерес к пластмассовым шпалам проявляют железнодорожные компании зарубежных стран с тропическим климатом, таких как Индия, Таиланд и Филиппины. В Японии уже используют композитные шпалы из пенополиуретана со стекловолокном – такой состав уменьшает шум во время движения поездов.

Таблица 1 – Применение полимеров в изделиях железнодорожного транспорта Западной Европы [117]

Наименование изделия	Полимерный материал
Опорные прокладки платформ железнодорожного транспорта, регулирующие скользящее давление между каркасом платформы и муфтой цапфы	Литьевой полиамид 6 (ПА6), наполненный MoS ₂
Вкладыши и упорные шайбы, установленные на поворотной оси, основания грузоподъемного механизма, который используется для загрузки и разгрузки составляющих железнодорожного полотна	
Рельсовые соединения для электроизоляции между участками пути	Литьевой полиамид 6 (ПА6) (аналог капролона)
Изоляционные втулки для тормозной тяговой системы, регулирующие колебательные движения тормозных колодок	Полиэтилентерафталат
Изоляционные втулки тормозных колодок железнодорожного транспорта	
Упор на электромагнитном тормозе тележки поезда	Полиоксиметилен
Опоры скольжения для транспортировки рельс	Сверхвысокомолекулярный полиэтилен
Скользкие подкладки (башмаки) и фиксирующие блоки, используемые и при транспортировке неисправных локомотивов	Литьевой полиамид 6 (ПА6), наполненный жидкими смазочными материалами



Рисунок 5 – Композитные шпалы из пластика вторичной переработки производства компании "АКСИОН РУС"

Кроме всего прочего, избавление от деревянных и внедрение пластмассовых шпал решает проблемы сохранения окружающей среды и использования полимерных отходов. Пластиковые шпалы по сравнению с деревянными имеют лучшие механические свойства, они приносят значительный экономический эффект. Несмотря на то, что полимерные шпалы вдвое дороже – они стоят около 60 долларов, в то время как дубовые стоят 30-35 долларов, тем самым за счет увеличения времени их эксплуатации в два или три раза экономия при использовании полимерных шпал составляет 140 долларов на одно изделие [26].

Для автомобилей в автомобилестроении из полимерных материалов изготавливают кузова и кабины автомобилей, их отдельные крупногабаритные детали, различные малогабаритные детали конструкционного и декоративного назначения, а также теплоизоляционные и звукоизоляционные детали и др. (рисунок 6). В таблице 2 представлены рекомендации по выбору полимеров для изготовления различных узлов и деталей в автомобилестроении, отражающие и подтверждающие востребованность полимеров в рассматриваемой отрасли машиностроения.

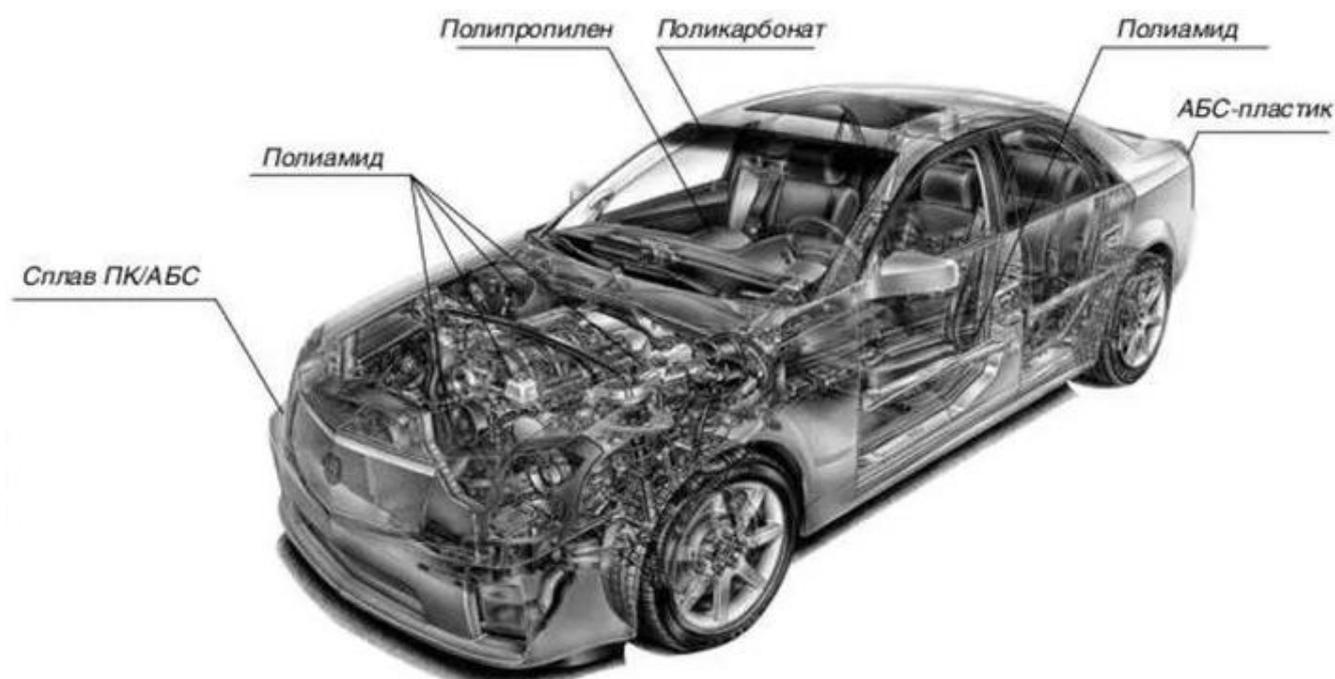


Рисунок 6 – Применение полимеров в автомобилестроении

В авиастроении полимеры также играют заметную роль. Уже существуют планеры и легкие самолеты, изготовленные почти полностью из стеклопластика. Причем интерес к самолетам, изготовленным почти целиком из пластмасс, вызван не только значительным уменьшением массы самолетов (до 50%), что позволяет существенно увеличить их полезную нагрузку и дальность полетов, а также и их минимальной доступностью для обнаружения радиолокаторами.

В 2014 году Иркутский авиазавод (филиал НПК «Иркут») начал сборку первых опытных образцов самолёта МС-21-300. Его конструкции также содержит множество деталей изготовленных из углепластиковых и стекловолоконных композиционных материалов (рисунок 7).

МС-21 КООПЕРАЦИЯ

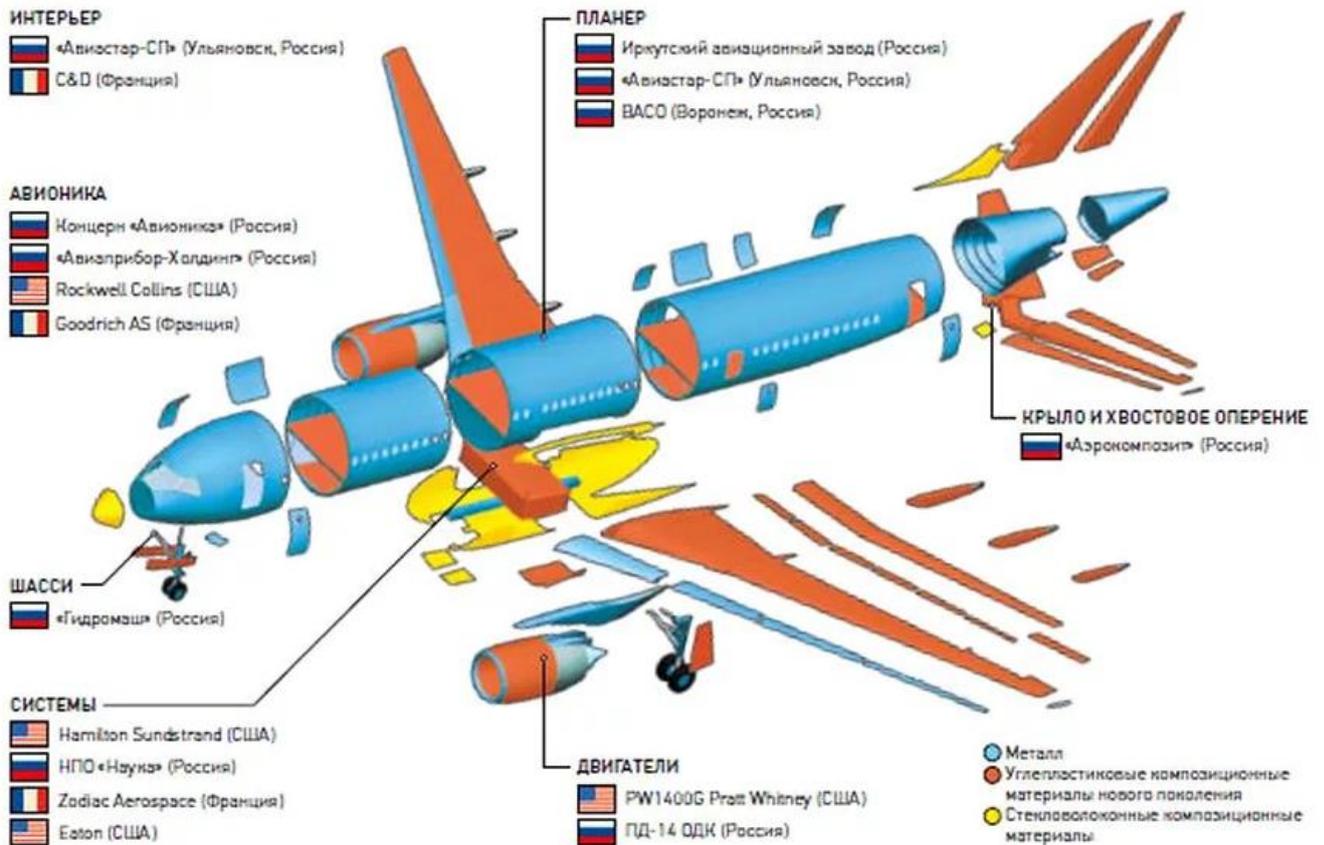


Рисунок 7 – Распределение материалов в конструкции нового российского пассажирского самолета МС-21

При этом наряду с достоинствами полимерных материалов, обеспечивающими их широкое потребление в транспортном машиностроении, данный класс материалов имеет и ряд существенных недостатков, влияющих на эксплуатационные характеристики полимерных изделий. Так в работе [121] автор привел анализ влияния сезонных условий эксплуатации полимерных деталей на примере полиамидных сепараторов буксовых подшипниковых узлов. На основе проведенного анализа автор выявил критические комбинации влажности и температуры, приводящие к снижению твердости и ударной вязкости с последующей отбраковкой полиамидных сепараторов (рисунок 8).

Также автор определил годовые сезоны эксплуатации, при которых происходит увеличенное трещинообразование для различных регионов хранения

и эксплуатации. В ходе изготовления образцов в партии сепараторов автором [121] был обнаружен заводской брак (рисунок 9), идентифицированный как литьевой при выполнении операции литья под давлением. Причем, обзор технологии производства полиамидных сепараторов показал, что на заводе изготовителе наличие этих дефектов не контролируется и изделия с браком такого типа поставляются на ремонтные предприятия ОАО «РЖД».

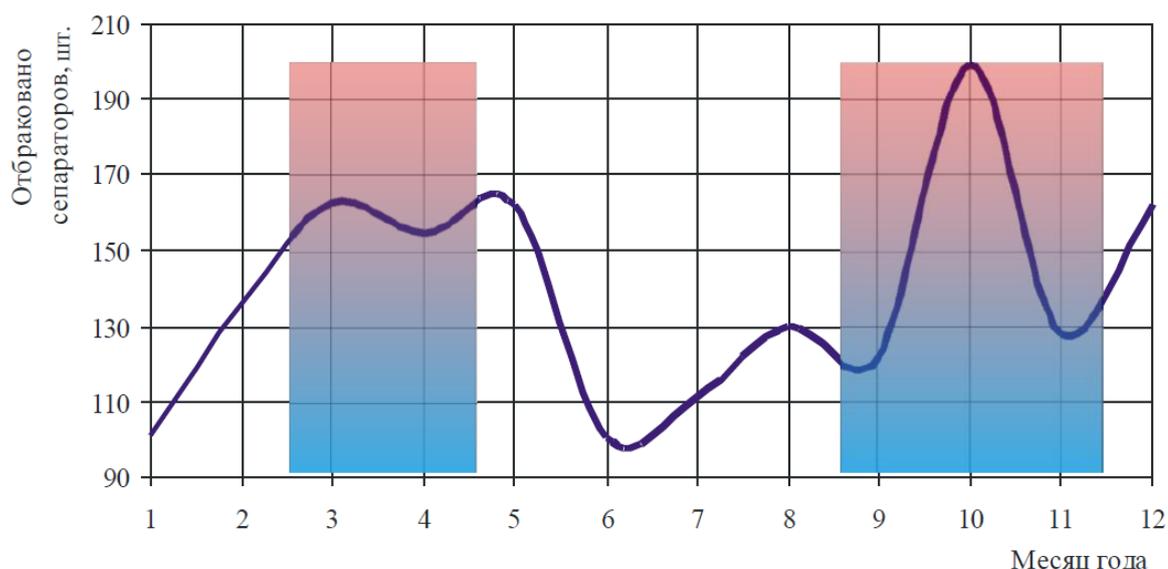


Рисунок 8 – Статистические данные отбраковки полиамидных сепараторов



Рисунок 9 – Заводской брак в полиамидном сепараторе

В работах [19-22] авторы рассматривают проблемы литья полимеров под давлением и приводят анализ причин возникновения различных дефектов литьевых полимерных изделий, большинство из которых связаны с неустойчивым заполнением литейных форм, недоливом, спаями и недостаточным уплотнением.

Поэтому, для оптимального производства, обработки, ремонта и применения деталей из полимерных материалов необходимо учитывать их как положительные, так и отрицательные характеристики, влияющие на эксплуатационные свойства конечных полимерных изделий.

1.3 Электротермия как наиболее прогрессивный, энергоэффективный метод обработки полимерных материалов

На сегодняшний день промышленность уже насчитывает большое количество способов обработки и переработки полимеров, включающие [18, 27, 104, 105]:

- формирование непрерывных изделий – каландрирование, прокатка, экструзия, протягивание, пропитка, окраска и т. д.;
- формирование дискретных изделий – прессование (холодное, горячее, литьевое, штамповка), формование (пневмовакуумное, выдувное, центробежное, ротационное) и т. д.;
- формирование изделий из полуфабрикатов – сварка, горячее тиснение, склеивание, металлизация, напыление, фотохимическая обработка, трафаретная печать, термическая обработка, механическая обработка.

Совершенно очевидно, что каждый вид обработки из представленного перечня имеет свои особенности, тонкости, но при этом они также включают в себя и общую, а для большинства из них основную, операцию – нагрев полимера до эффективных температур обработки. При правильной организации данной операции появляется возможность управления технологическими, механическими и электрофизическими свойствами полимеров.

При этом важное значение имеет рациональный выбор источника нагрева, влияющего на скорость и эффективность протекающих процессов [90, 91, 158].

В мировой практике существует множество различного оборудования для тепловой обработки разных материалов, изделий, веществ, принцип работы которых сводится к узкому ряду способов нагрева [116]. Так одним из них

является *контактный* нагрев, при котором объект нагрева получает тепло от горячей поверхности и передает его к внутренним слоям за счет своих температурных характеристик (теплопроводности). Данный способ весьма прост в организации, хорошо управляем и применим для большинства существующих технологических процессов тепловой обработки и абсолютно для любого полимерного материала, но только для изделий малой толщины. Иначе нужно значительно повышать время контакта поверхности изделия с источником тепла, что приведет к необратимому ухудшению качества продукции, а для некоторых материалов – деструкции (поливинилхлорид уже начинает распадаться гораздо ниже своей температуры плавления [110]), и также снижению производительности оборудования [17, 68, 132, 158].

При *конвективном* способе нагрев происходит за счет конвективной теплопередачи от нагретого воздуха [17, 68, 91, 132, 158, 159], что пагубно сказывается на перемещение влаги к поверхности материала, поскольку воздействие температуры в данном способе противоположно направлению градиента влагосодержания [82].

Кроме того, необходимо отметить, что размер и объем конвективного пространства должен значительно превышать размер и объем обрабатываемого изделия. Так, самым распространенным оборудованием, работающим по конвективному принципу, является муфельная печь. При экспериментальном исследовании влияния конвективного потока на конструкционные свойства полиамидного сепаратора буксового узла грузового вагона, изготовленного из стеклополиамида (армамид ПА СВ-30-ЭТМ) [49], был получен неудовлетворительный результат (рисунок 10), который объясняется неравномерным распределением градиента температур внутри камеры.

Значение температуры в верхней точке камеры соответствует самому высокому показателю, а в области загрузочной дверцы он самый низкий. Все это привело к неравномерному разогреву полиамидного сепаратора и при средней температуре печи, не превышающей температуру плавления (218-220 °С [54, 66]), у верхней поверхности был получен расплав сепаратора.



Рисунок 10 – Результат сушки стеклонаполненного полиамидного сепаратора в муфельной печи модели ПМ-14М1П-1250Т

Исходя из вышеизложенного, конвективный нагрев применительно к полимерным материалам малоэнергоэффективен, кроме того, он обладает большой инерционностью, и, следовательно, плохой управляемостью [51].

Еще один способ нагрева – *радиационный* (инфракрасный) – нагрев материалов электромагнитным излучением с длиной волны 0,77-340 мкм. При радиационном нагреве к материалу подводится тепловой поток в десятки раз мощнее, чем при конвективном нагреве. Главной особенностью данного способа является его зависимость не столько от скорости передачи тепла, сколько от скорости перемещения влаги внутри материала. При этом также, для ускорения нагрева необходимо, чтобы инфракрасные лучи (ИКЛ) проникали в нагреваемый материал на достаточную глубину, что, в свою очередь, зависит от пропускной способности этого материала и от длины волны ИКЛ: чем меньше длина волны ИКЛ, тем выше их проникающая способность [68, 82]. Данный способ нагрева применим для обработки непрозрачных полимерных материалов с высокими диэлектрическими характеристиками (полиэтилен, полистирол, фторопласт).

В работах [68, 82] отмечается пагубное влияние радиационной сушки материалов с малой проницаемостью, при котором в следствии быстрого высушивания поверхностного слоя и высоких градиентов температуры и влажности внутри материала происходит растрескивание изделия.

Для повышения эффективности и экономичности процесса, а также снижения расхода электроэнергии применяют также *комбинированные* способы нагрева. К таким способам относятся следующие различные комбинации: конвективно-высокочастотная, радиационно-высокочастотная, радиационно-конвективная, радиационно-контактная и др. [68, 82].

В работе [129] автор исследовал влияние контактно-высокочастотного нагрева на время сварки изделия и распределение в нем температуры. В результате, предварительный разогрев материала от горячей оснастки, как утверждает автор [129], несколько уменьшил время сварки, но при этом практически не изменил распределения температуры. Несколько забегаю вперед, отмечу, что данное утверждение было опровергнуто. В рамках настоящей работы было проведено исследование влияния температуры подогреваемого электрода на процесс высокочастотной сварки полимеров, при котором было выявлено значительное смещение точки плавления. Подробное описание проведенных исследований изложено в третьей главе данной работы.

При тепловой обработке материалов подверженных воздействию высоких температур широко применяется *вакуумная* обработка, преимуществом которой является низкая температура протекающих процессов, в отличие от обработки в атмосферных условиях. Так, например, при вакуумной сушке скорость процесса повышается, поскольку испаряемая влага прямо пропорциональна разности давлений водяных паров у поверхности обрабатываемого материала и в окружающем пространстве [68]. Также необходимо отметить, что данный способ малоинертен из-за отсутствия потерь тепла с уходящим воздухом. Это существенно повышает экономичность процессов. Но, между тем, в работе [82] автор отмечает и негативные факторы вакуумной обработки, связанные с

дороговизной вакуумного оборудования и большой длительностью процесса сушки до остаточной влажности (2,5%-3,5% – 4-16 часов).

В работе [158] проводился сравнительный анализ различных способов нагрева полимерных материалов применительно к процессам сушки и термообработки, и при этом автор доказала, что наиболее прогрессивным способом нагрева материала для рассматриваемых видов обработки является нагрев диэлектрика в поле токов высокой частоты (ТВЧ).

Нагрев полимерных материалов в поле токов высокой частоты (*диэлектрический* нагрев) происходит за счет релаксационно-поляризационных процессов, обусловленных смещением под воздействием поля электрических зарядов и связанных с ними молекул, что приводит к выделению тепловой энергии внутри диэлектрика, т. е. источником тепла является сам объект нагрева [8, 9, 50-52, 70, 103, 118, 157].

Одним из основных достоинств рассматриваемого способа является большая скорость протекающих процессов, обеспечивающая практически безинерционный равномерный прогрев изделия по всему объему до эффективных температур обработки, причем даже прогрев материалов, обладающих плохой теплопроводностью.

В зависимости от применяемого диапазона частот (таблица 3) диэлектрический нагрев подразделяется на высокочастотный (ВЧ) и сверхвысокочастотный (СВЧ). При этом также необходимо отметить, что к промышленному применению разрешен лишь малый ряд частот (таблица 4) [14, 50, 79].

Таблица 3 – Классификация радиочастот

Частоты	Высокие частоты (ВЧ) 100 кГц — 30 МГц			Сверхвысокие частоты (СВЧ) 300 МГц—300 000 МГц (микроволны)		
	Длинные 3 км - 1 км	Средние 1 км - 100 м	Короткие 100 м - 10 м	Дециметровые 1 м - 10 см	Сантиметровые 10 см - 1 см	Миллиметровые 1 см - 1 мм
Длины волн						

Таблица 4 – Разрешенные к использованию диапазоны частот

Частота f , МГц	Диапазоны частот	Частота f , МГц	Диапазоны частот
0,44	СЧ	152,5	ОВЧ
0,88	СЧ	300	ОВЧ
1,76	СЧ	433,92	УВЧ
5,28	ВЧ	866	УВЧ
13,56	ВЧ	915	УВЧ
27,12	ВЧ	2375	УВЧ
40,68	ОВЧ	2450	УВЧ
81,36	ОВЧ	5800	СВЧ

Упрощенно процесс воздействия ВЧ- и СВЧ-энергии на диэлектрик можно представить в виде схемы, приведенной на рисунке 11.

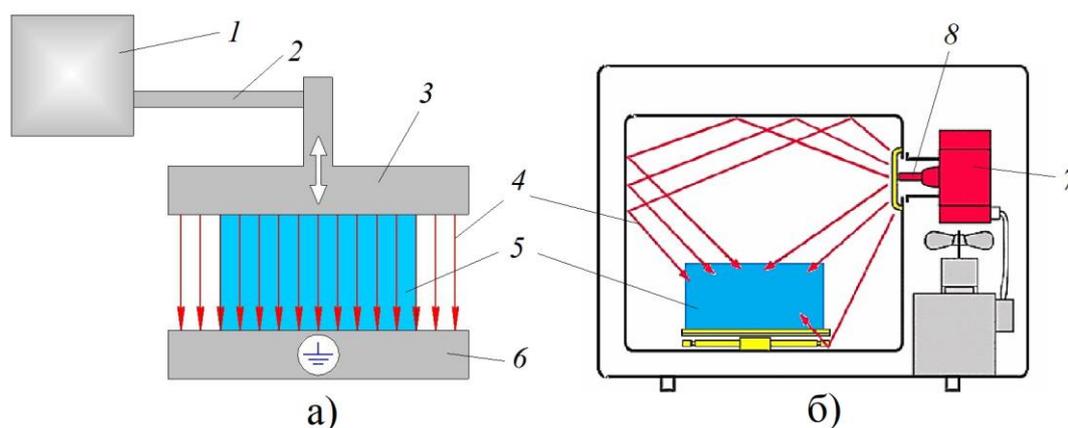


Рисунок 11 – Схема воздействия ВЧ- (а) и СВЧ-энергии (б) на полимерный диэлектрик, где: 1 – высокочастотный генератор; 2 – коаксиальная линия передачи ВЧ-энергии; 3 – подвижная высокопотенциальная плита рабочего конденсатора; 4 – поток электромагнитного излучения; 5 – нагреваемый объект; 6 – низкопотенциальная плита рабочего конденсатора; 7 – СВЧ-генератор (магнетрон); 8 – СВЧ-волновод

Как и любой другой способ нагрева, использование электротермии СВЧ и ВЧ диапазонов имеет свои достоинства и недостатки, при этом в ряде работ [79, 82, 84, 85, 129, 151, 158] многократно обосновывалось и экспериментально

подтверждалось, что ВЧ-электротермия, за счет высокой интенсивности и избирательности воздействия, равномерности разогрева диэлектрика по всему объему, саморегулируемости и сравнительно большой глубины проникновения электромагнитной волны (ЭМВ) в обрабатываемый объект, является наиболее предпочтительным и эффективным способом нагрева широкого круга полимерных материалов.

Более того, в работах [79, 150, 151] авторы расчетно-экспериментальным путем определили оптимальную частоту (27,12 МГц) проведения технологических процессов ВЧ-обработки, при которой происходит максимальное и равномерное воздействие по всей глубине диэлектрического материала. Более того, принимая во внимание разнообразность формы полимерных изделий, ВЧ-электротермия также позволяет равномерно нагреть разнотолщинный профиль полимерной детали, но для этого требуется изменение конфигурации электродов (технологической оснастки) рабочего конденсатора [43, 79].

Также, необходимо отметить, что ВЧ-электротермия применима для различных видов обработки: термическая обработка с целью восстановления прочностных свойств [121, 123], сушка [2, 7, 50, 82, 85, 107, 151], сварка [82, 85, 106, 129, 130, 140, 141, 143, 151], горячее тиснение [85, 151], склеивание, прессование [107], напыление [120], диагностика [76-79], каландрирование, прокатка, экструзия, также интересно рассмотреть процесс пропитки полимерных материалов моторными маслами в ВЧ-поле.

Тем самым, для дальнейшей работы в рамках настоящего диссертационного исследования был определен наиболее прогрессивный, энергоэффективный метод обработки полимерных материалов – высокочастотная электротермия, и основываясь на результатах работ моих предшественников была выбрана частота ВЧ-воздействия равная 27,12 МГц.

Но при всем этом, необходимо отметить, что не все полимерные материалы восприимчивы к ВЧ-воздействию, и поэтому следующим этапом работы было определение перечня полимеров, подверженных высокочастотной обработке.

1.4 Полимеры, подверженные высокочастотному нагреву

Для определения перечня полимерных материалов, подверженных высокочастотному нагреву, прежде всего, необходимо рассмотреть факторы, определяющие способность диэлектрика нагреваться в переменном электромагнитном поле.

Как было отмечено ранее нагрев полимерного диэлектрика при электротермической обработке происходит за счет поляризационных процессов, сопровождающихся рассеянием энергии в обрабатываемом материале.

Так по степени рассеяния энергии в полимерах различают два основных вида поляризации: электронная / ионная (без рассеяния энергии) и релаксационная (с рассеянием энергии) [28, 69, 71, 91, 103, 133]. А определяющим фактором поляризации является степень полярности полимерных материалов, зависящая от величин диэлектрической проницаемости ϵ' и диэлектрических потерь.

При этом, в ряде работ [88, 103, 133, 138] по механизмам поляризации молекул авторы подразделяют все полимеры на полярные, обладающих постоянным дипольным моментом, и неполярные диэлектрики с нулевым дипольным моментом. В работе же [73] автор утверждает, что все полимеры в зависимости от величины ϵ' можно условно разделить на неполярные ($1,8 < \epsilon' < 2,3$), малополярные ($2,3 < \epsilon' < 3,0$), полярные ($3,0 < \epsilon' < 4,0$) и сильнополярные ($\epsilon' > 4,0$). И объясняет это тем, что электрические свойства полимерных диэлектриков (удельное электрическое сопротивление, электрическая прочность, диэлектрическая проницаемость и потери) сильно зависят от внешних условий – влажности, температуры, степени ионизирующих загрязнений окружающей среды, силы тока, напряженности электрического поля и т. д.

Действительно, при нагреве полимера его ϵ' претерпевает неодинаковые изменения (рисунок 12). Так нагрев малополярных полимеров (полипропилен ПП, полистирол ПС) до температуры стеклования T_c отражает почти равномерное

снижение ε' , а при температуре перехода в высокоэластичное состояние снижение ε' усиливается, отчего температурная зависимость $\varepsilon'(T)$ приобретает форму близкую к ступенчатой. При нагреве же сильнополярных диэлектриков (ацетат целлюлозы АЦЭ) ε' имеет увеличивающийся характер.

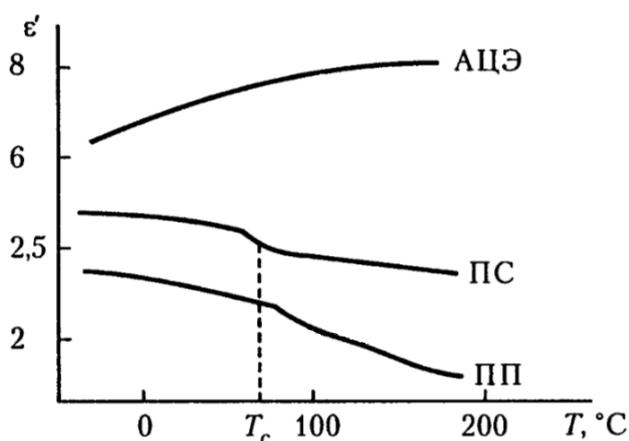


Рисунок 12 – Зависимость ε' некоторых диэлектриков от температуры

Помимо этого, в работах [71, 158] были выявлены и изложены общие закономерности ВЧ-электротермии, одной из которых является то, что обрабатываемый в ВЧ-поле материал должен быть диэлектриком или содержать в себе вещество, обладающее свойствами диполя, например, воду. Так и в работе [82] автор утверждает, что при замещении в неполярных полимерах некоторых частей водородных атомов атомами полярных веществ получают полярные полимеры. Так для увеличения интенсивности разогрева, при сушке древесных отходов, их достаточно увлажнить. Более того, необходимо отметить, что нагрев высушенных мест в данном процессе автоматически прекратится, поскольку тангенс угла диэлектрических потерь таких материалов, как древесина, прямо пропорционален влажности, поэтому с уменьшением влажности в процессе сушки потери энергии уменьшаются (рисунок 13), а нагрев продолжается только в тех участках материала, в которых еще сохранилась повышенная влажность [4, 50].

Исходя из изложенного можно сделать вывод, что технологии ВЧ-обработки применимы для полимерных материалов как с высокими значениями ε'

(малополярные, полярные и сильнополярные), так и низкими значениями (неполярные).

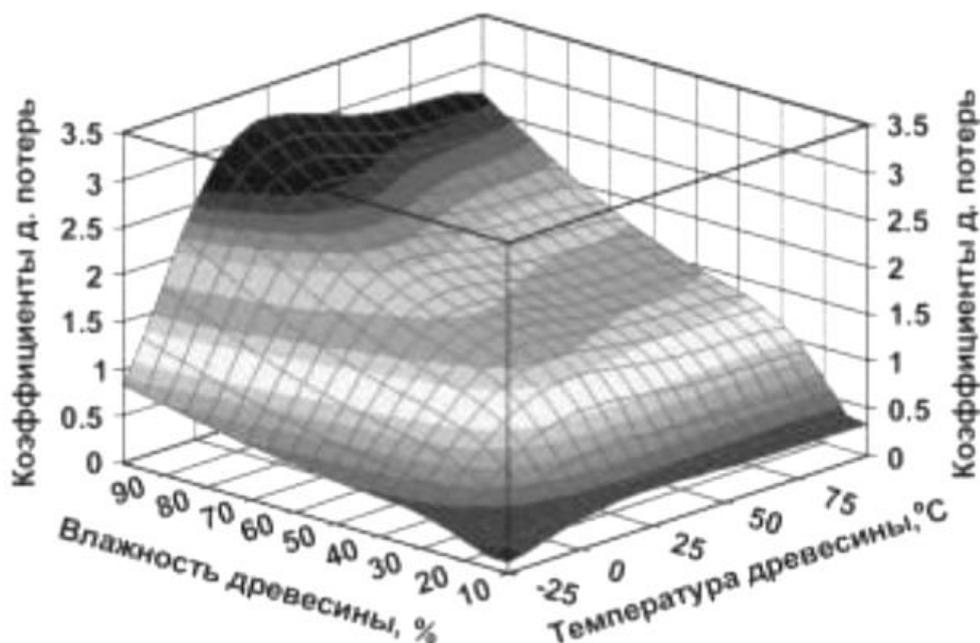


Рисунок 13 – Зависимость коэффициентов диэлектрических потерь березовой древесины от температуры и влажности при ее сушке на частоте 915 МГц

Другим важным параметром, определяющим степень рассеяния энергии электрического поля (диссипация) в полимере, т. е. возможность его нагрева в ВЧ-поля, являются диэлектрические потери [138], а применительно к высокочастотному нагреву ее называют полезной тепловой энергией [52]. Для характеристики данного параметра используют тангенс угла диэлектрических потерь – $tg\delta$, определяемый углом диэлектрических потерь δ , который дополняет до 90° угол смещения по фазе тока в цепи конденсатора относительно напряжения. При этом, чем больше рассеиваемая в диэлектрике энергия, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его тангенс $tg\delta$ [28, 51, 55, 91, 94, 158].

Для общей характеристики диэлектрических потерь величины ϵ' и $tg\delta$ связывают коэффициентом диэлектрических потерь ϵ'' (фактор поглощения энергии [52]) в следующую зависимость (1):

$$\epsilon'' = \epsilon' tg\delta. \quad (1)$$

А для определения мощности, рассеивающейся (выделяющейся) в единице объема полимерного диэлектрика в виде тепла, используется фундаментальная зависимость, описываемая следующей формулой [51, 56, 70, 102, 103, 139, 148]:

$$P_{уд} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''(T) E^2 = 0,55 \cdot 10^{-12} f E^2 \varepsilon''(T), \quad (2)$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность диэлектрических потерь, Вт/м³; f – частота электрического поля, Гц; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; E – напряженность электрического поля, В/м.

Таким образом, количество выделяющейся в полимере полезной энергии зависит от частоты изменения электрического поля, напряженности и от уже отмеченных ранее электрофизических свойств полимерного диэлектрика (ε' , $tg\delta$), при этом величина $tg\delta$ формируется исходя из физической структуры, химического строения, агрегатного, фазового и релаксационного состояний материала [73]. Для понимания последнего необходимо рассмотреть характер изменения $tg\delta$ в процессе дипольно-релаксационной поляризации, протекающей при ВЧ-обработке диэлектриков.

В температурной зависимости $tg\delta$ полимеров может наблюдаться несколько максимумов α , β , γ , δ (рисунок 14), это объясняется тем, что при ВЧ-воздействии для сегментов макромолекул полимера, их ответвлений, боковых и отдельных групп атомов характерен дипольный электрический момент, выражающийся в независимых колебательных движениях, соответственно и диэлектрические потери будут носить различный характер, зависящий от размеров сегментов и атомов, и собственной частоты их колебательных движений [10, 73, 138].

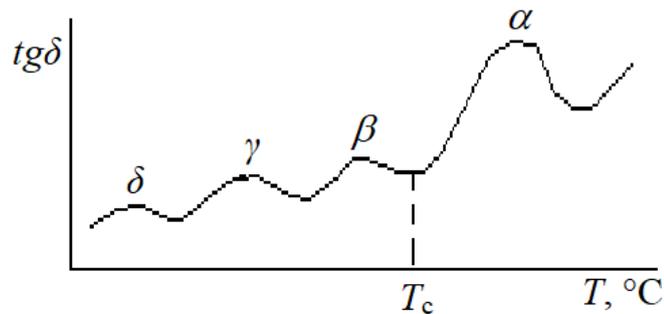


Рисунок 14 – Общее схематическое отображение зависимости $tg\delta$ для полимерного диэлектрика от температуры

Так при температуре выше температуры стеклования T_c возникают колебательные движения сегментов макромолекул полимера, характеризующиеся дипольно-сегментальными потерями (α), а ниже T_c у полярных полимеров наблюдается несколько изменений ориентации полярных групп, описываемых дипольно-групповыми потерями (β, γ, δ).

В работах [58, 82] отмечается значительный практический интерес $tg\delta$, поскольку он является наиболее информативной характеристикой применимой для управления процессами ВЧ-электротермии полимеров. Так область максимума (α) дипольно-сегментальных потерь температурной характеристики $tg\delta$ соответствует высокоэластичному состоянию и в ряде работ [82, 121, 151] авторы организуют технологический процесс высокочастотной сушки по моменту достижения в обрабатываемом материале данного температурного перехода.

Исходя из вышеизложенного следует, что основными факторами, определяющими способность полимера нагреваться в ВЧ-поле, являются величины ε' и $tg\delta$ обрабатываемых материалов, причем этот материал может быть и неполярным, но с наличием полярных примесей.

1.5 Методы управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов

В открытой печати имеется ряд работ [5, 29, 56, 57, 72], повествующий о возможности контроля, а для некоторых случаев и управления, процесса ВЧ-электротермии по параметрам напряжения на рабочем конденсаторе и анодного тока (параметр работы ВЧ-генератора электротермического оборудования), времени ВЧ-обработки и расчетной температуре плавления обрабатываемого материала. Но практически все эти методы базируются на управлении по предварительно рассчитанной примерной, прогнозируемой (исходя из электрических параметров работы электротермического оборудования) температуре обработки в зависимости от времени и мощности ВЧ-воздействия на конкретный обрабатываемый материал. При этом в большинстве случаев не

берется в учет одно из главных для ВЧ-электротермии обстоятельств – непостоянство электрофизических параметров полимеров в процессе обработки.

Соответственно для определения и формирования метода управления рассматриваемыми процессами необходимо рассмотреть факторы, влияющие на непостоянство режимов электротермической обработки.

Как было отмечено ранее, электрофизические свойства полимерного диэлектрика (ϵ' , $\text{tg}\delta$) меняются в зависимости от температуры, но также они претерпевают изменения и в зависимости от частоты электрического поля (рисунок 15) [65, 73, 89, 92, 144].

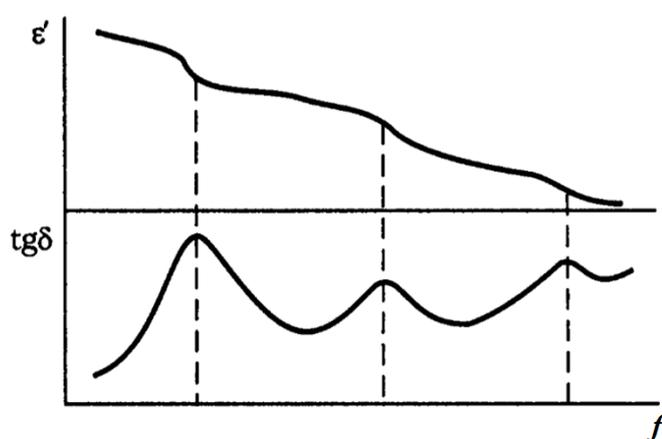


Рисунок 15 – Частотно-релаксационный характер зависимостей ϵ' и $\text{tg}\delta$ от частоты электрического поля

Даже температура плавления обрабатываемых полимерных диэлектриков не является постоянной величиной, а изменяется в сравнительно широких пределах в зависимости от технологии производства, обработки и переработки, условий хранения, эксплуатации и транспортировки [142, 162].

Также, необходимо отметить, что полимерные изделия в ряде случаев имеют сложную геометрическую конфигурацию, требующую проектирования и изготовления дополнительной оснастки, которая значительно преобразует простую схему рабочего конденсатора и безусловно отразится изменением технологий обработки полимеров в ВЧ-поле.

Моими предшественниками, в работах [82, 85, 151], проводился анализ существующих способов контроля процессов ВЧ-обработки полимеров, в ходе

которого был сделан вывод, что контроль фазового состояния обрабатываемого изделия можно осуществлять лишь по косвенному параметру – анодному току I_a , аналитически связанному с коэффициентом диэлектрических потерь ε'' через $\operatorname{tg}\delta$ [82, 162] и в полной мере отражающему динамику его изменения в соответствии с формулой (3)

$$I_a = \frac{4\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''(T) E U_p ab}{\gamma d}, \quad (3)$$

где: U_p – действующее значение напряжения на рабочем конденсаторе; a , b , d – длина, ширина, высота нагреваемого полимера соответственно.

Так в работе [129] автор проводил измерения зависимости $\varepsilon''(T)$, причем двумя методами (рисунок 16), а в работах [36, 41-46, 82, 151] авторы, создав автоматизированную систему научных исследований высокочастотной обработки (АСНИ ВЧ) [80-83, 121], получили возможность построить амперметрическую зависимость $I_a(T)$ (рисунок 17).

Из рисунков 16 и 17 видно, что динамика изменения $I_a(T)$ имеет тот же характер, что и зависимость $\varepsilon''(T)$.

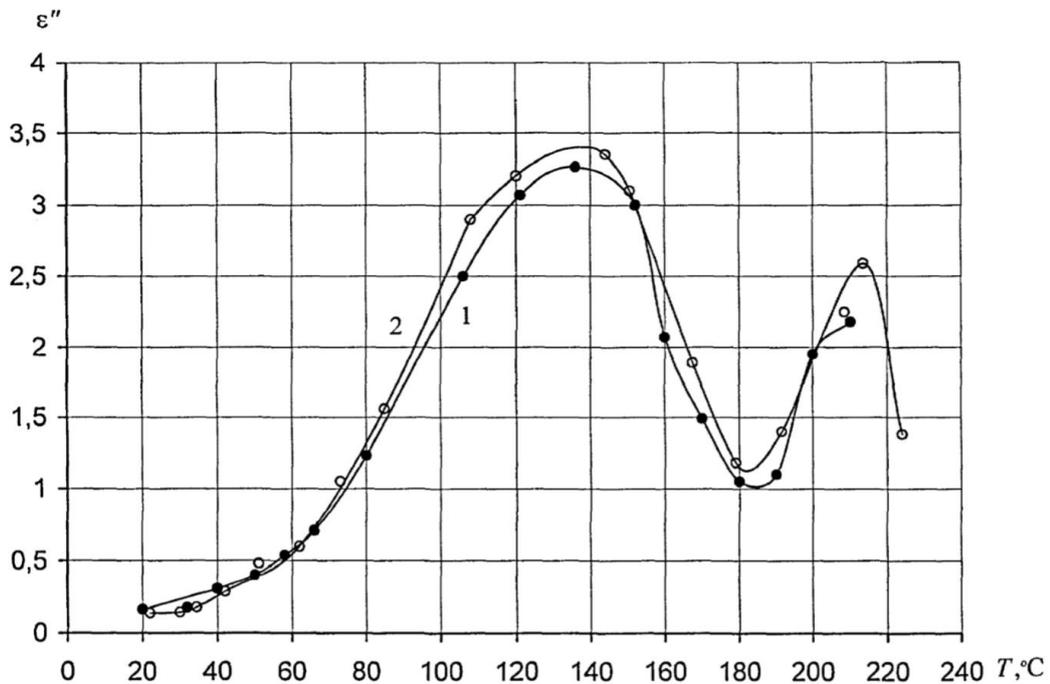


Рисунок 16 – Зависимости ε'' полиамида-610 от температуры на частоте 27,12 МГц, полученные различными методами: 1) диэлектрические измерения, 2) метод автоматизированного эксперимента на установке ВЧ-нагрева [129]

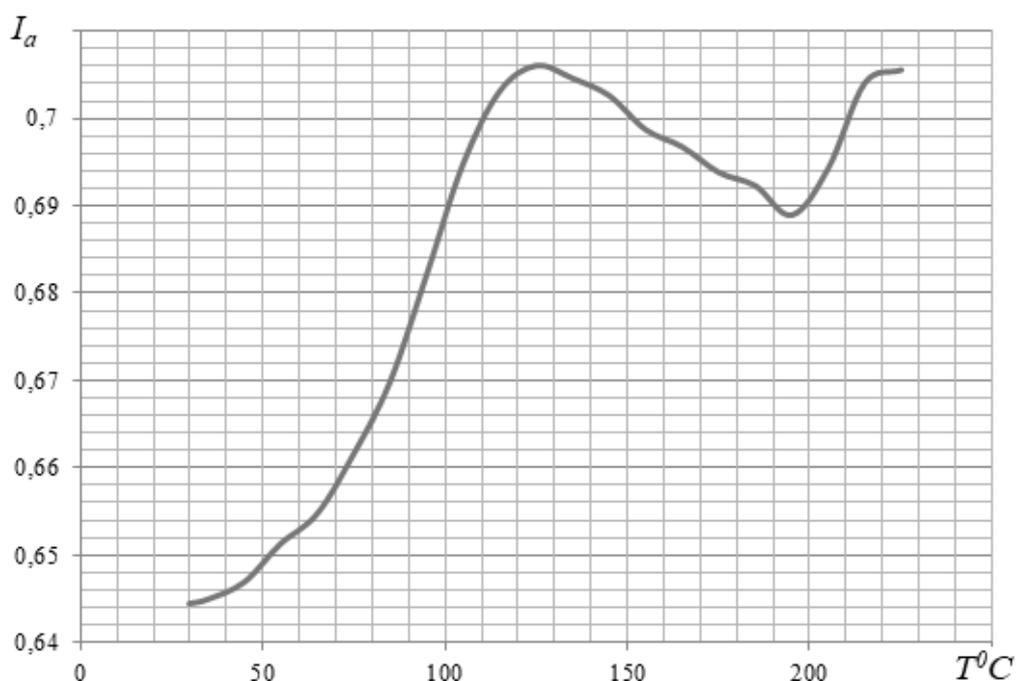


Рисунок 17 – Зависимость $I_a(T)$, полученная при исследовании полиамида ПА6

Более того, в тех же работах [82, 121, 151] авторы используют I_a , как и контролируемый параметр, организуя систему управления только такими процессами электротермической обработки как сушка и сварка в виде достижения I_a экстремальных значений (максимум и минимум). Здесь необходимо отметить, что авторы используют только два таких значения, поскольку экспериментальная кривая I_a , уже исследованных на сегодняшний день материалов, в явном виде дает лишь две контрольных точки, что значительно ограничивает применяемость ВЧ-электротермии для создания широкого перечня технологических процессов обработки полимеров.

Так же в работах [32-36, 41, 45, 46, 82] нашлись рекомендации по организации контроля процессов ВЧ-обработки ориентируясь на достижение скоростью изменения анодного тока dI_a/dT нулевого значения (рисунок 18). Но на практике эти рекомендации еще не были апробированы и применяемость dI_a/dT для формирования управленческих воздействий еще нуждается в дополнительном исследовании.

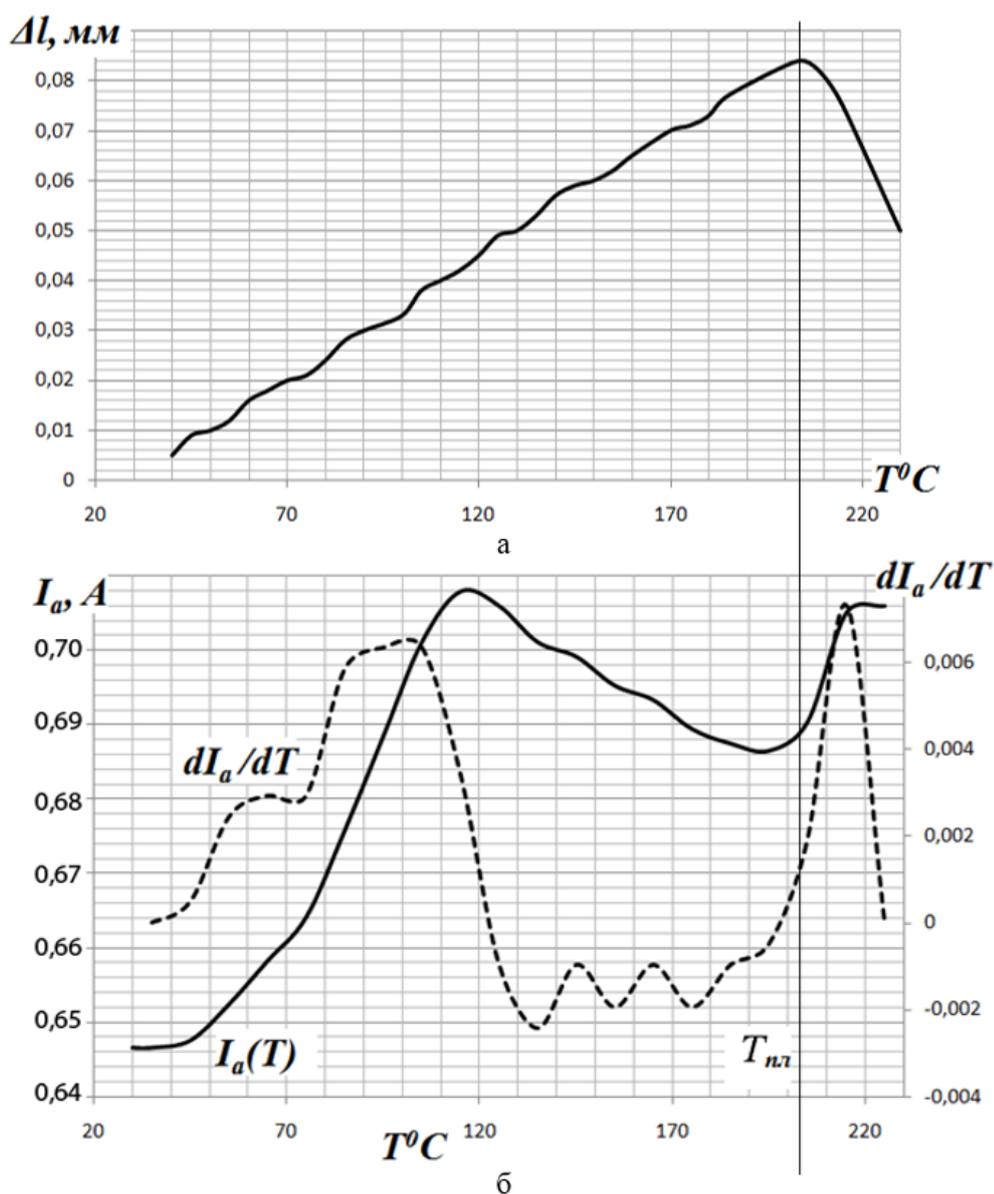


Рисунок 18 - Зависимости: а – $\Delta l(T)$, б – $I_a(T)$ и dI_a/dT при обработке полиамида ПА6 [82]

Исходя из изложенного следует, что использовать в качестве контролируемого параметра значения косвенного показателя – I_a , весьма целесообразно, но все же, поскольку, показатель косвенный, то необходимо повысить уровень надежности контроля и управления процессами электротермии. А также расширить применяемость ВЧ-электротермии для других видов обработки и материалов.

1.6 Анализ существующих решений по автоматизации процесса управления высокочастотной электротермией

Организация правильного управления технологическими процессами производства, обработки и переработки изделий является важнейшей задачей эффективного получения качественной продукции.

На сегодняшний день решением проблем управления процессами электротермии занимается многочисленное научное и производственное окружение. Имеется ряд работ [6, 16, 17, 23, 24, 31-36, 39-41, 45, 46, 48, 51, 62-64, 93, 96, 106, 109, 130, 131, 141, 149, 150, 152-155], включая и диссертационных исследований [30, 58, 79, 82, 99, 121, 129, 143, 151, 158, 161], посвященных решению этих вопросов, а также вопросов автоматизации процесса управления высокочастотной обработкой полимеров. И практически каждая следующая работа отражает в себе анализ существующих на сегодня решений по данной тематике.

Так в работах [84, 150, 151, 156] представлена автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) высокочастотной сушки и сварки полимерных материалов ориентированная на работу при максимальных мощностях. На рисунках 19 и 20 приведено графическое отображение данных процессов ВЧ-обработки.

При этом АСУ включает в себя общие блоки:

- блок акклиматизации, основанный на расчете необходимого времени акклиматизации, организован для подготовки материала к обработке и вывода процесса обработки на максимальную мощность ВЧ-воздействия;
- блок контроля фазового состояния обрабатываемого изделия, основанный на регистрации значений анодного тока и достижении им экстремальных значений;
- блок контроля динамики возникновения частичных разрядов (ЧР) звуколокационным методом для предотвращения пробоя, основанный на регистрации количества ЧР и определении времени межразрядных интервалов,

при превышении скорости возникновения ЧР выше определенного авторами критического значения, начинается процесс снижения мощности ВЧ-воздействия.

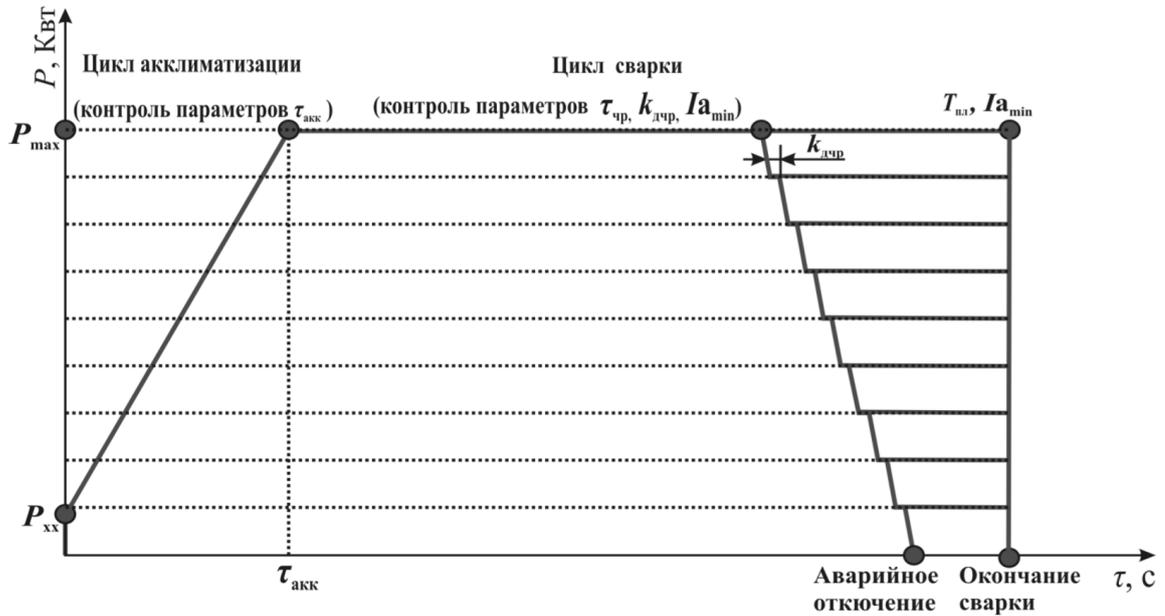


Рисунок 19 – Циклограмма управления процессом ВЧ-сварки [151]

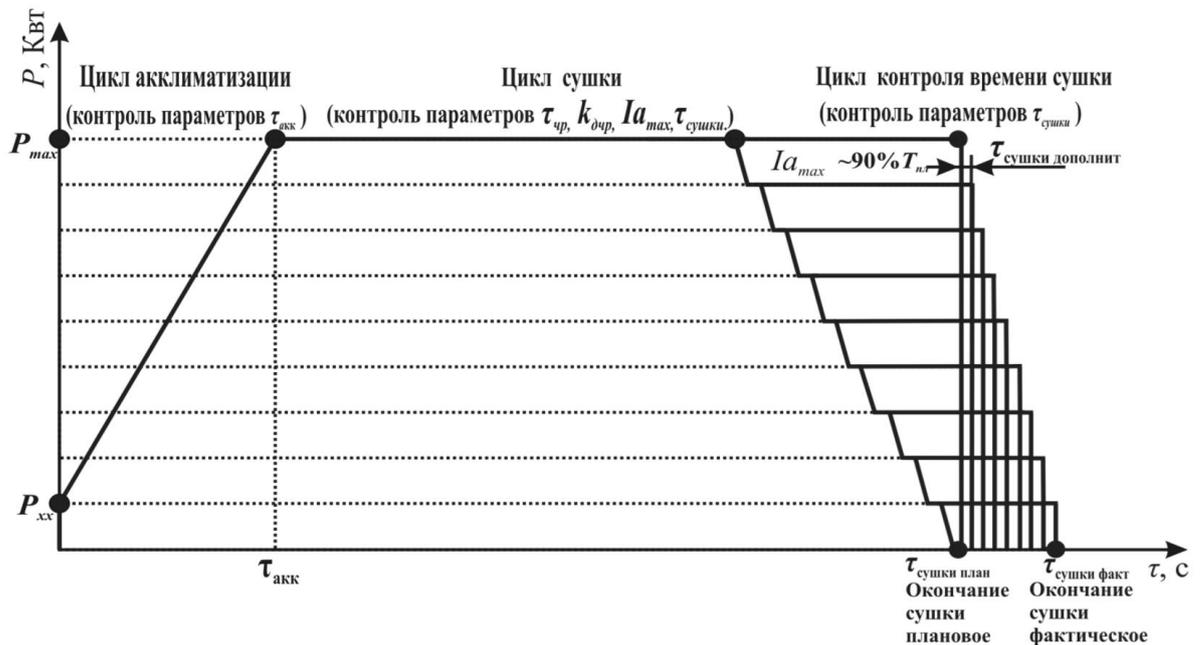


Рисунок 20 – Циклограмма управления процессом ВЧ-сушки [151]

Для процесса высокочастотной сушки автор также предусмотрел блок контроля времени проведения данного процесса.

При этом рассмотренная система управления имеет некоторые недостатки:

- ориентирована только на процессы сушки и сварки;

- контроль фазового состояния полимера ведется только по одному косвенному параметру (анодному току), сигнал которого в свою очередь имеет низкую помехозащищенность, все это не гарантирует получения качественных изделий;
- не применима для обработки полимеров с невысокой температурой деструкции, поскольку контроль того же процесса сушки ведется только по одной контрольной точке (максимум анодного тока), которая, как отмечают авторы, соответствует 90% от температуры плавления $T_{пл}$;
- низкая помехозащищенность блока контроля динамики возникновения ЧР [121];
- разработанный авторами программируемый логический контроллер имеет низкую скорость работы, передачи и обработки информации, необходим внешний источник питания.

Но, несмотря на это, сам принцип управления, при условии устранения выявленных недостатков, может быть взят за основу при разработке новых и совершенствовании существующих АСУ ТП ВЧ-электротермии.

Другая интересная разработка была найдена в работах [108, 121-123] по созданию АСУ ТП восстановления эксплуатационных свойств полимеров в ВЧ-поле с защитными контурами по анодному току, предусматривающая защиту обрабатываемого материала от электрического пробоя и контроль его фазового состояния, а также авторы предусмотрели защитный контур по поверхностной температуре полимера.

Алгоритм работы представленной АСУ включает в себя следующие, как отмечают авторы, условные блоки:

- блок акклиматизации (идентичен блоку, описанному выше при рассмотрении работы [151]);
- блок контроля фазового состояния обрабатываемого изделия, основанный также, как и в работе [151] на регистрации значений анодного тока и достижении им только первого максимума;

– блок контроля динамики возникновения ЧР для предотвращения пробоя, организован, в отличие от представленного в работе [151], на основе анализа динамики изменения анодного тока, при этом алгоритм работы этого блока при возникновении предпробойного состояния переходит к ступенчатому снижению мощности до возникновения следующего предпробойного состояния с последующим снижением мощности ВЧ-воздействия и так до бесконечности без аварийного отключения АСУ;

– блок контроля поверхностной температуры обрабатываемого изделия.

При этом для повышения надежности контроля состояния обрабатываемого изделия и управления процессом ВЧ-обработки авторы предусматривают:

– во-первых, сигнал анодного тока, отвечающий за контроль фазового состояния, обрабатывается фильтром низких частот, разработанным авторами для устранения высокочастотных «шумов»;

– во-вторых, для гарантированного достижения температуры сушки ($T = 90\% T_{пл}$), соответствующей экстремуму (первому максимуму) анодного тока, авторы организовали расчет регулировочного значения анодного тока $I_{рег}$:

$$I_{рег} = \frac{(I_{max} - I_{min1}) + (I_{max} - I_{min2})}{2}, \quad (4)$$

где I_{max} , I_{min1} , I_{min2} – величина максимального, предшествующего максимальному и последующего за ним значений анодного тока соответственно.

А момент полного высушивания (максимум I_a) авторы определяют по выполнимости следующего условия:

$$I_{рег} < 1,5\% I_{рег}. \quad (5)$$

Блок контроля поверхностной температуры полимера организован для предотвращения его перегрева и работает по принципу сравнения текущего T критического $T_{крит}$ значений температуры. При этом за $T_{крит}$ авторы приняли температуру, соответствующую 90% от $T_{пл}$, и определяют ее либо экспериментально, либо таблично по физическим данным обрабатываемого материала.

Рассмотренная АСУ [121] хорошо построена и узкоспециализирована, но автор и не ставил перед собой задач ее применения для других процессов, поэтому данную АСУ ТП восстановления эксплуатационных свойств полимеров в ВЧ-поле можно брать за основу при разработке новых и совершенствовании существующих АСУ ТП ВЧ-электротермии.

В диссертационной работе [82] автор разработал АСУ ТП сушки (рисунок 21) и сварки (рисунок 22) полимерных материалов, также, как и в работе [151], и организовал ее по похожему [121, 151] принципу, но данная система уже лишена многих недостатков. На рисунках 23 и 24 приведено поэтапное графическое отображение данных процессов ВЧ-обработки.

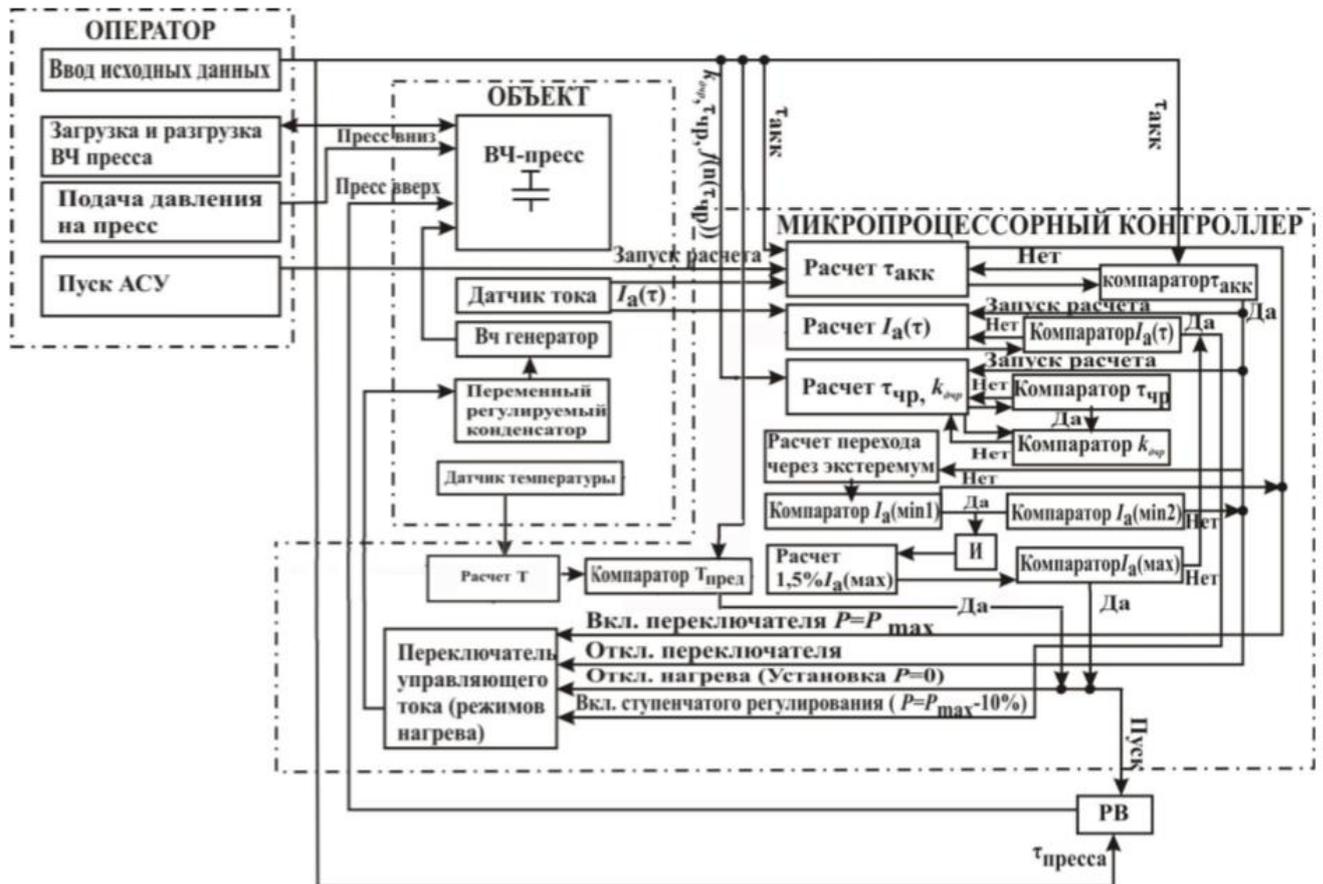


Рисунок 21 – Блок-схема АСУ ТП ВЧ-сушки изделий из полимерных материалов [82]

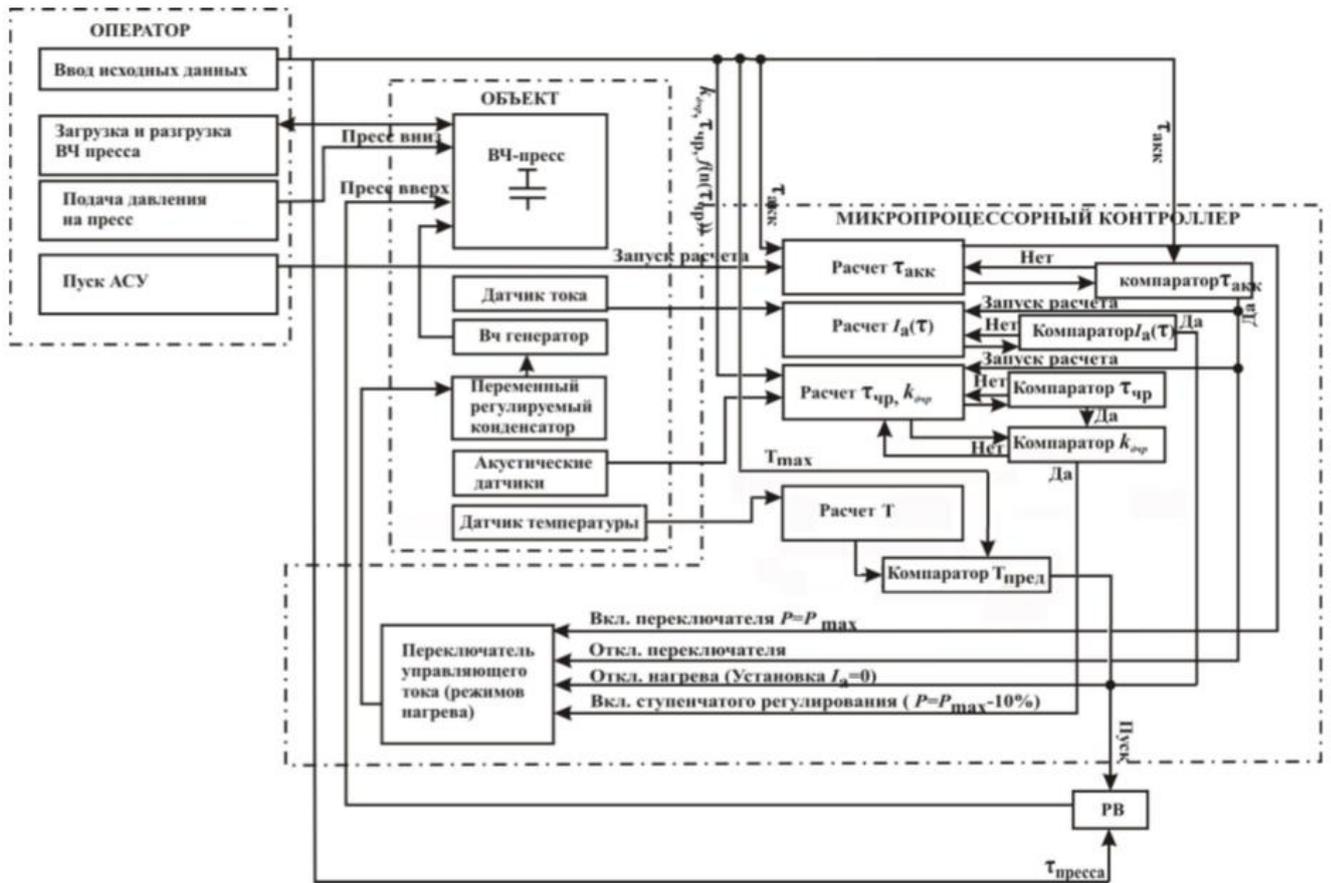


Рисунок 22 – Блок-схема АСУ ТП ВЧ-сварки изделий из полимерных материалов [82]

Так общий блок акклиматизации, в отличие от блока, представленного в источниках [121, 151], начинает свою работу с плавного выхода на мощность работы ВЧ-генератора близкую к максимальной с постоянной скоростью (рисунки 23 и 24, 1 этап) в течении рассчитанного автором времени акклиматизации.

Далее в работу включаются два отдельных параллельных блока:

- блок контроля экстремумов анодного тока;
- блок контроля динамики возникновения ЧР для предотвращения пробоя (практически аналогичен [151]).

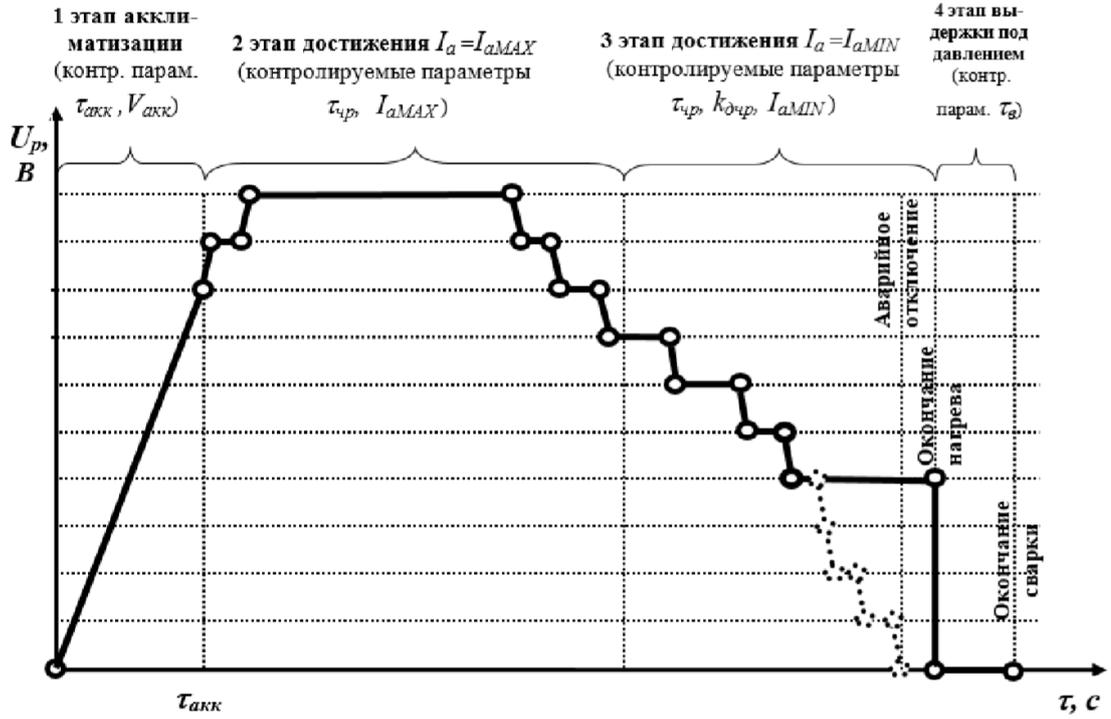


Рисунок 23 – Циклограмма управления технологическим процессом ВЧ-сварки [82]

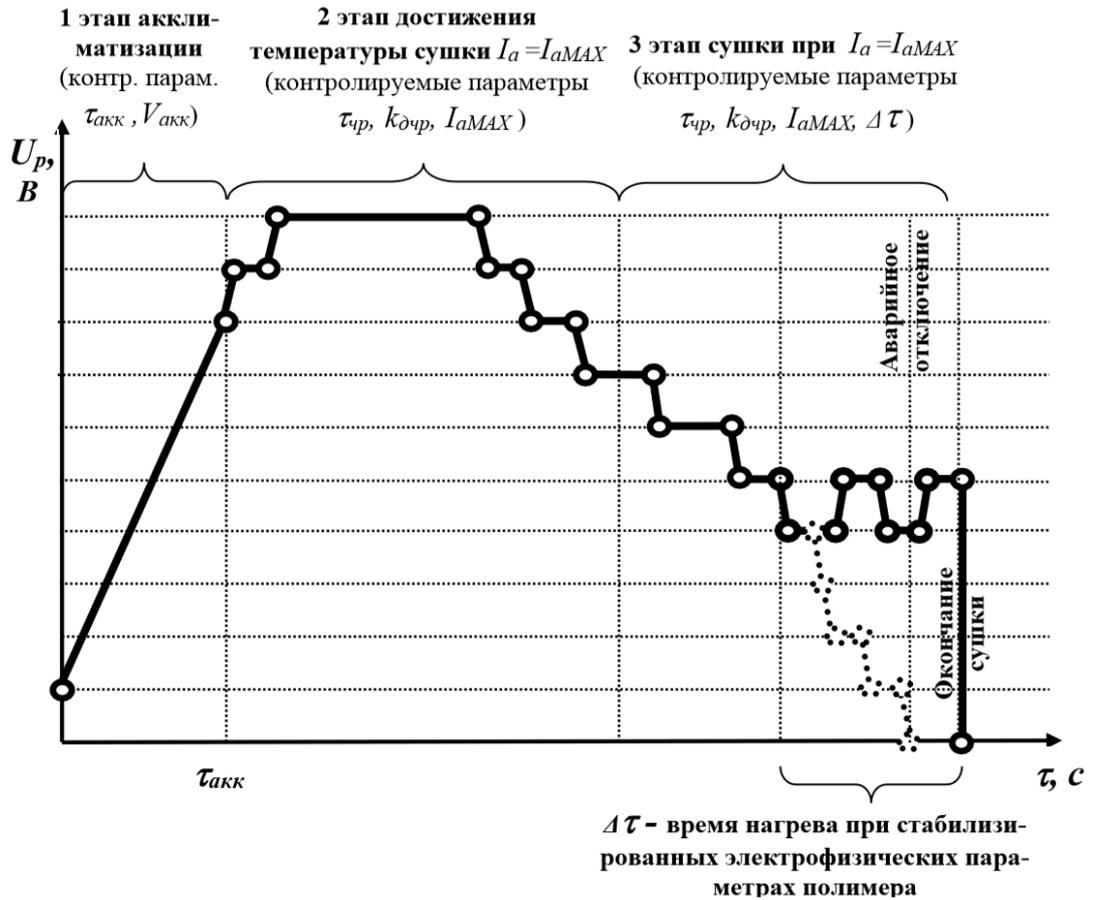


Рисунок 24 – Циклограмма управления технологическим процессом ВЧ-сушки [82]

При этом контроль количества экстремумов осуществляется в зависимости от проводимого вида обработки. Так в случае ВЧ-сварки сначала контролируется достижение первого максимума I_a , причем по тому же условию (разница между текущим и предыдущим значениями I_a меньше нуля), что и в [151], но при его невыполнении производится ступенчатое увеличение мощности до момента достижения первого максимума. Далее осуществляется контроль первого минимума I_a уже по обратному условию (разница между текущим и предыдущим значениями I_a больше нуля), но с тем же принципом увеличения мощности.

В случае ВЧ-сушки, при выполнении условия достижения первого максимума I_a , описанного выше, производится ступенчатое снижение мощности с последующей выдержкой материала в стабильном максимально возможном для данного этапа значении мощности до 3% постоянства значений анодного тока в первом максимуме с дальнейшим завершением процесса обработки.

Рассмотренная АСУ ТП ВЧ-обработки применима практически к любому типу ВЧ-оборудования и обработки изделий любой геометрической формы. Однако при этом контроль технологических процессов привязан только к двум релаксационным состояниям (экстремумы I_a), что ограничивает ее применимость. Данная АСУ ТП ВЧ-сушки и ВЧ-сварки нуждается в совершенствовании и может быть взята за основу разработки и реализации других технологических процессов ВЧ-обработки.

Также важно рассмотреть, упомянутую ранее, существующую уникальную АСНИ ВЧ [80-83, 121].

Данная система состоит из двух взаимодополняющих друг друга частей (рисунок 25) – аппаратно-программной части регистрации, визуализации, обработки и анализа информации и системы выявления взаимовлияния физических параметров элементов технологической системы.

В ходе создания данной АСНИ ВЧ авторами были отработаны схемные решения аппаратно-программной части. Так в качестве блока регистрации, передачи и обработки информации авторами была использована

микропроцессорная платформа Arduino (микроконтроллер ATmega 2560), а в качестве интерфейсного модуля – программный комплекс PowerGraph, который обладает большим рядом возможностей обработки и анализа полученных данных как онлайн, так в офлайн режимах.

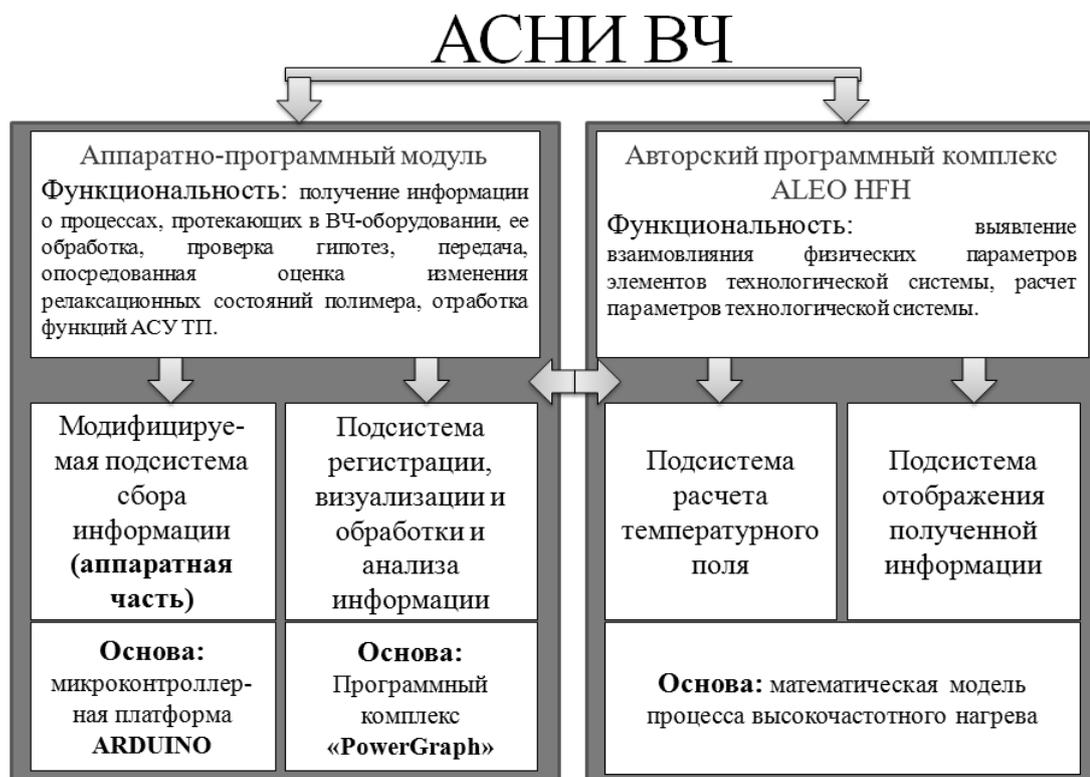


Рисунок 25 – Схематическое описание существующей АСНИ ВЧ

Полученный аппаратно-программный модуль позволяет получить информацию о процессах, протекающих в ВЧ оборудовании и опосредованно оценить изменения релаксационных состояний материала. Но он не дает информации о взаимовлиянии физических параметров элементов технологической системы. Данную задачу позволяет решить вторая часть АСНИ – авторский программный комплекс Aleo_HFH, которая будет подробно рассмотрена и проанализирована в следующем пункте.

С использованием аппаратно-программной части автор [82] проводил на автоматизированном оборудовании прямые эксперименты по определению амперометрической зависимости фазового превращения трех видов полимерных

материалов (ПАб, Армамид, ПВХ). На рисунках 17 и 18 были представлены полученные результаты при исследовании ПАб.

Автор получил, что момент достижения фазового состояния обрабатываемых материалов (начало плавления) соответствует первому температурному минимуму значений I_a , а первому температурному максимуму значений I_a и, как было отмечено ранее, максимуму $tg\delta$, соответствуют температуры образцов: для ПАб $T_{1max} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ($56\% T_{пл}$), для ПВХ $T_{1max} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ ($89\% T_{пл}$), для Армамида $T_{1max} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ ($80\% T_{пл}$). Это, в свою очередь, не сходится с работами [121, 151], в которых авторы при организации АСУ ТП ВЧ-сушки ориентировались на расчет температуры первого максимума по справочным данным материалов ($T_{1max} = 90\% T_{пл}$), не беря в учет изменяющиеся у полимеров температурные характеристики в зависимости от пройденного ими жизненного цикла в изделии. Данный факт подчеркивает достоинство и один из аспектов практической значимости, существующей АСНИ ВЧ, а также необходимость дальнейшей работы в направлении создания и совершенствования таких систем.

Но, несмотря на вышеизложенное, нельзя не отметить и некоторых неточностей, недостатков в проведенных автором экспериментах. Во-первых, исходя из данных рисунка 17а, следует, что автор также проводил измерение величины линейного теплового расширения полимерных образцов во время нагрева, но исходя из паспортных данных используемой установки (УЗП 2500) [145], методики проведения эксперимента [82, 151] и рисунка 26, данное измерение не имеет смысла и по объективным причинам невозможно, поскольку измерительная головка 9-1 была присоединена к механизму прессы высокопотенциального (верхнего) электрода 2 рабочего конденсатора, который всегда находится под нагрузкой (электромагнитный пресс и система упругих рычагов, поддерживающих плиту (электрод) в прижатом состоянии).

Поэтому, ориентироваться на представленные автором результаты измерения деформаций полимера в процессе нагрева, полученные аппаратно-программным модулем без учета наличия прессового блока установки ВЧ-нагрева, нельзя.

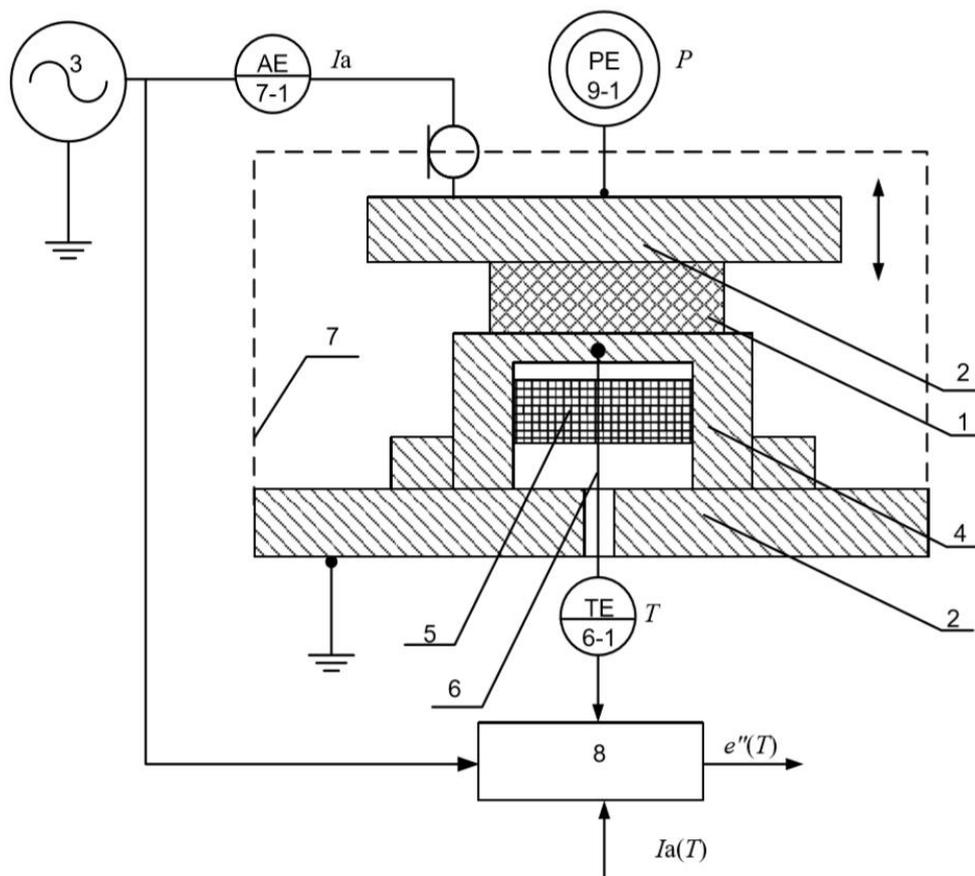


Рисунок 26 – Схема автоматизированной установки определения амперометрической зависимости фазовых превращений полимеров [82], где: 1 – полимерный образец; 2 – электроды рабочего конденсатора; 3 – ВЧ-генератор; 4 – приспособление для нагрева образца; 5 – электронагревательный элемент; 6 – термопара; 7-1 – амперметр (линейный датчик с выходом по напряжению); 6-1 – термопара-термометр; 7 – защитный экран; 8 – вычислительный блок; 9-1 – индикаторная головка

Во-вторых, измерение температуры с помощью термопары в экспериментах автор проводил в непрерывном режиме без учета значительных по величине помех, наводимых в термопаре при включении ВЧ-генератора (рисунок 27). Это создает проблемы управления процессом экспериментальных исследований и автоматизированного анализа информации, что, в свою очередь отражается на чистоте эксперимента.

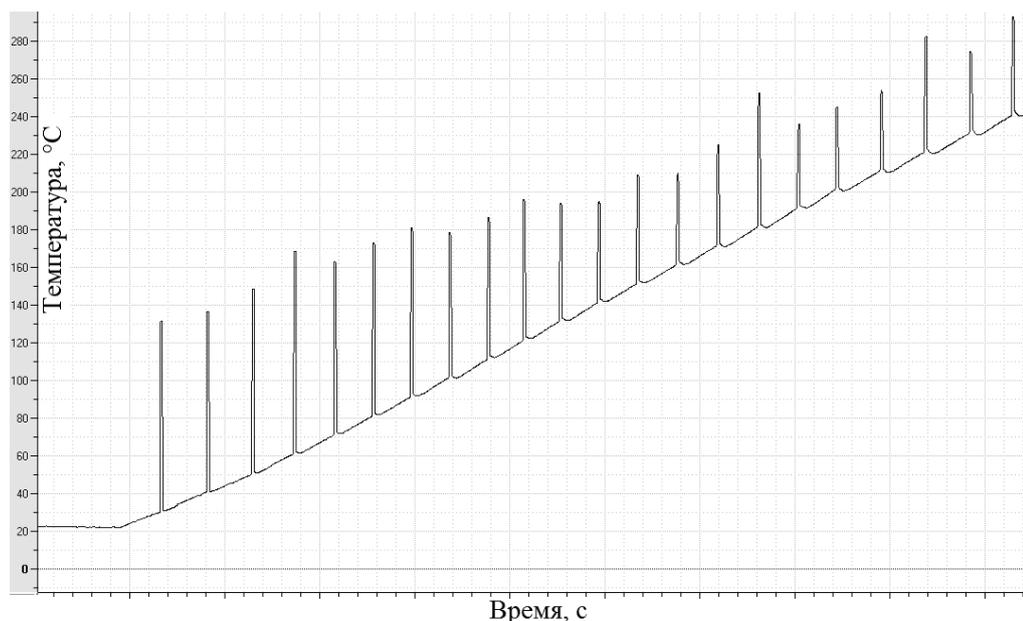


Рисунок 27 – Контроль температуры в непрерывном режиме с использованием существующего аппаратно-программного модуля АСНИ ВЧ

Исходя из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что наиболее перспективной, актуальной и значимой задачей по автоматизации и управлению технологическими процессами ВЧ-электротермии является создание новых или совершенствование существующих АСНИ ВЧ, которые позволят разработать новые методики надежного управления и раскрыть возможность применения ВЧ-электротермии для новых видов обработки материалов широкого перечня, т. е. сделать ее универсальной, а систему управления процессами ВЧ-обработки – автоматической.

1.7 Решения и проблемы математического моделирования высокочастотной обработки

В предыдущем пункте настоящего диссертационного исследования были рассмотрены существующие на сегодня решения в области автоматизации процесса управления ВЧ-электротермией, проанализированы их достоинства и недостатки, а также определено направление дальнейшей работы.

А еще ранее был проведен анализ методов контроля и управления процессов ВЧ-электротермии, выбран основной контролируемый параметр (I_d) и определен ряд задач, связанный, во-первых, с повышением уровня надежности контроля и управления процессами электротермии, и во-вторых, с расширением применимости ВЧ-электротермии для других видов обработки и материалов.

Но для реализации этих задач необходима исследовательская база, полноценно отражающая взаимосвязь параметров ВЧ оборудования и технологических процессов ВЧ-обработки полимерных изделий. Поэтому отдельного внимания заслуживает область математического моделирования процессов высокочастотной обработки.

На сегодняшний день по данному вопросу известен узкий ряд разработок, основанный на аналитическом и численном решениях дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с внутренним источником тепла [75]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P(x, y, z, T, t), \quad (6)$$

где ρ , λ , C_p – плотность материала, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость соответственно; T – температура; P – удельная мощность внутреннего источника тепла; t – время.

При этом, в работе [129] была обоснована невозможность аналитического решения уравнения (6) ввиду неоднозначности функциональной зависимости мощности внутреннего источника тепла от температуры $P(T)$. Поэтому рассмотрение моделей с аналитическим решением не имеет в данном случае практического значения.

Одна из первых математических моделей с численным решением, отражающая процесс только высокочастотной сварки одного материала – полиамида непостоянства мощности внутреннего источника тепла, была разработана и описана в работе [129]. Автор рассматривал симметричную технологическую систему, состоящую из электродов рабочего конденсатора с

расположенными между ними двумя свариваемыми полиамидными образцами (рисунок 28).

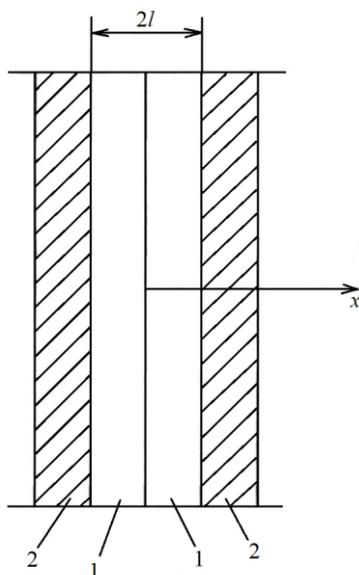


Рисунок 28 – Графическое описание математической модели процесса высокочастотной сварки полиамидов [129], где 1 – полиамидные образцы; 2 – электроды

При этом сразу можно отметить недостатки данной модели, это: узкий спектр решаемых задач; возможность отображения протекающих процессов только по одной оси; не учтена инерционность системы и возможность возникновения пробойных явлений, ввиду полного отсутствия тепло- электро- изоляции между электродами и обрабатываемыми материалами; применима только для рассмотрения процесса сварки полиамидных изделий. Но, при этом, необходимо отметить, что данная модель явилась основой для построения более поздних математических моделей.

Так, хронологически, следующее численное решение рассматриваемого вопроса было найдено в работах [142, 143]. В отличие от предыдущей модели, здесь автор предусмотрел один изоляционный вкладыш между обрабатываемым материалом и электродами рабочего конденсатора (рисунок 29), расширил применимость модели по обрабатываемым материалам, а в остальном модель имеет тот же принцип решения и аналогичные недостатки.

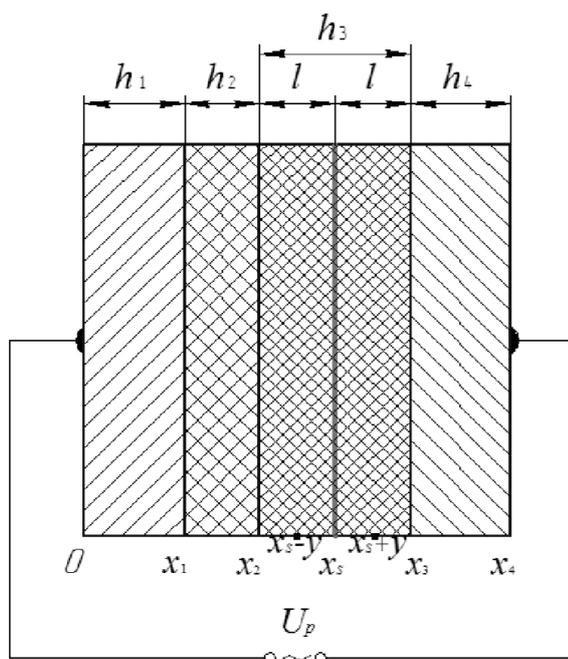


Рисунок 29 – Графическое описание математической модели процесса высокочастотной сварки пластмасс в технологической системе с одним изолированным электродом [143],

где h_1, h_4 – толщина высокопотенциального и заземленного электродов; h_2 – толщина изоляционного вкладыша; $l = h_3 / 2$ – толщина свариваемой детали; x_1 – координата границы слоя; x_s – координата сварного шва; y – расстояние от сварного шва; U_p – напряжение на рабочем конденсаторе

И наиболее поздняя разработка, найденная в работах [82, 86, 87, 121] и входящая в состав, рассмотренной в предыдущем пункте, АСНИ ВЧ [82], реализованная в виде программного комплекса Aleo_HFH (рисунок 30) [127]. Его подробное описание можно найти в работе [82].

В отличие от предыдущих моделей, авторский программный комплекс Aleo_HFH имеет симметричное строение за счет двух изоляционных вкладышей, а принцип решения аналогичен.

Вычисления, проводимые в авторском программном комплексе Aleo_HFH, также базируются на одномерной системе, пригодной для отображения теплового поля в процессе ВЧ-электротермии при обработке полимерных изделий только простой формы, без учета объемного распределения тепла, а также

температурного поля в краевых зонах. Комплекс имеет ограничения по спектру решаемых задач в отношении количества слоев технологической системы.

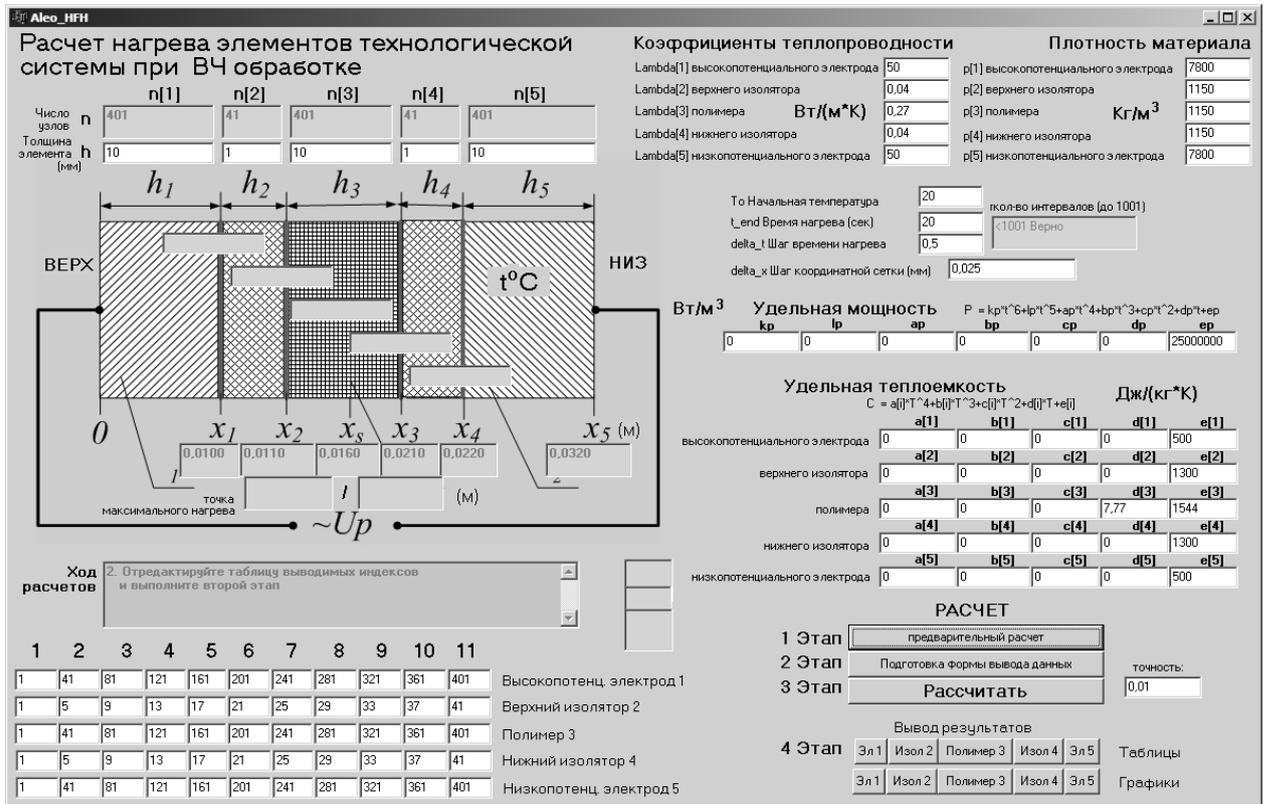


Рисунок 30 – Интерфейс авторского программного комплекса Aleo_HFH [127]

Но данный комплекс наиболее значим с практической точки зрения, поскольку является наиболее полным и при решении учитывает самые значимые температурные изменения свойств всех элементов технологической системы. А также он апробирован и перспективен для совершенствования.

Подводя итог, в отношении существующих решений в области математического моделирования, была определена задача дальнейшей работы, направленная на формирование математической модели, позволяющей анализировать объемное распространение тепла в процессе ВЧ-электротермии при обработке полимерных изделий, как простой, так и сложной формы, учитывающей, во-первых, непостоянство всех значимых температурных свойств обрабатываемого изделия и их влияние на процесс обработки; во-вторых, свойства материалов, не относящихся к полимерам (например, древесина, влагосодержащие отходы производств и др.) и их влияние; в третьих

непостоянства удельной мощности внутренних источников тепла в процессе обработки; в четвертых, разработанная в дальнейшем модель не будет иметь ограничений по количеству слоев технологической системы и спектру решаемых задач.

1.8 Постановка цели и задач диссертационного исследования

Исходя из вышеизложенного, сформулирована 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 достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе анализа существующей 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.

2 Совершенствование автоматизированной системы научных исследований высокочастотной обработки

В первой главе были рассмотрены существующие технологические процессы ВЧ-обработки полимеров, автоматизированное управление данными процессами, выявлены его недостатки, а также пути и возможности совершенствования. Обоснована необходимость совершенствования существующей АСНИ ВЧ [82].

Как было упомянуто ранее, существующая АСНИ ВЧ состоит из двух взаимодополняющих друг друга частей – аппаратно-программной части (модуля) регистрации, визуализации, обработки и анализа информации и системы выявления взаимовлияния физических параметров элементов технологической системы (авторский программный комплекс Aleo_HFH [127]). Предложенная в работах [80-83; 121] АСНИ ВЧ обладает рядом недостатков:

1. Аппаратно-программный модуль:

измерение линейного теплового расширения полимера в процессе нагрева аппаратно-программным модулем осуществлялось без учета наличия прессового блока установки ВЧ-нагрева; измерение температуры с помощью термопары проводилось в непрерывном режиме без учета значительных по величине помех, наводимых в термопаре при включении ВЧ-генератора, что создавало проблемы при автоматизации анализа информации (рисунок 27).

2. Авторский программный комплекс Aleo_HFH [127].

Вычисления, проводимые в авторском программном комплексе Aleo_HFH, базировались на одномерной системе, пригодной для отображения теплового поля в процессе ВЧ-электротермии при обработке полимерных изделий простой формы, без учета объемного распределения тепла, а также теплового поля в краевых зонах. Комплекс имеет ограничения по спектру решаемых задач в отношении количества слоев технологической системы, в нем не учтены все температурнозависимые параметры обрабатываемых материалов, так, например, значения коэффициента теплопроводности материалов в рассматриваемом

комплексе имеют постоянную величину, тогда как в работе [114] представлено, что их температурные изменения находятся в широких диапазонах (с учетом зоны плавления). Анализ указанных недостатков позволил перейти к совершенствованию существующей АСНИ ВЧ.

2.1 Модернизация аппаратно-программного модуля АСНИ ВЧ

Для совершенствования аппаратно-программной части АСНИ ВЧ были произведены работы по модернизации и автоматизации экспериментальной установки, итоговая схема которой представлена на рисунке 31.

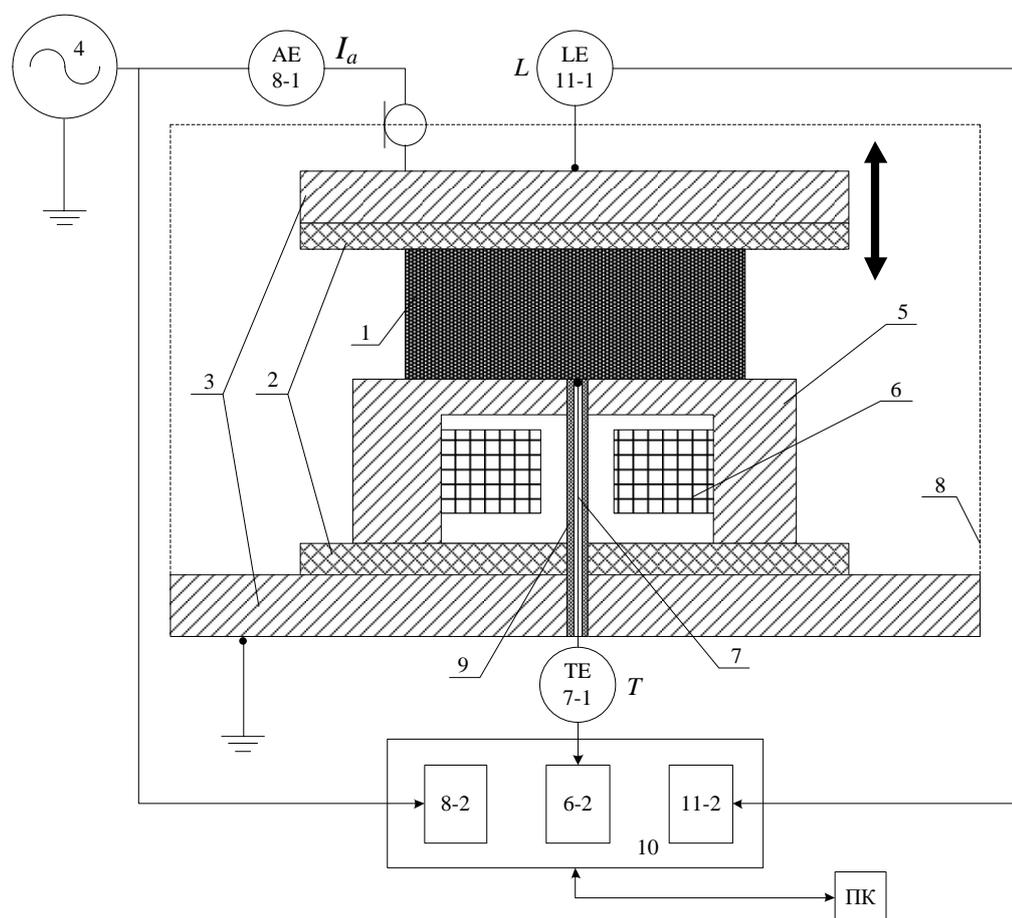


Рисунок 31 – Схема автоматизированной экспериментальной установки по определению амперометрической зависимости диэлектрических потерь в полимерных материалах,

где 1 – обрабатываемый образец; 2, 9 – тепло- электро-изоляторы; 3 – электроды рабочего конденсатора; 4 – ВЧ-генератор; 5 – приспособление для контактного нагрева образца; 6 – электронагревательный элемент; 7 – термопара; 7-1 – термопара-термометр; 8 – защитный экран; 8-1 – датчик тока; 10 – вычислительный блок; 11-1 – датчик линейного теплового расширения

Общий принцип работы данной установки сводится к следующему. Образец 1, изготовленный из полимерного материала, помещается между электродами (обкладками) 3 плоскопараллельного рабочего конденсатора, подсоединенного к ВЧ-генератору 4, при этом между исследуемым образцом 1 и электродом 3 укладывается тепло- электро-изолятор. Нижний низкопотенциальный электрод одновременно является электрическим нагревательным элементом 6, обеспечивающим контактный нагрев полимерного образца до необходимой температуры с заданной скоростью. В приспособлении 5 изготовлено технологическое отверстие для размещения в нем термопары 7 для контроля температуры поверхности полимерного образца 1 [31, 40]. При этом термопара 7 в обязательном порядке должна быть изолирована от стенок отверстия тепло-электроизоляционной прокладкой. После включения ВЧ-генератора с помощью датчика тока 8-1 начинается автоматическое измерение его анодного тока. В отличие от блока, предложенного в работах [35, 44, 82, 151], в усовершенствованной системе температура образца контролируется с помощью термопары 7-1 только при отключенном ВЧ-генераторе, тем самым, измерения температуры и тока программно синхронизированы в противофазе. Выходные сигналы от термопары 7-1 и датчика тока 8-1 поступают на вход вычислительного блока 10, в качестве которого используется программируемый логический микроконтроллер (ПЛК), соединенный с персональным компьютером через COM-порт [39, 40]. Вычислительный блок 10 состоит из подблоков:

- подблок контроля температуры 6-2;
- подблок контроля анодного тока 8-2;
- подблок контроля линейного теплового расширения 11-2.

Необходимо отметить, что для объективного контроля момента достижения полимерным образцом в процессе контактного нагрева состояния плавления в установку ВЧ-нагрева были внесены изменения, касающиеся исключения влияния прессы на нагрев и деформации исследуемого образца. Прессовой блок (усилие 0...400 кг) был отключен, вес P верхней подвижной плиты рабочего конденсатора был компенсирован упругими элементами до $P \geq F_{TPOH}$, где F_{TPOH} – сила трения в опорах, при этом $\frac{P}{F_{TPOH}} \rightarrow 0$. Конкретное отношение $\frac{P}{F_{TPOH}}$ определялось выставлением равновесного состояния и незначительного смещения системы в сторону движения плиты под действием силы тяжести.

Для объективного контроля момента достижения полимерным образцом состояния плавления к механизму высокопотенциальной подвижной плиты рабочего конденсатора был присоединен индуктивный датчик линейных перемещений Balluff Micropulse BIW с аналоговым выходным сигналом 0...+10 В, выходные данные с которого поступали в вычислительный блок 10. Данный датчик обеспечил фиксацию линейных деформационных изменений исследуемого образца в соответствии со своими характеристиками (таблица 5).

Таблица 5 – Технические характеристики индуктивного датчика линейных перемещений Balluff Micropulse BIW с аналоговым выходом

Параметр	Значение
Диапазон измерения, мм	0-750
Разрешение, мкм	5
Максимальная нелинейность, %	0,04
Температура эксплуатации, °С	-25-85
Функция на выходе, В	0-10
Питание	DC
Материал корпуса	алюминий

Рассмотренная экспериментальная установка предназначена для линейного равномерного нагрева объекта исследования контактным способом с заданной скоростью [32-34, 45, 82, 129, 151]. Для обеспечения равномерного прогрева

полимерного образца по всему объему использовался нагрев по линейному закону со скоростью не более 2 °С/мин [31, 32, 151].

На рисунке 32 представлена функциональная схема системы автоматического управления процессом линейного равномерного нагрева объекта исследования контактным способом с заданной скоростью, включающая: ЗУ – задающее устройство, определяющее линейный закон изменения выходной величины; ПИ-регулятор, обеспечивающий достижение необходимого значения температуры при учете величины отклонения температуры ΔT и продолжительности этого отклонения; ПН – поверхность нагрева; ДТ – датчик температуры.

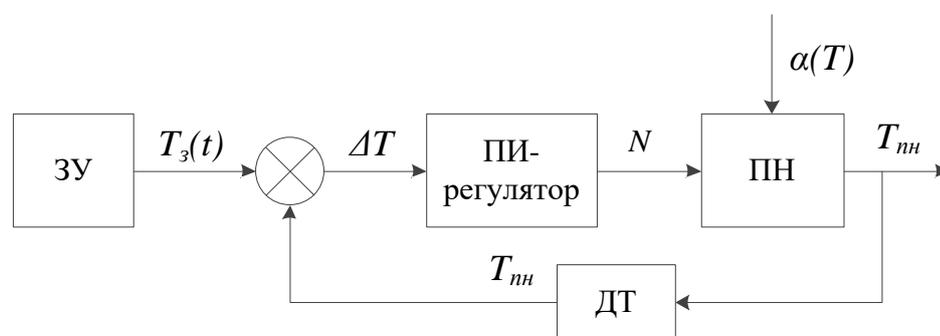


Рисунок 32 – Функциональная схема САУ процессом линейного равномерного нагрева объекта исследования контактным способом с заданной скоростью,

где $T_3(t)$ – заданная температура, изменяющаяся по линейному закону

$$T_3(t) = T_n + \frac{dT}{dt} t, \quad T_n - \text{начальная температура, } t - \text{текущее время процесса; } \Delta T -$$

разница между заданным (требуемым) и текущим T_{nn} значениями температуры;

$\alpha(T)$ – коэффициент теплообмена

В качестве объекта управления, отвечающего за контактный нагрев исследуемого полимера, был применен нагревательный элемент с плоской поверхностью, шероховатостью Ra 0,32 и с отклонением среднего значения температуры поверхности не более 5%. При этом место установки термопары было определено экспериментально по девяти точкам с расположением в точке со средним значением температуры по (7)

$$T_r = \frac{\sum_{i=0}^9 T_i}{9}. \quad (7)$$

Расположение контрольных точек на поверхности нагрева представлено на рисунке 33.

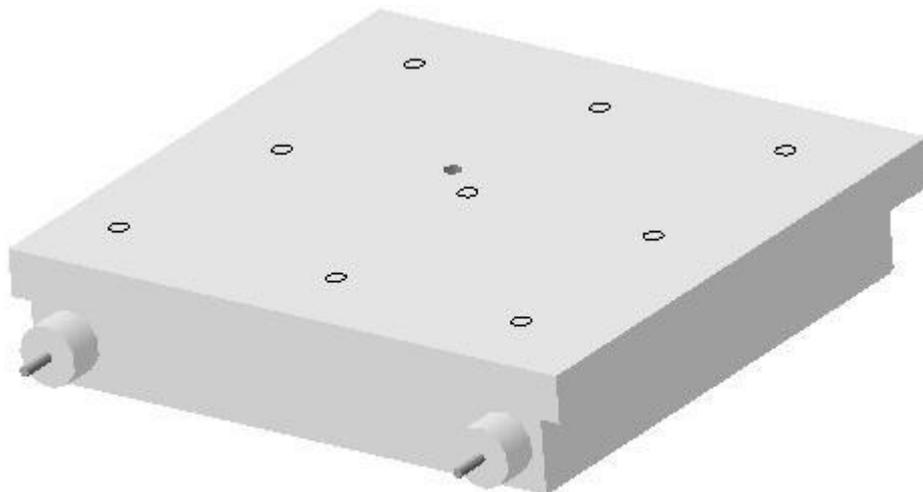


Рисунок 33 – Нагревательный элемент

Как было отмечено на рисунке 32, управление процессом линейного нагрева было организовано по пропорционально-интегральному закону (ПИ-закону) регулирования [59, 60, 115, 128] с определением пропорционального и интегрального коэффициентов по методу Зиглера – Никольса [11, 101].

Для управления процессом нагрева и контроля параметров была использована микроконтроллерная плата ПЛК семейства Arduino Mega 2560.

Возможности ПЛК [1] считывать, резервировать и обрабатывать наряду с аналоговыми и цифровые данные, в соответствии со своими характеристиками (таблица 6), позволили организовать необходимую систему управления.

Для совершенствования программной части АСНИ ВЧ было разработано алгоритм управления процессом линейного равномерного нагрева исследуемого материала и периодического кратковременного воздействия на него, при отключенном нагреве, проникающим высокочастотным электрическим полем после каждого повышения температуры полимера на заданный градус (на рисунке

34 эта величина step1 составляет $10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Его блок-схема представлена на рисунке 34.

Таблица 6 – Характеристики микроконтроллерной платы ПЛК семейства Arduino Mega 2560

Параметр	Значение
Рабочее напряжение	5В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12В
Входное напряжение (предельное)	6-20В
Цифровые Входы/Выходы	54 (14 из которых могут работать также как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
Флеш-память	256 Кб (из которых 8 Кб используются для загрузчика)
ОЗУ	8 Кб
Энергонезависимая память	4 Кб
Тактовая частота	16 МГц
Разрешение аналоговых входов	10 бит

Разработанный алгоритм управления состоит из трех блоков:

- блока 1 равномерного нагрева исследуемого материала (основной блок), работа которого организована по линейному закону изменения мощности с заданным шагом изменения температуры;
- блока 2 контроля линейного теплового расширения исследуемого материала в процессе автоматизированного исследования (рисунок 35);
- блока 3 контроля анодного тока, работа которого начинается при достижении в полимере заданного значения температуры (рисунок 36).

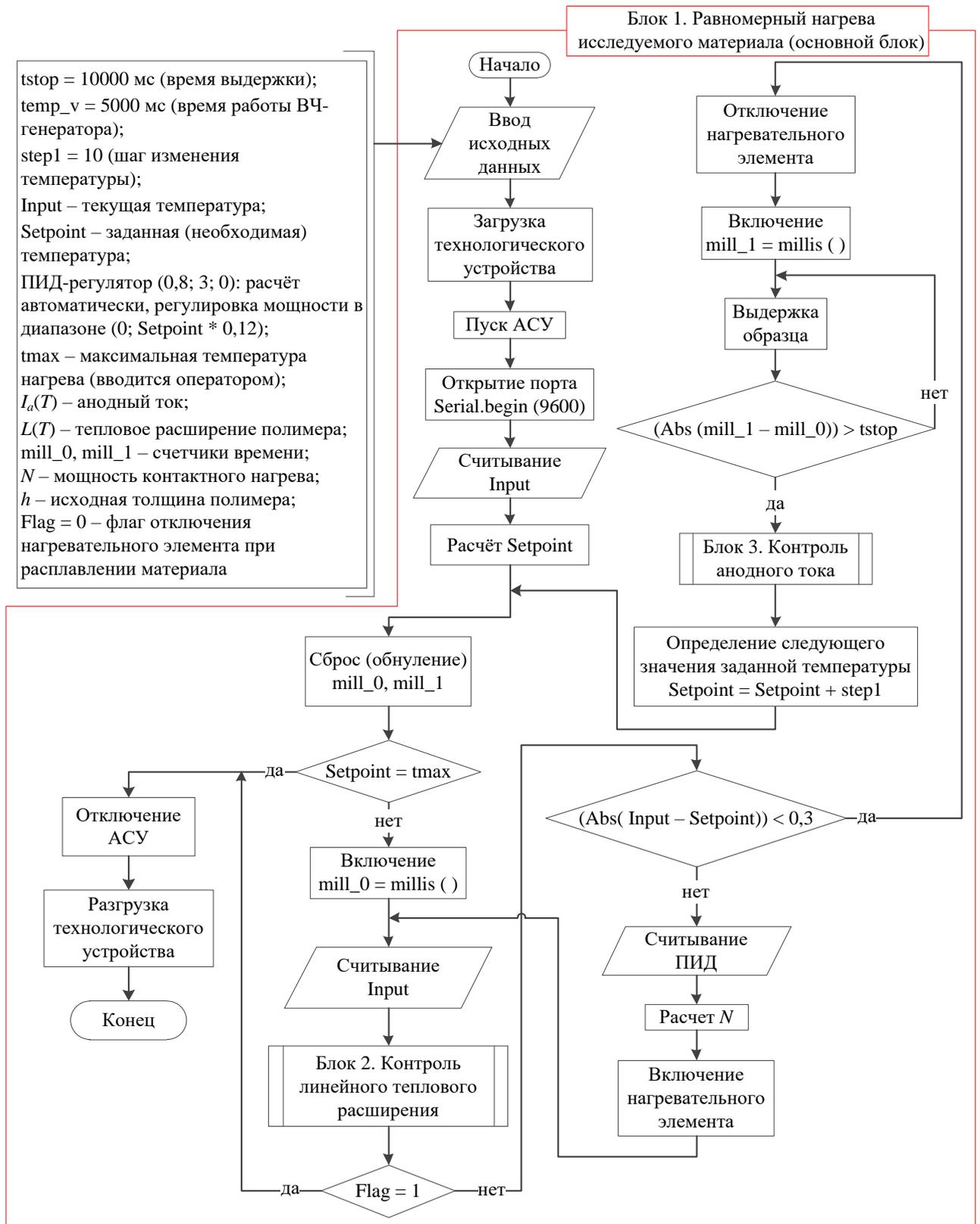


Рисунок 34 – Блок-схема алгоритма управления процессом линейного равномерного нагрева исследуемого материала и периодического кратковременного воздействия на него, при отключенном нагреве, проникающим высокочастотным электрическим полем

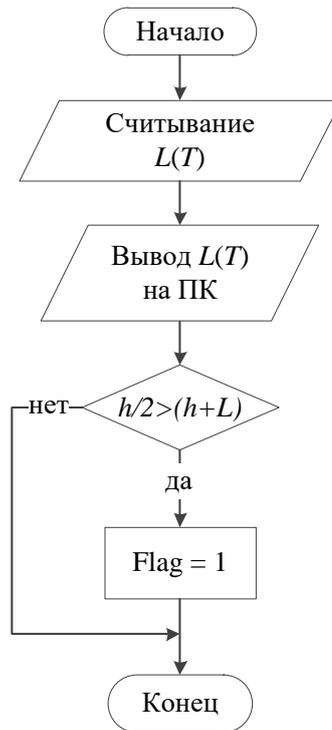


Рисунок 35 – Блок-схема подпрограммы блока 2 контроля линейного теплового расширения

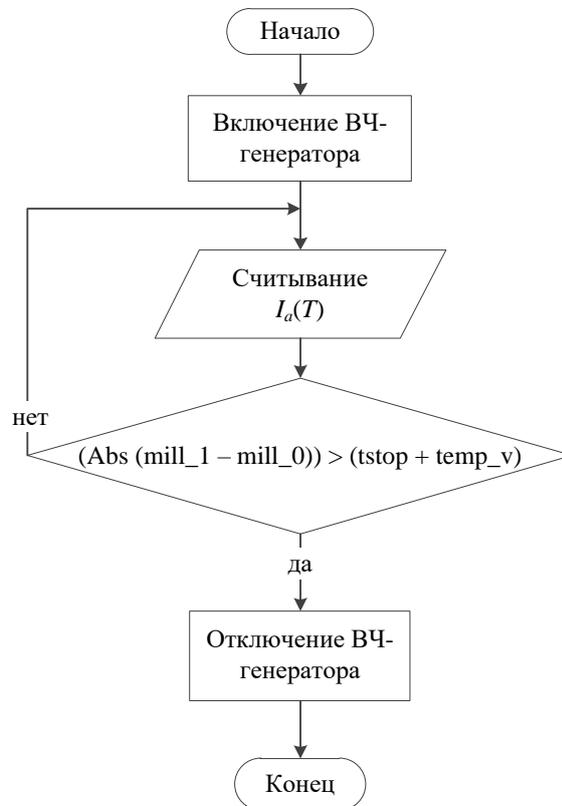


Рисунок 36 – Блок-схема подпрограммы блока 3 контроля анодного тока

В соответствии с представленным алгоритмом за контролируемые параметры были приняты температура поверхности полимерного образца, его линейное тепловое расширение и анодный ток ВЧ-генератора, а в качестве управляемого мощность контактного нагрева.

Необходимо отметить, что представленный алгоритм управления построен таким образом, что оператор может изменять параметры работы системы управления в зависимости от материала и размеров исследуемого образца. Так в процессе эксплуатации АСНИ ВЧ был отмечен эффект снижения скорости нагрева полимерного образца при повышении температуры за счет увеличения конвекционного теплоотвода. В этом случае было предусмотрено введение поправочного коэффициента, определяемого экспериментально (в алгоритме он равен 0,12). Процесс нагрева осуществляется до момента достижения образцом максимальной температуры (температуры плавления); также имеется возможность регулировки периодичности включения ВЧ-генератора и продолжительности высокочастотного импульса. Представленный алгоритм реализован в виде программного обеспечения (приложение А), на которое было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614766 [126] (приложение Б). В дополнении необходимо отметить, что также был разработан программный модуль, обеспечивающий управление нагревательным элементом с использованием программного широтно-импульсного модулятора (ШИМ) для равномерного контактного нагрева исследуемого материала с заданной скоростью, сбор данных о температуре полимера, параметрах высокочастотного оборудования (приложение В) (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614765 (приложение Г)) [125].

Структурная схема блока автоматизации установки электротермической обработки полимерных материалов [82] с учетом всех внесенных изменений представлена на рисунке 37.

Таким образом, усовершенствованный аппаратно-программный модуль АСНИ ВЧ позволил исключить описанные выше недостатки и в

2.2 Исследование возможностей полученной аппаратно-программной части АСНИ ВЧ

По итогу описанных выше работ были проведены экспериментальные исследования взаимосвязей электрофизических параметров электротермического оборудования и таких полимерных материалов, как поливинилхлоридный пластикат ОМБ-60, полиамид ПА6, стеклонаполненный полиамид (армамид ПА СВ 30-1 ЭТМ) и полиуретан марки СКУ-7Л.

Размеры образцов подбирались согласно условия максимальной эффективности обработки на высокочастотной установке модели УЗП 2500, что соответствует площади поверхности образца в 125 см^2 .

Контроль параметров в ходе научного эксперимента осуществлялся в режиме реального времени адаптированным программным комплексом PowerGraph (рисунок 38), способным принимать данные с ПЛК за счет созданного совместно с разработчиком оригинального драйвера. Драйвер был включен разработчиками в инсталляционный пакет PowerGraph.

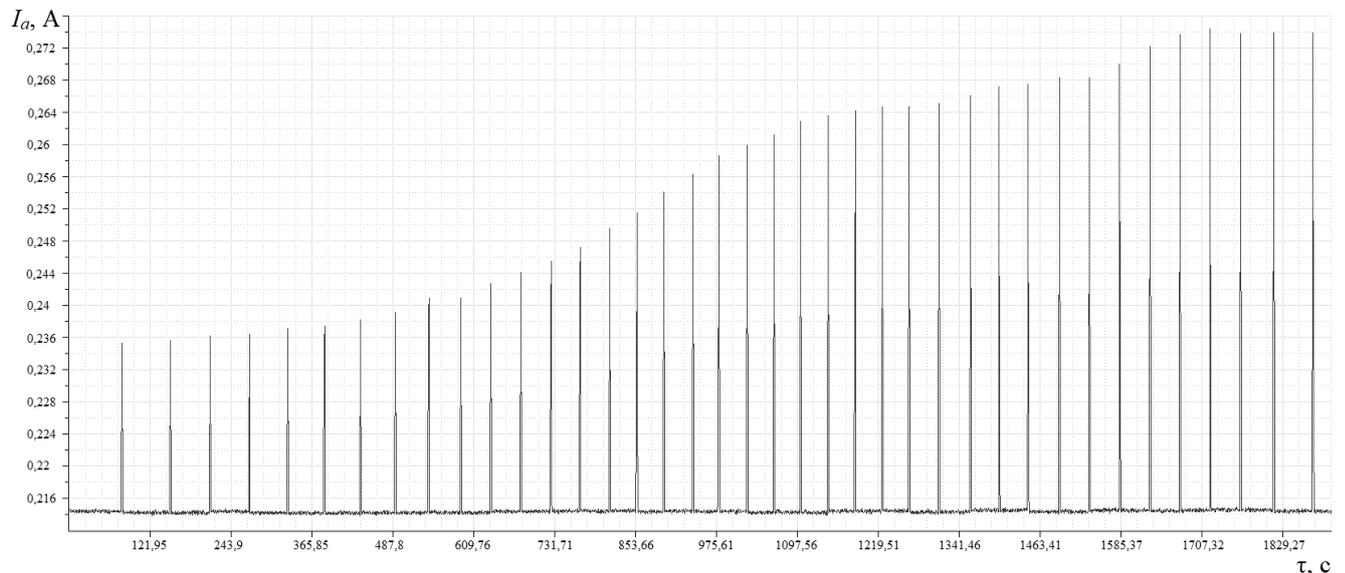


Рисунок 38 – Контроль анодного тока адаптированным программным комплексом PowerGraph

В процессе экспериментального исследования были получены графики температурных зависимостей анодного тока ВЧ-генератора $I_a = f(T)$ (рисунок 39) для заявленных полимерных материалов при частоте 27,12 МГц.

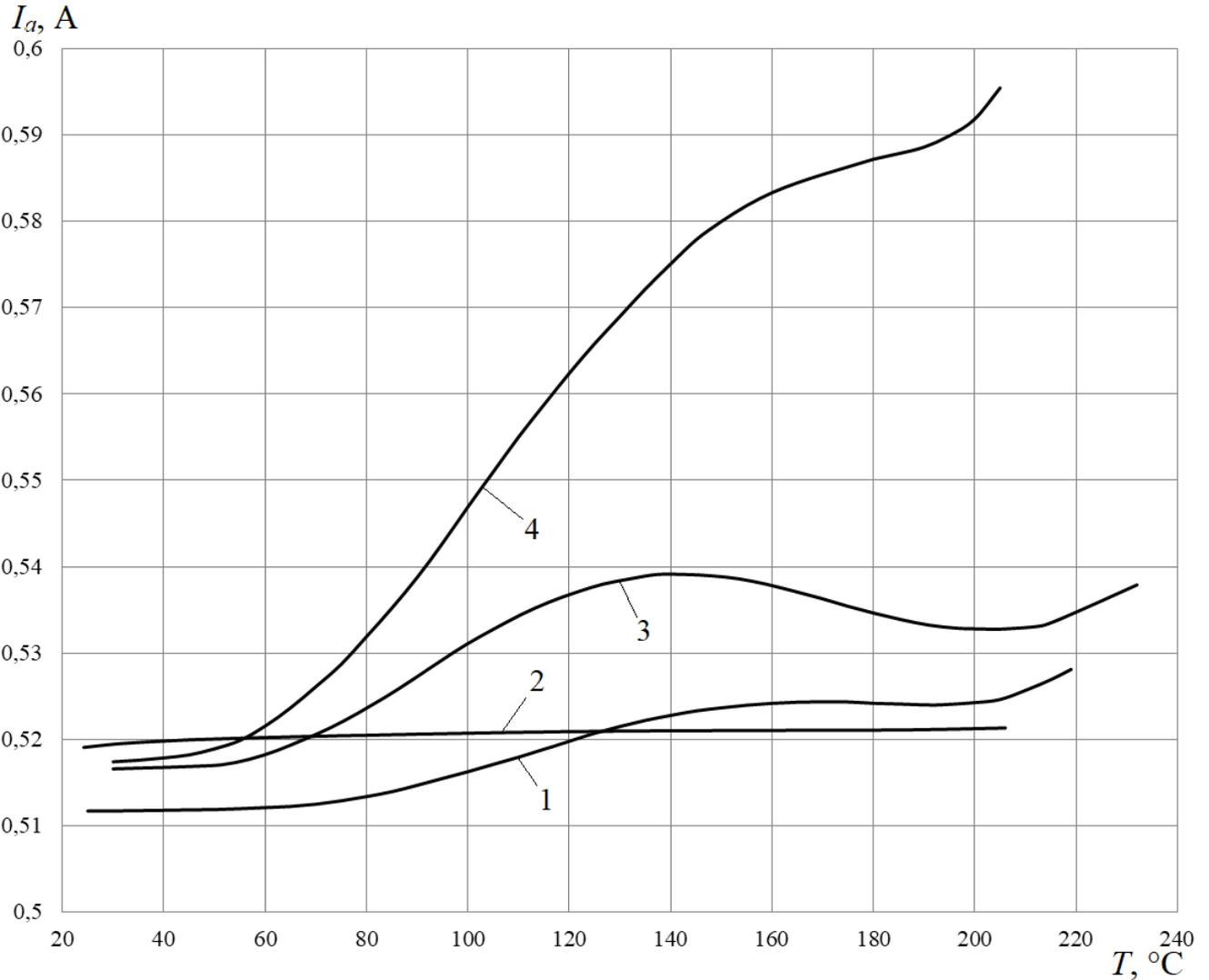


Рисунок 39 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$, полученные при исследовании полимерных материалов: 1 – стеклонаполненный полиамид (армамид ПА СВ 30-1 ЭТМ); 2 – полиуретан марки СКУ-7Л; 3 – полиамид ПА6; 4 – поливинилхлоридный пластикат ОМБ-6

При этом, наиболее характерные изменения в виде экстремумов значений анодного тока, среди исследованных материалов, наблюдаются в полиамидах (полиамид ПА6, стеклонаполненный полиамид), что, в свою очередь, как было отмечено ранее, нашло практическое применение при построении

автоматизированных систем управления процессами высокочастотной электротермии, описанных в ряде источников [82, 121, 151].

Анализ полученных результатов дает интересную картину, представленную на объединенных графиках температурных зависимостей анодного тока и линейного теплового расширения (рисунки 40-43).

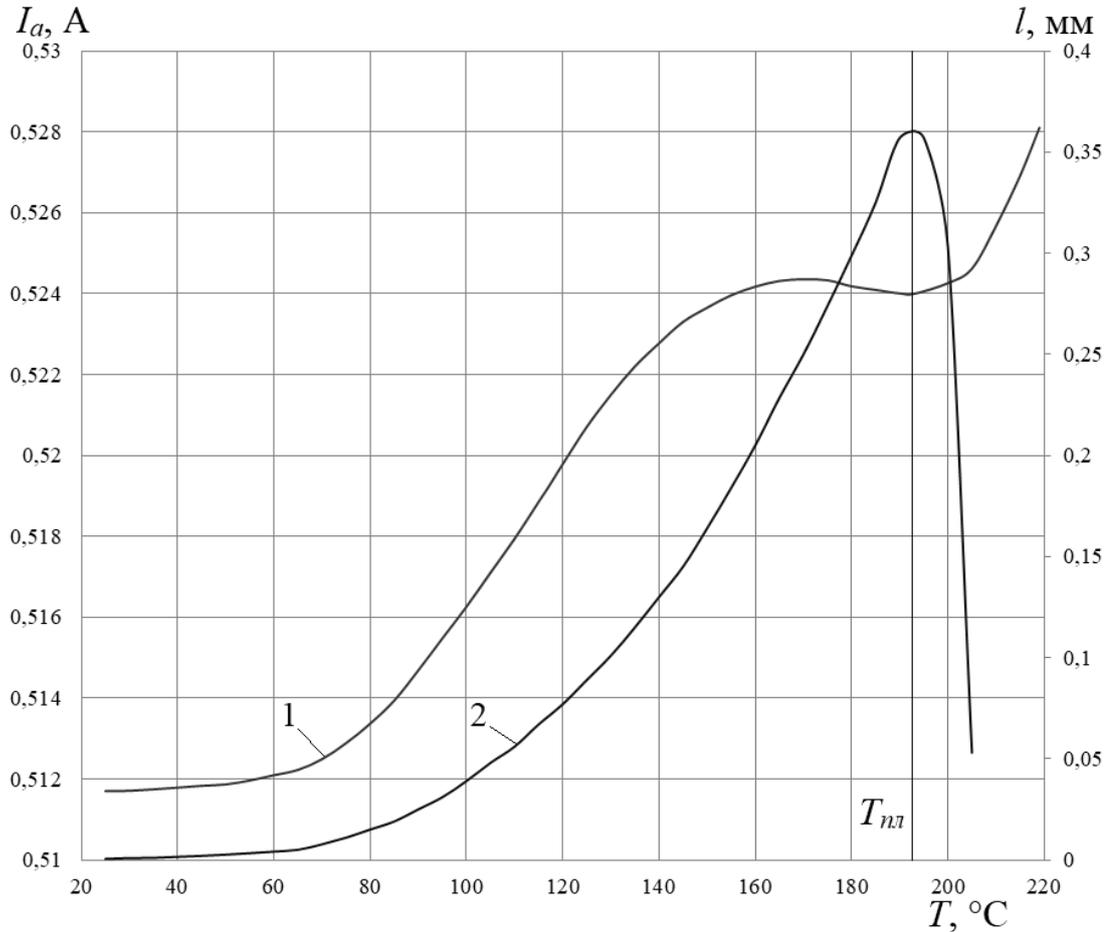


Рисунок 40 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$ (1) и $l = f(T)$ (2), полученные при исследовании стеклонаполненного полиамида (армида ПА СВ 30-1 ЭТМ)

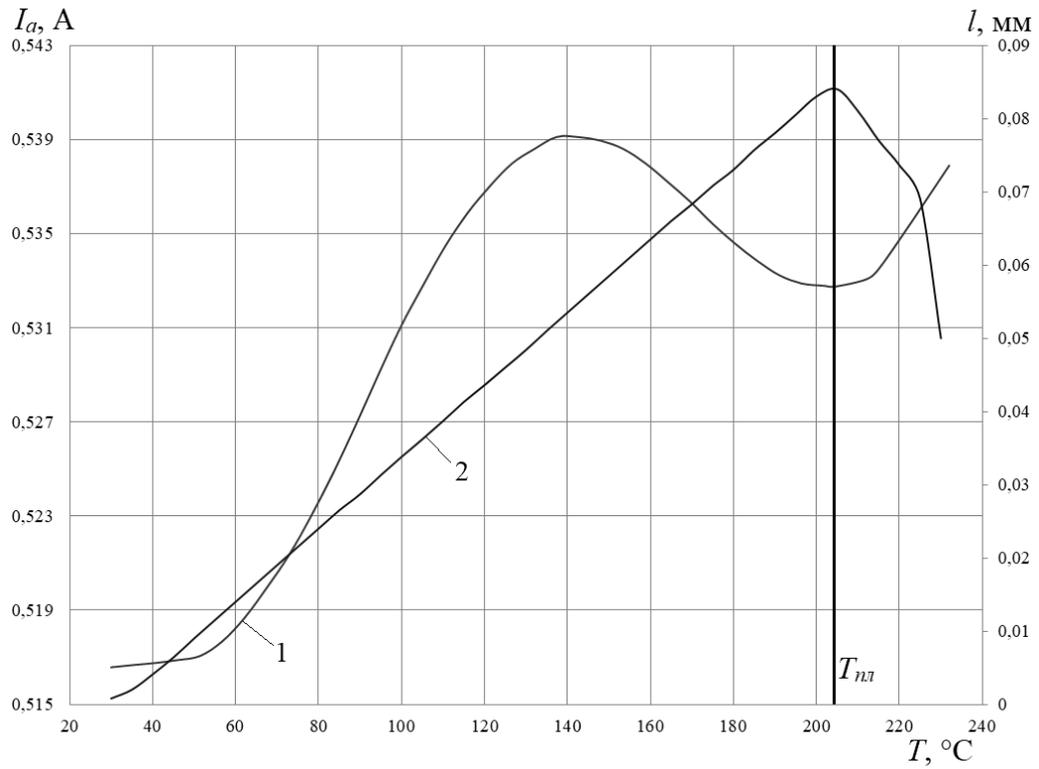


Рисунок 41 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$ (1) и $l = f(T)$ (2), полученные при исследовании полиамида ПА6

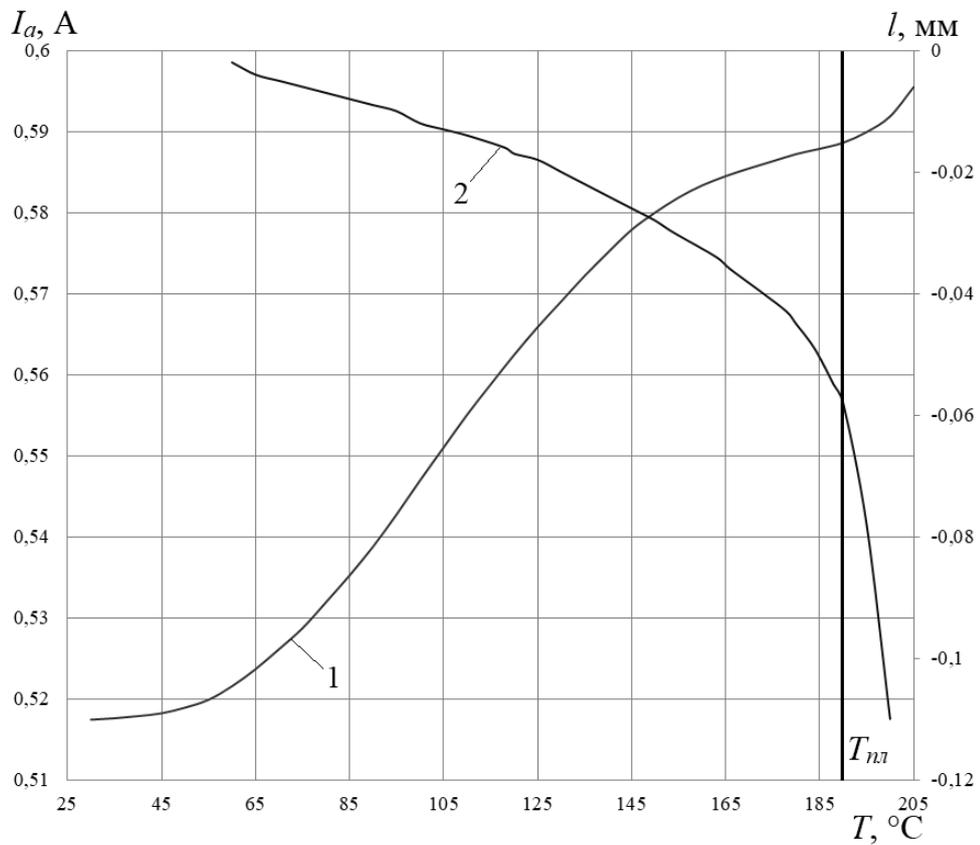


Рисунок 42 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$ (1) и $l = f(T)$ (2), полученные при исследовании пластика ПВХ ОМБ-60

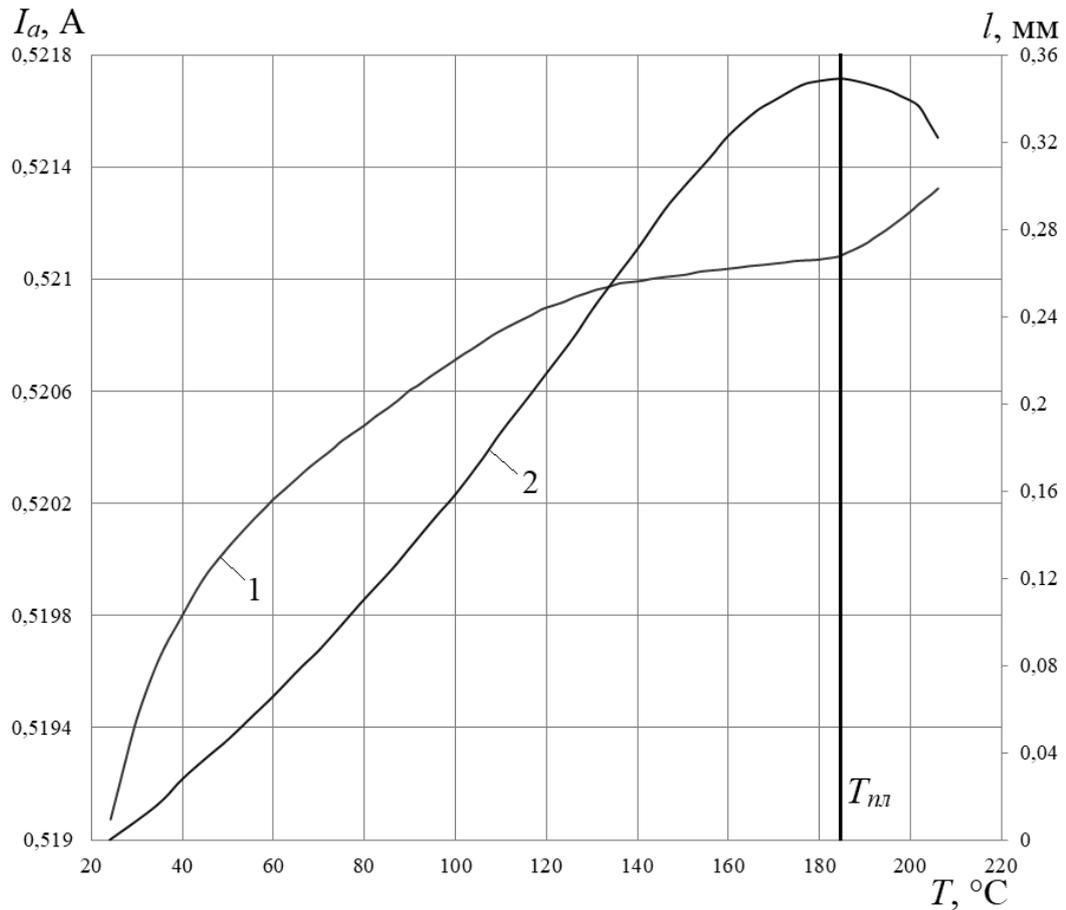


Рисунок 43 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$ (1) и $l = f(T)$ (2), полученные при исследовании полиуретана марки СКУ-7Л

На графиках четко просматривается момент достижения в полимере одного из фазовых переходов первого рода, а именно состояния плавления [138], которое соответствует минимуму анодного тока, что полностью соответствует данным из литературных источников [35, 82, 151].

Также, необходимо отметить, что для отдельных материалов деформационная кривая имеет монотонно ниспадающий вид, для других материалов вид кривой с точкой перегиба. Очевидно, что данный факт зависит от изменяющихся в процессе нагрева характеристик материалов и может быть использован для их идентификации.

В ходе анализа экспериментальных данных в виде температурных зависимостей анодного тока ВЧ-генератора для полиуретана марки СКУ-7Л и поливинилхлоридного пластиката ОМБ-60 (рисунки 39, 42, 43), полученных при

частоте 27,12 МГц, экстремумов выявлено не было. Подтверждающих и опровергающих фактов отсутствия экстремальных значений температурной зависимости диэлектрических потерь исследованных материалов в литературных источниках не обнаружилось.

Но, проведя детальный сравнительный анализ диэлектрических свойств исследованных материалов и основываясь на данных источника [73] было определено, что наличие или отсутствие температурных экстремумов диэлектрических потерь зависит от степени полярности полимерных материалов и определяется значением диэлектрической проницаемости ϵ' (таблица 7).

Таблица 7 – Значения диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ исследуемых полимерных материалов

Полимерный материал	Условия измерения	ϵ'	$tg\delta$
Полиамид ПА6	при частоте 10^6 Гц	3,0 – 3,6 [119]	0,025 – 0,03 [119]
Стеклонаполненный полиамид	–	3,0 – 3,5 [73]	0,01 – 0,04 [73]
Полиуретан	при частоте 50 Гц, температуре 20 °С	4,0 – 5,0 [100]	0,012 – 0,018 [100]
	при частоте 10^6 Гц	4,5 – 4,8 [95]	0,0114 [95]
Пластикат ПВХ	при частоте 10^6 Гц, температуре 20 °С	3,3 – 4,5 [100]	0,04 – 0,09 [100]
	–	3,2 – 4,5 [73]	0,014 – 0,1 [73]

Соответственно, полученная картина отражает невозможность построения экстремального управления процессами ВЧ-обработки сильнополярных полимерных материалов.

Таким образом, опираясь на результаты других исследований [82] и анализируя динамику изменения анодного тока, содержащую некоторое количество перегибов, была определена еще одна возможность управления по параметру температурной зависимости, а именно по скорости изменения анодного тока dI_a/dT (первая производная анодного тока).

Расчет dI_a/dT , в рамках настоящей работы, был произведен с использованием дифференциального оператора левой конечной разности первого порядка аппроксимации, согласно следующей формуле (8):

$$\frac{dI_a}{dT} = \frac{I_{a_m} - I_{a_{m-1}}}{T_m - T_{m-1}}, \quad (8)$$

где $m, (m-1)$ – текущее и предыдущее значения соответственно.

Графики скорости изменения анодного тока dI_a/dT приведены на рисунках 44-47.

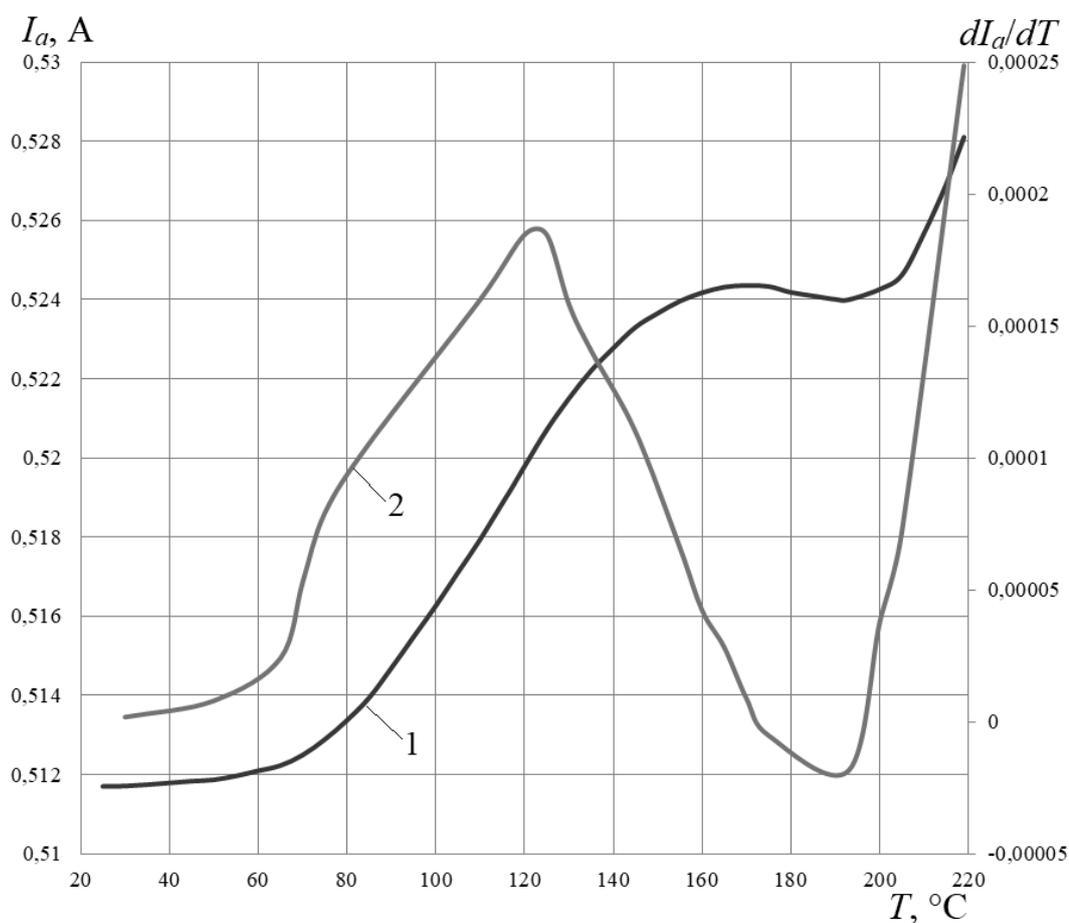


Рисунок 44 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$ (1) и dI_a/dT (2), полученные при исследовании стеклонаполненного полиамида (армида ПА СВ 30-1 ЭТМ)

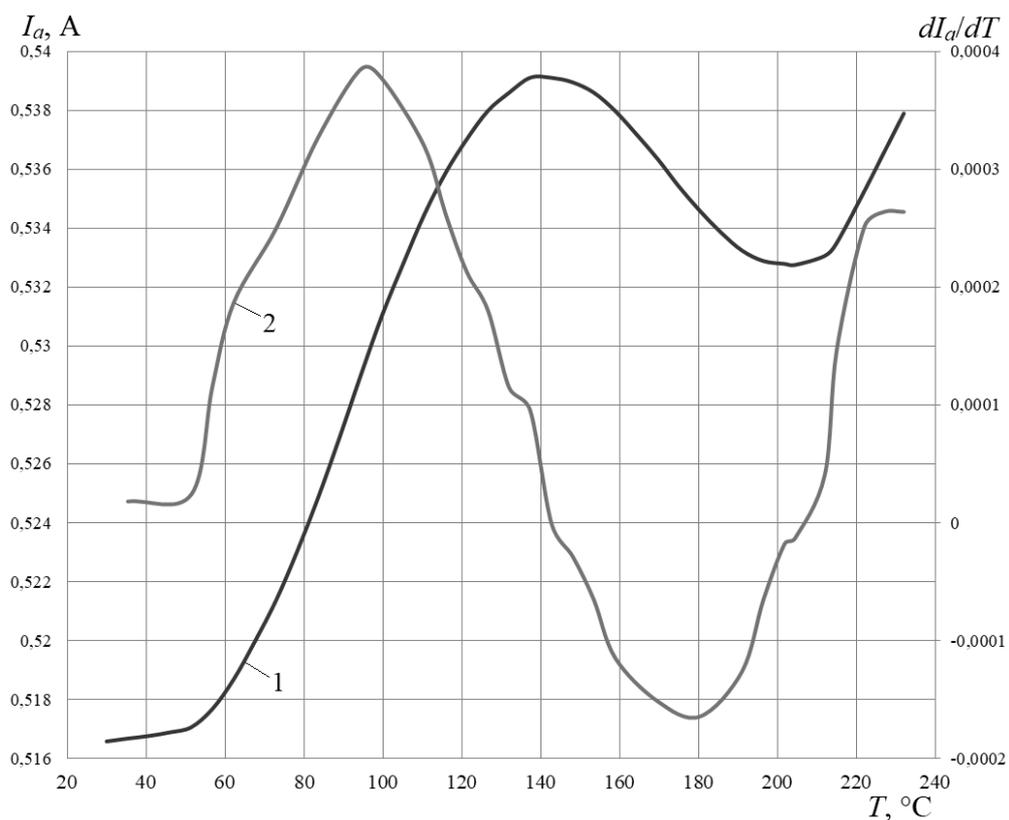


Рисунок 45 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$ (1) и dI_a/dT (2), полученные при исследовании полиамида ПА6

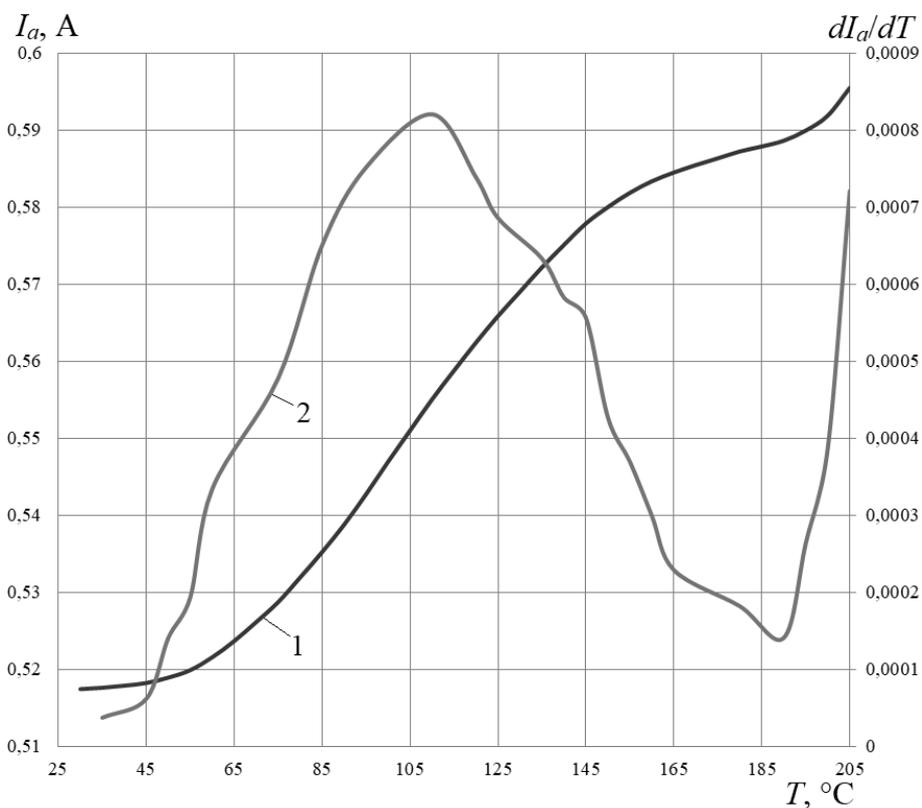


Рисунок 46 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$ (1) и dI_a/dT (2), полученные при исследовании пластика ПВХ ОМБ-60

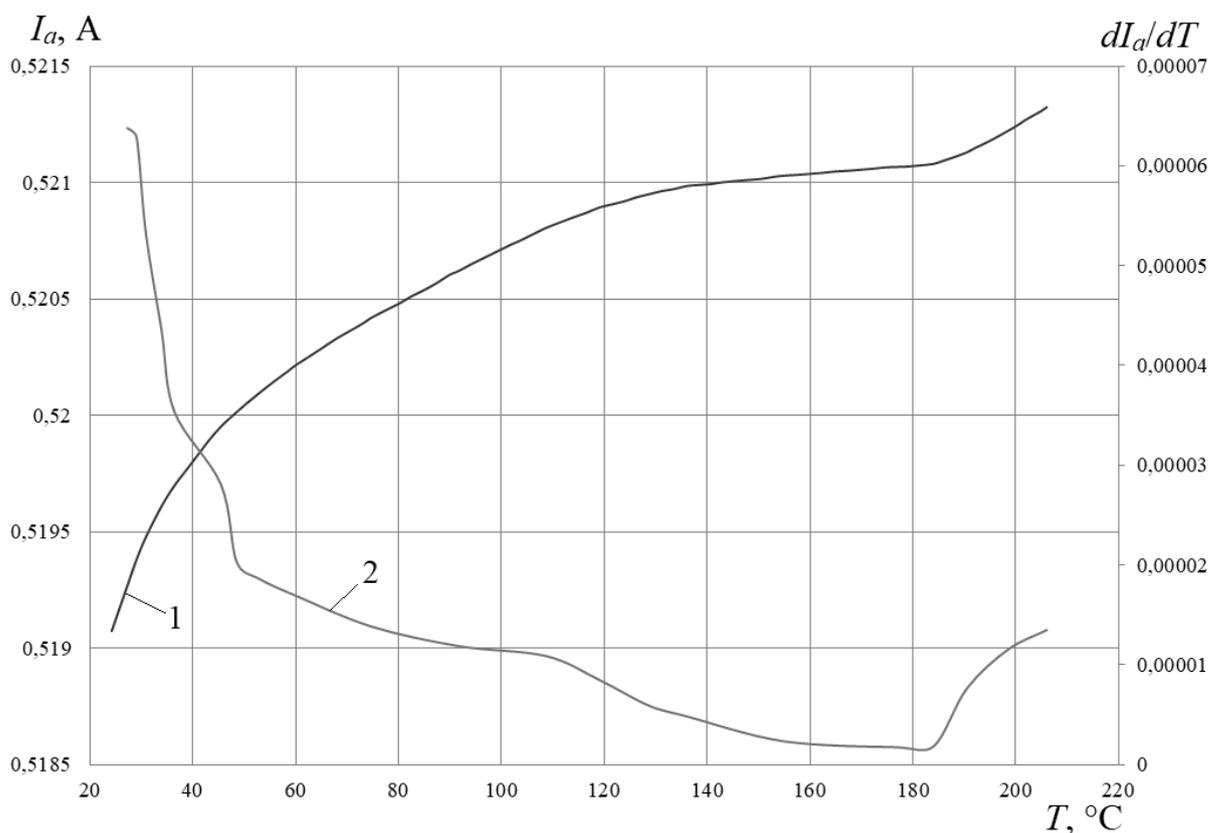


Рисунок 47 – Графики зависимостей $I_a = f(T)$ (1) и dI_a/dT (2), полученные при исследовании полиуретана марки СКУ-7Л

Анализ полученных данных (dI_a/dT) показал, что скорость изменения анодного тока также можно использовать в качестве контролируемого параметра обработки.

Так при организации процессов ВЧ-обработки полярных полимеров, таких как арамид (рисунок 44) и полиамид и (рисунок 45), в отличие от сильнополярных, наступление состояния плавления (минимум I_a) или дипольно-сегментальной подвижности (максимум I_a) можно определить по прохождению dI_a/dT через ноль и достижению сначала отрицательного, а затем положительного значения.

При ВЧ-обработке таких полимерных материалов как пластикат ПВХ (рисунок 46) и полиуретан (рисунок 47), не имеющих экстремумов дипольных потерь, т. е. сильнополярных, расчет dI_a/dT раскрывает новые реперные точки (экстремумы dI_a/dT), а вместе с ними и новые возможности организации технологических процессов ВЧ-электротермии и автоматизации их управления.

Также по результатам произведенных работ был оформлен и получен патент на изобретение № 2625630 [137] (приложение Д).

2.3 Практическая значимость нового контролируемого параметра – скорости изменения анодного тока

Полученные в процессе исследования экспериментальные зависимости скорости изменения анодного тока при электротермической обработке пластика ПВХ отражают картину приближения в обрабатываемом полимере к состоянию дипольно-групповых потерь в виде первого экстремума (максимум) dI_a/dT . В общем случае количество состояний, соответствующих дипольно-групповым потерям (β , γ , δ) (рисунок 14) может быть больше одного, следовательно и количество экстремумов скорости изменения анодного тока также может быть больше одного. При этом, как видно из рисунков 44-47, экстремумы dI_a/dT , в отличие от экстремумов I_a , претерпевают смещение в области меньших температур, не рассматриваемых ранее применительно к процессам ВЧ-электротермии.

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

Ранее, в данной работе, уже было отмечено, что для ряда полимерных материалов, восприимчивых к ВЧ-излучению, проведение технологических процессов электротермической сушки и тем более сварки, ориентируясь на высокотемпературные экстремумы I_a , невозможно, поскольку они имеют низкий порог термостойкости (ниже температуры текучести). Так, например, было установлено, что ПВХ начинает разрушаться с выделением HCl при температуре уже чуть выше 100 °С, а при температурах переработки около 150-200 °С – деструкция протекает еще быстрее [74, 88, 110, 111, 135, 160].

Следовательно, для ПВХ, его модификаций и других полимеров с низкой температурой деструкции ($T_{\text{дест.}} < T_{\text{пл.}}$), наиболее целесообразно рассматривать технологические процессы, осуществимые ВЧ-электротермией, такие как: сушка, термическая обработка с целью восстановления прочностных свойств и пропитка, формируя управляющее воздействие по первому экстремуму dI_a/dT .

Отдельное внимание необходимо уделить такому сильнополярному материалу как полиуретан. Он характеризуется высокими физико-химическими и эксплуатационными свойствами. Имеет низкое водопоглощение (1,2-2,1 %), высокие адгезивные свойства и используется для защиты объектов от действия воды, коррозии. При этом он также устойчив к действию микроорганизмов, плесени, гниению и может использоваться в грунте [61, 134].

В ходе литературного обзора, информации о применении полиуретана как объекта ВЧ-электротермии, найдено не было. Но проведенные экспериментальные исследования позволили проанализировать его восприимчивость к высокочастотному воздействию. Как уже отмечалось, была получена характерная для сильнополярных полимеров амперометрическая зависимость диэлектрических потерь. Определена скорость изменения анодного тока с экстремумом в точке начала плавления (экспериментально определенная температура плавления 184 °С). Все это позволяет говорить о возможности разработки новых технологических процессов его ВЧ-обработки, например, ВЧ-сварки изделий, а также ВЧ-заварки трещин, ориентируясь при организации системы управления данными процессами обработки на минимум dI_a/dT .

Интересно рассмотреть процесс наполнения полимерных материалов для придания им специальных свойств. Так в работе [38] отражены результаты исследований жидкофазного наполнения полимеров и композитов на их основе смазочными веществами. Разработанная авторами технология наполнения предусматривает погружение предварительно высушенных полимерных образцов в ванну термовакuumной камеры, частично заполненную антифрикционной жидкостью, выдержку в ванне при температуре 50 °С с низким давлением и периодическим замером веса образцов.

Подобную технологическую систему можно создать применительно и к высокочастотному оборудованию и производить маслonaполнение полимеров в ВЧ-поле. При этом, воздействие ВЧ-энергии, предположительно, ускорит процесс наполнения. А управление данным процессом, учитывая сравнительно низкую температуру обработки (50 °С [38], 52-69 °С [147]), возможно организовать по контролю момента достижения в полимере первого экстремума dI_a/dT и выдержки в этом положении в течении необходимого времени, а также и по другим реперным точкам (максимум I_a), основываясь на другой рекомендуемой температуре (150 °С [113]) обработки.

Использование ВЧ-нагрева при маслonaполнении полимеров во многом является малоизученным и требует проведение ряда исследований, одним из которых является исследование влияния ВЧ-энергии на наполнитель (масло).

Исходя из вышеизложенного можно заключить, что полученные в ходе экспериментального исследования реперные точки можно использовать в качестве новых контролируемых параметров как при организации существующих процессов ВЧ-электротермии, так и при разработке новых процессов обработки. При этом, необходимо отметить, что отличный друг от друга характер, выявленных в рамках настоящего диссертационного исследования, температурных зависимостей диэлектрических потерь полимерных материалов с различной степенью полярности требует разработки новой классификации всех полимеров по управляемости при построении экстремальных систем.

2.4 Исследование процессов импульсного высокочастотного воздействия

В ходе экспериментов, в рамках настоящего диссертационного исследования, был проведен анализ импульсного ВЧ-воздействия на полимер, который выявил новую зависимость анодного тока в процессе обработки от состояния материала.

Исследования проводились с использованием контактного нагрева внешним источником тепла (АСНИ ВЧ, п. 2.1. настоящего исследования) и периодическом

кратковременном (1 секунда) воздействии на серию полимерных образцов (5 шт.) ВЧ-полем с отключением контактного нагрева. Результаты представлены на рисунке 48.

Необходимо отметить, что годограф, проведенный к вершинам импульсов анодного тока показывает отсутствие экстремумов, что позволяет отнести данный полимер к сильнополярным. 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 в процессе обработки.

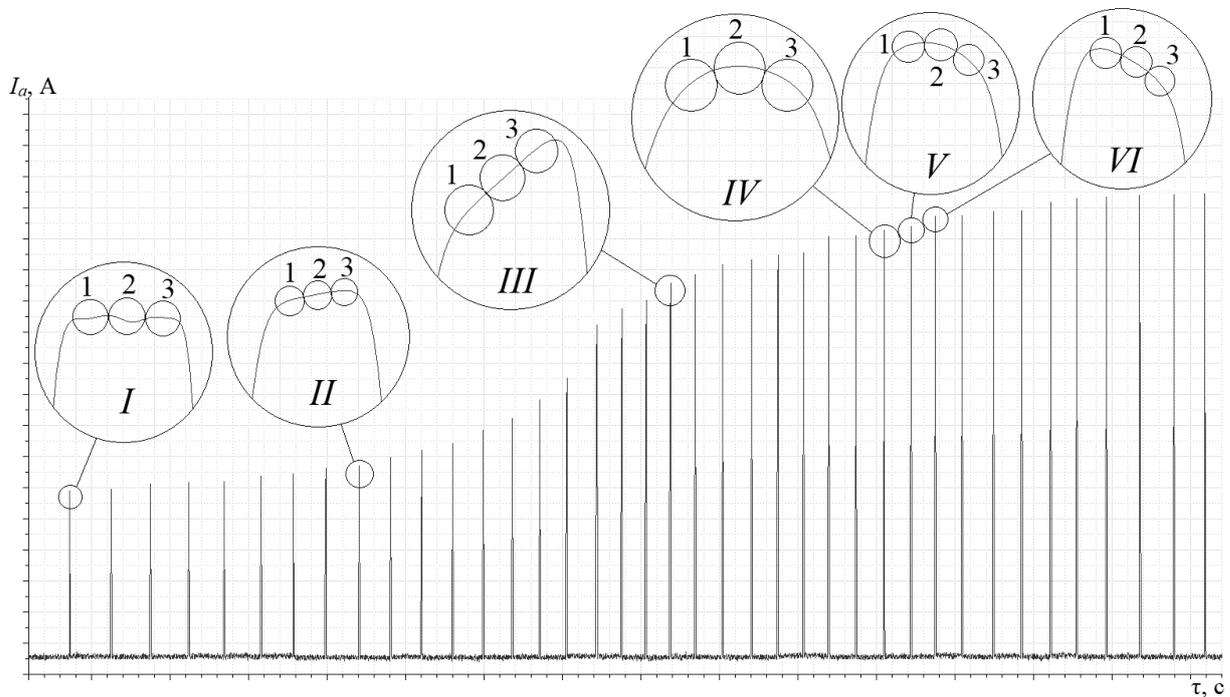


Рисунок 48 – Иллюстрация ВЧ-импульсов (I - VI) по каналу I_a при исследовании пластика ПВХ ОМБ-60: 1-3 – фронт, центральная часть и спад ВЧ-импульса соответственно

Полученную картину можно применить при построении системы автоматизированного управления процессами, ранее мало исследованной, импульсной высокочастотной обработки.

Предлагается следующий принцип организации управления процессом обработки. Каждый импульс (I – VI) ВЧ-сигнала разбивается на три равных участка с одинаковым количеством значений анодного тока. На каждом участке

определяется среднее значение анодного тока. Так по импульсу I из рисунка 48 видно, что средние значения I_a на каждом участке приблизительно равны: $I_1 \approx I_2 \approx I_3$. На импульсах II и III наблюдается увеличение среднего значения анодного тока каждого последующего участка: $II_1 < II_2 < II_3$, $III_1 < III_2 < III_3$. На импульсе IV наибольшее среднее значение I_a наблюдается на участке 2, а на участках 1 и 2 приблизительно равны: $IV_1 < IV_2 > IV_3$, $IV_1 \approx IV_3$. Исходя из полученных данных следует, что импульс IV соответствует появлению в полимерном образце дипольно-сегментальных потерь, т. е. импульс IV можно считать условным максимумом I_a . Импульс V имеет приблизительно равные средние значения I_a на участках 1 и 2, а участок 3 имеет меньшее значение: $V_1 > V_3 < V_2$, $V_1 \approx V_2$. Импульс VI имеют следующий вид: $VI_1 > VI_2 > VI_3$. Все последующие, не представленные импульсы, имеют картину аналогичную импульсу VI , т. е. при обработке пластика ПВХ не было выявлено и условного минимума состояния I_a .

Более полная картина, содержащая оба экстремума, была получена в процессе исследования серии полиамидных образцов по той же методике. Так на рисунке 49 наблюдается аналогичная картина изменения угла наклона анодного тока с дополнением второго экстремума (минимума), полученная при исследовании полиамида ПА6:

- импульс $I - I_1 \approx I_2 \approx I_3$;
- импульс $II - II_1 < II_2 < II_3$;
- импульс $III - III_1 < III_2 < III_3$;
- импульс $IV - IV_1 > IV_2 > IV_3$;
- импульс $V - V_1 \approx V_2 \approx V_3$;
- импульс $VI - VI_1 < VI_2 < VI_3$.

Средние значения анодного тока на участках импульса III говорят о приближении к первому максимуму анодного тока, следующий за ним не отображенный импульс показывает состояние спада, аналогично импульсу IV . Т. е. при организации управления процессом импульсной обработки необходимо соблюдать требуемую дискретность обработки для каждого конкретного материала с тем, чтобы идентифицировать достигнутый температурный переход.

Приближенное равенство средних значений анодного тока на участках импульса V отражает достижение минимума анодного тока, идентификация которого необходима при организации ВЧ-сварки.

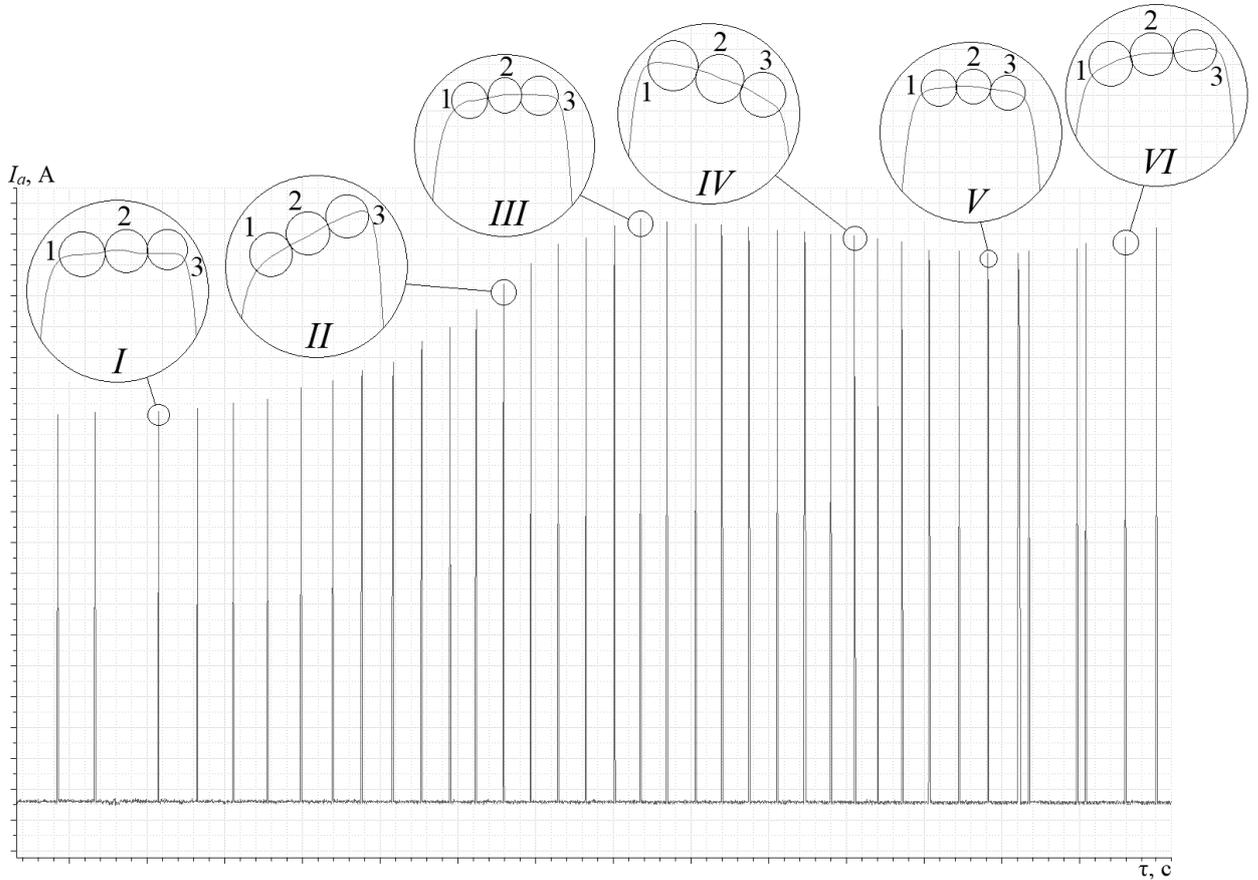


Рисунок 49 – Иллюстрация ВЧ-импульсов (I - VI) по каналу I_a при исследовании полиамида ПА6: 1-3 – фронт, центральная часть и спад ВЧ-импульса соответственно

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что представленный принцип управления процессами импульсной электротермической обработки полимерных материалов также позволит производить в автоматизированном режиме процессы сушки, сварки, термоупрочнения и т. д. предположительно с большей равномерностью прогрева обрабатываемой детали по примерному алгоритму, блок- схема которого представлена на рисунке 50. Но, наряду с этим, сам по себе процесс импульсной ВЧ-обработки еще нуждается в дополнительном исследовании.

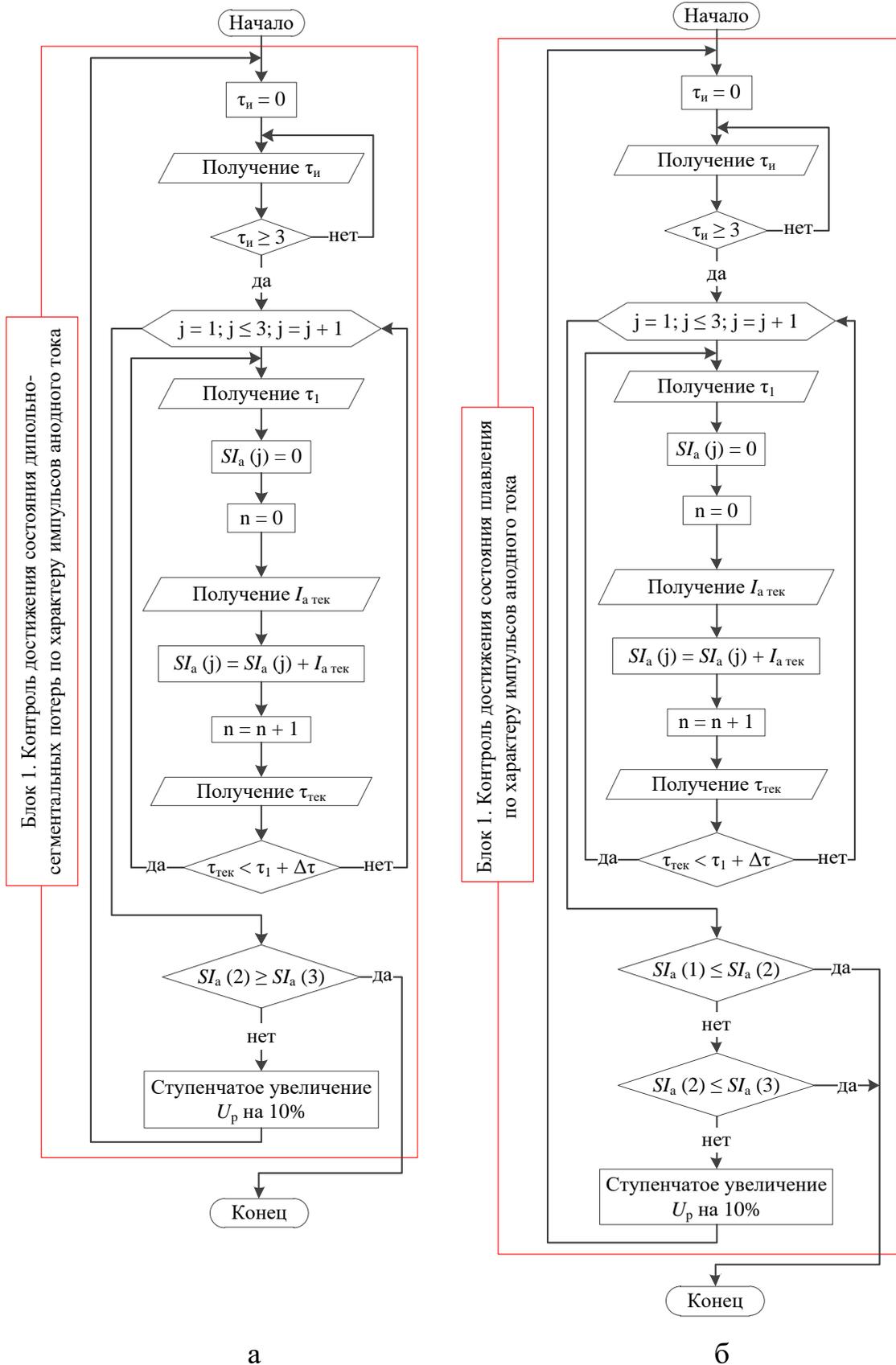


Рисунок 50 – Блок-схема алгоритма контроля достижения состояния дипольно-сегментальных потерь (а) и состояния плавления (б) по характеру импульсов анодного тока

Для определения возможности использования импульсного нагрева при построении АСУ ТП необходимо оценить влияние перехода от непрерывного к дискретному ВЧ-нагреву на равномерность прогрева обрабатываемой детали.

Так, несколько забегаая вперед, с использованием заявленной и в последствии разработанной математической модели нагрева технологической системы в 3D постановке было произведено сравнение результатов расчета распределения теплового поля по сечению полиамидной детали при импульсном нагреве и непрерывном нагреве (рисунок 51).

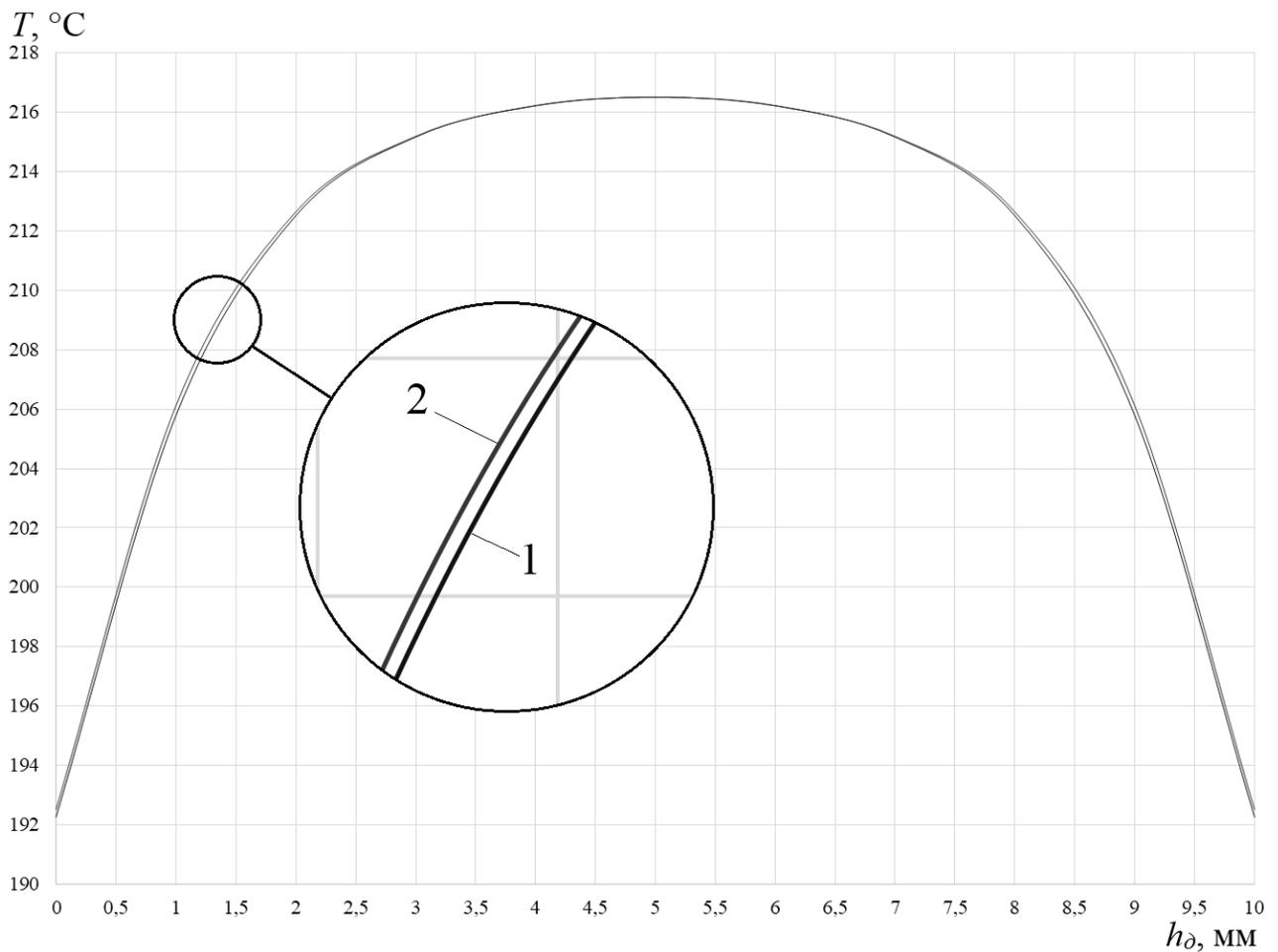


Рисунок 51 – Сравнение результатов расчета распределения теплового поля

Импульсный нагрев был организован со скважностью 2, шириной импульса 1 секунда. Мощность внутренних источников тепла была задана равной 5 кВт. Расчетное время нагрева до температуры плавления составило 39,3 секунды. Исходя из полученного времени расчетно-экспериментальным путем была

определена мощность внутренних источников тепла при непрерывном нагреве, которая составила 1,708 кВт.

Как представлено на рисунке 51, предположенное увеличение равномерности прогрева обрабатываемой детали от импульсной обработки не оправдало своих ожиданий и при этом наибольшее расхождение температуры составило около 0,063 % от полученной температуры плавления.

Но, несмотря на это, полученные результаты расчета распределения теплового поля по сечению полимера при импульсном воздействии позволяют оценить влияние ширины ВЧ-импульса на исследуемый материал и определить минимальную продолжительность высокочастотного воздействия, при которой температурное изменение полимера в ВЧ-поле близко к нулю, что в свою очередь было необходимо при разработке алгоритма управления (рисунок 34) процессом исследования температурной зависимости линейного расширения и амперометрической зависимости диэлектрических потерь от температуры в исследуемых материалах, как дополняющего блока существующей АСНИ ВЧ. В соответствии с чем продолжительность высокочастотного воздействия в разработанном алгоритме для каждого исследованного материала определялась расчетно-экспериментальным путем с использованием, разработанной в рамках настоящего диссертационного исследования, математической модели нагрева технологической системы в 3D постановке.

Также, необходимо отметить, что помимо чисто импульсной ВЧ-обработки можно производить и импульсный контроль. Так при обработке сильнополярных полимеров, не имеющих экстремальных значений диэлектрических потерь, можно построить систему управления по периодически (импульсно) контролируемому анодному току ВЧ-генератора согласно описанному выше принципу при этом опираясь на выявленные условные экстремумы значений I_a . Полученная система управления также будет экстремальной.

И при обработке полярных полимеров, ввиду того, что I_a все же является косвенным параметром, данную систему также можно использовать в качестве

параллельно работающей системы, обеспечивающей повышение надежности производимых процессов ВЧ-электротермии.

Новые контролируемые параметры (скорость изменения анодного тока при непрерывном ВЧ-воздействии и анодный ток при импульсном ВЧ-воздействии) 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. Укрупненно данная методика управления ВЧ-электротермии заключается в реализации следующей последовательности действий:

1. Идентификация обрабатываемого полимера по управляемости с целью определения контролируемого параметра обработки, вида и количества контролируемых экстремумов этого параметра.

2. Подготовка технологического устройства.

3. Акклиматизация обрабатываемого изделия и вывода процесса ВЧ-электротермии в режим максимально возможного воздействия.

4. Контроль динамики возникновения частичных разрядов с целью распознавания предпробойного состояния и ликвидации электрического пробоя.

5. Организация контроля выбранного экстремума с целью достижения в обрабатываемом полимерном материале необходимого фазового и (или) релаксационного состояния.

6. Прекращение процесса ВЧ-обработки либо при достижении необходимой температуры обработки, определяемой по текущему экстремуму, либо по достижению экспериментально определяемого времени обработки.

7. Обеспечение выдержки обрабатываемых деталей под давлением (при необходимости).

Подробное описание методики управления процессом ВЧ-обработки полимерных изделий разной степени полярности изложено в четвертой главе диссертационной работы.

2.5 Совершенствование программного комплекса расчета нагрева элементов технологической системы при высокочастотной термической обработке

В первой главе настоящей работы были проанализированы существующие на сегодня аналитические и математические модели процесса высокочастотного нагрева, имеющие целый ряд недостатков и недоработок, главной из которых является отсутствие моделей объемного распространения тепла в процессе ВЧ-электротермии. В связи с чем, одной из задач настоящего исследования является совершенствование второй части существующей АСНИ ВЧ [82] в направлении формирования математической модели, позволяющей анализировать объемное распространение тепла в процессе ВЧ-электротермии при обработке полимерных изделий как простой, так и сложной формы, учитывающей, во-первых, непостоянство всех значимых температурных свойств обрабатываемого изделия и их влияние на процесс обработки; во-вторых, свойства материалов, не относящихся к полимерам (например, древесина, влагосодержащие отходы производств и др.) и их влияние; в третьих непостоянства удельной мощности внутренних источников тепла в процессе обработки; в четвертых, созданная модель не будет иметь ограничений по количеству слоев технологической системы.

Более полные результаты работы и спектр возможностей заявленной математической модели будут представлены в следующей главе.

2.6 Выводы по главе

1. Усовершенствована аппаратно-программная часть АСНИ ВЧ, позволяющая производить линейный равномерный нагрев полимерного материала и периодическое кратковременное воздействие на него, при отключенном нагреве, проникающим высокочастотным электрическим полем после каждого повышения температуры полимера на заданный градус, что позволяет в автоматизированном режиме определять температурную зависимость

линейного теплового расширения исследуемого полимера и амперометрическую зависимость его диэлектрических потерь при проведении системных исследований высокочастотной обработки полимеров.

2. Используя возможности полученной аппаратно-программной части АСНИ ВЧ проведены экспериментальные исследования взаимовлияния электрофизических параметров электротермического оборудования и полимерных материалов разной степени полярности (пластикат ПВХ ОМБ-60, полиамид ПА6, арзамид ПА СВ 30-1 ЭТМ и полиуретан марки СКУ-7Л). При этом были получены температурные зависимости диэлектрических потерь, отражающие отличный друг от друга характер восприимчивости исследованных материалов к высокочастотному воздействию.

3. Даны предпосылки по разработке новой классификации полимерных материалов по управляемости при построении экстремальных систем.

4. Проанализировано влияние импульсного ВЧ-воздействия на полимер, что позволило выявить новую зависимость анодного тока в процессе обработки от состояния материала.

5. Выявлены новые контролируемые параметры процесса высокочастотной обработки полимерных материалов в виде скорости изменения анодного тока ВЧ-генератора при непрерывном воздействии и анодного тока ВЧ-генератора при импульсном воздействии.

6. Сформирована 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;

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

3 Математическая модель нагрева технологической системы в 3D постановке

3.1 Математическое описание объемного нагрева технологической системы

Положив в основу математические модели, предложенные в [82, 121], была сформирована система уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла (9), описывающая объемное распределение температуры в многослойной технологической системе в процессе обработки. Технологическая система при этом включает в себя изменяемое количество: электродов, изоляторов и обрабатываемых материалов.

$$\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 (9)$$

где ρ_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; τ – 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:

$$T|_{\tau=0} = T_H, \quad 0 \leq x \leq X, \quad 0 \leq y \leq Y, \quad 0 \leq z \leq Z, \quad (10)$$

где T_H , T – начальная и текущая температура материала в процессе обработки соответственно; x , y , z – текущая координата рассматриваемого слоя технологической системы.

При единичной обработке начальная температура каждого слоя группы технологической системы равна температуре нормальных условий [53]. 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 (11), (12):

$$-\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=0, X} = \alpha_i \cdot \Delta T_i, \quad (11)$$

$$-\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=0, Y} = \alpha_i \cdot \Delta T_i, \quad (12)$$

граничные условия на внешних границах электродов:

$$-\lambda_{11}(T_{11}) \frac{\partial T_{11}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{11} \cdot \Delta T_{11}, \quad (13)$$

$$-\lambda_{3s}(T_{3s}) \frac{\partial T_{3s}}{\partial z} \Big|_{z=Z} = \alpha_{3s} \cdot \Delta T_{3s}, \quad (14)$$

где ΔT_i – разница температур поверхности тела (слоя) и окружающей среды; α_i – коэффициент теплообмена k -го, s -го и m -го слоя i -той группы технологической системы.

В работе [82] было отмечено, что при обработке первых и единичных заготовок, учитывая относительно низкие температуры плавления исследуемых термопластов и высокую динамику их разогрева, теплообменом технологической системы с окружающей средой можно пренебречь. При моделировании обработки партии деталей будем пользоваться этим же предположением, дополнительно имея ввиду низкие коэффициенты теплоотдачи обрабатываемого материала полимера и теплоизолятора – картона. Тем самым, при решении разработанной системы уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла (9), граничные условия, описанные в уравнениях (11)-(14), принимаем равными нулю.

В дальнейшем считаем целесообразным провести усовершенствование математической модели, с учетом задачи определения изменяющегося в процессе нагрева коэффициента теплообмена всех слоев технологической системы.

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

$$\begin{cases} T_j = T_{j+1} \\ \lambda_i(T_i) \frac{\partial T_j}{\partial z} = \lambda_{i+1}(T_i) \frac{\partial T_{j+1}}{\partial z} \end{cases} \quad \text{при } z = z_j \quad (j = 1 \dots k \dots m \dots s), \quad (15)$$

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:

$$P_1(T_1) = P_3(T_3) = 0 \quad (16).$$

Следует отметить, что в правой части третьего уравнения системы (9) указана мгновенная удельная мощность $P_2(T_2)$, определяемая расчетно-экспериментальным путем.

На рисунке 52 представлена 3D пятислойная технологическая схема ВЧ-обработки, соответствующая изложенному выше математическому описанию.

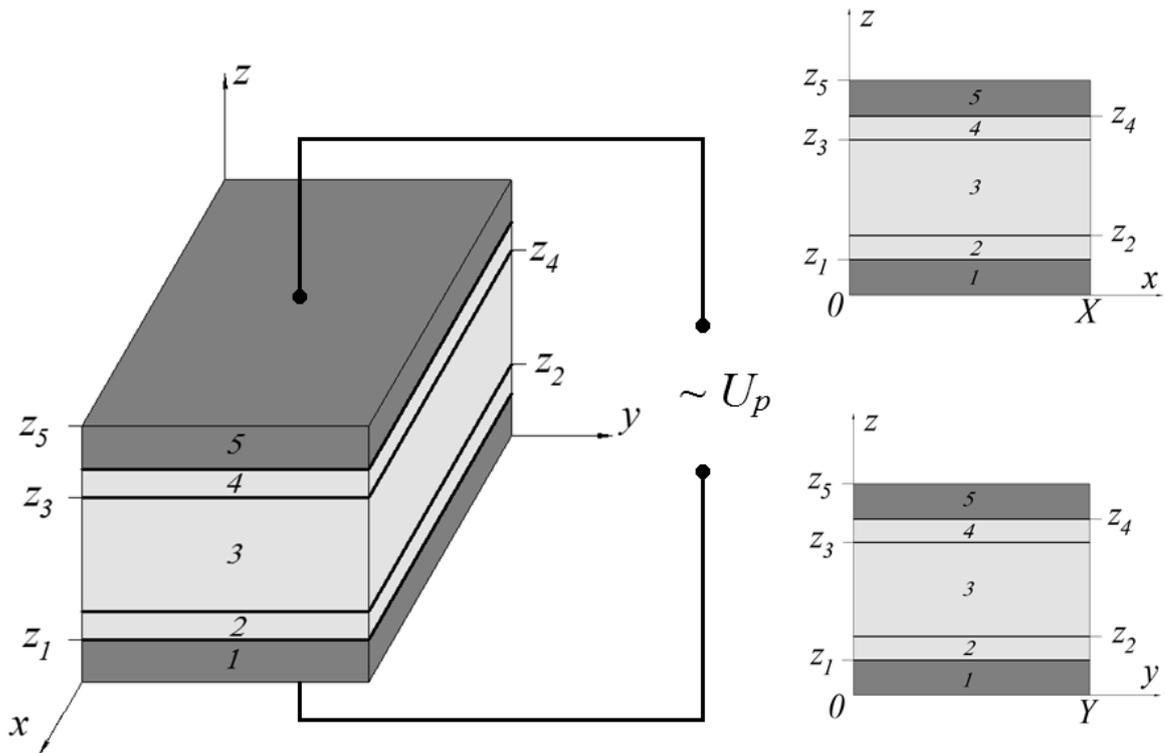


Рисунок 52 – 3D пятислойная технологическая схема ВЧ-обработки, где 1-ую группу технологической схемы составляют: 1 – низкопотенциальный электрод рабочего конденсатора, 2 – изолятор; 2-ую группу: 3 – обрабатываемый полимер (внутренний источник тепла); 3-ью группу: 5 – высокопотенциальный электрод рабочего конденсатора, 4 – изолятор; X , Y , z_i – координаты границ слоев; U_p – напряжение на рабочем конденсаторе

Решение составленной системы уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла с учетом изложенных начальных и граничных условий аналитическим методом весьма трудоемко и не всегда возможно даже для простых задач, исходя из этого, для ее решения будем использовать численные методы.

3.2 Алгоритм расчета температурного поля при нагреве технологической системы

Расчет температурного поля численными методами производят ряд существующих высокоточных программных комплексов, к которым можно отнести MSC Nastran, MSC Marc, MSC Sinda и др. [15]. Все перечисленные программные продукты производят расчет с достаточной точностью, но MSC Sinda является специализированным программным комплексом пригодным для решения задач именно теплового анализа и в полной мере способным учесть все температурные свойства реальных объектов, чего нельзя сказать об остальных программных продуктах.

Данный комплекс производит сложные тепловые расчеты с использованием метода конечных разностей [15]. Результаты теплового анализа, полученные в MSC Sinda можно использовать для построения систем автоматизированного и автоматического управления процессами обработки изделий из полимерных материалов.

В связи с этим решение составленной системы уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла было реализовано в программном комплексе MSC Sinda.

Блок-схема расчета (рисунок 53) системы уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла во всем объеме слоев технологической системы с заданным временным интервалом выходных данных во всем диапазоне температур обработки состоит из ряда основных этапов. Первый этап состоит в построении геометрической модели исследуемой технологической системы.

Второй этап посвящен построению конечно-разностной сетки. Это один из наиболее важных этапов численного анализа, обеспечивающий получение адекватных результатов расчета. При этом точность расчета численным методом во многом зависит от правильного выбора типа и размеров разностных элементов.

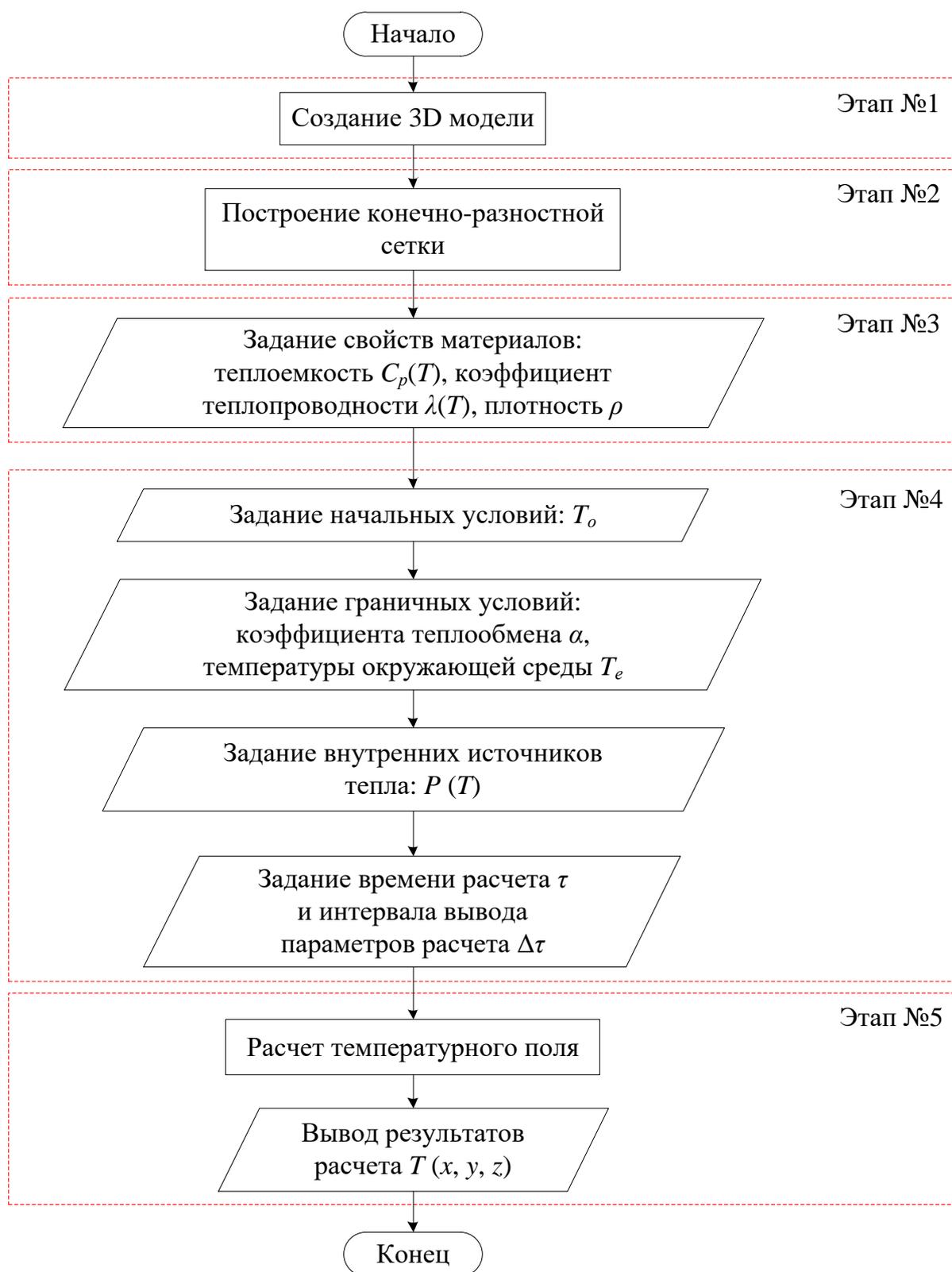


Рисунок 53 – Блок-схема расчета системы уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла во всем объеме слоев технологической системы с заданным временным интервалом на всем диапазоне температур обработки

Так, например, в работах [15, 112] утверждается, что при проведении конечно-элементного анализа, оптимальным разбиением является разбиение модели на элементы, имеющие форму простейших равносторонних фигур (равносторонний треугольник, квадрат, равносторонний тетраэдр, куб), что, в свою очередь, также приемлемо при проведении численного анализа разностными методами. При этом, необходимо отметить, что данное разбиение создает предпосылки для проведения как теплового анализа, так и анализа деформационного состояния элементов технологической системы, т. е. создания математической модели анализа деформационного состояния при наложении тепловой нагрузки.

Окончательный выбор размеров конечно-разностной сетки осуществлялся экспериментально в соответствии с условием решаемых задач. Так для проведения теплового анализа модели, не имеющей криволинейных линий, достаточно использовать регулярную сетку с различными расстояниями по координатным осям между узлами, аналогично элементу типа Hex с порядком Hex 8 для метода конечных элементов (МКЭ) [15]. В дальнейшем будем условно вести речь о конечно-разностном узловом элементе и его ребрах, принимая во внимание универсальность моделировщика MSC Patran при построении конечно-элементных моделей и конечно-разностных сеток.

На примере трехслойной технологической системы (рисунок 54а) с размерами слоев $0,02 \times 0,02 \times 0,01$ м были проведены исследования влияния уменьшения ребра конечно-разностного элемента (h_p) на точность вычисления. При этом два крайних слоя (1 и 3, рисунок 54) имитировали обкладки рабочего конденсатора, изготовленные из нержавеющей стали, с расположенным между ними полиамидным образцом (ПА 6) (2, рисунок 54). Нагрев образца производился напряжением $U_p = 800\text{В}$, контроль и отображение результатов осуществлялся на 18-ой секунде времени расчета. Первый расчет производился при размере ребра равным 2 мм, а остальные с последовательным его уменьшением.

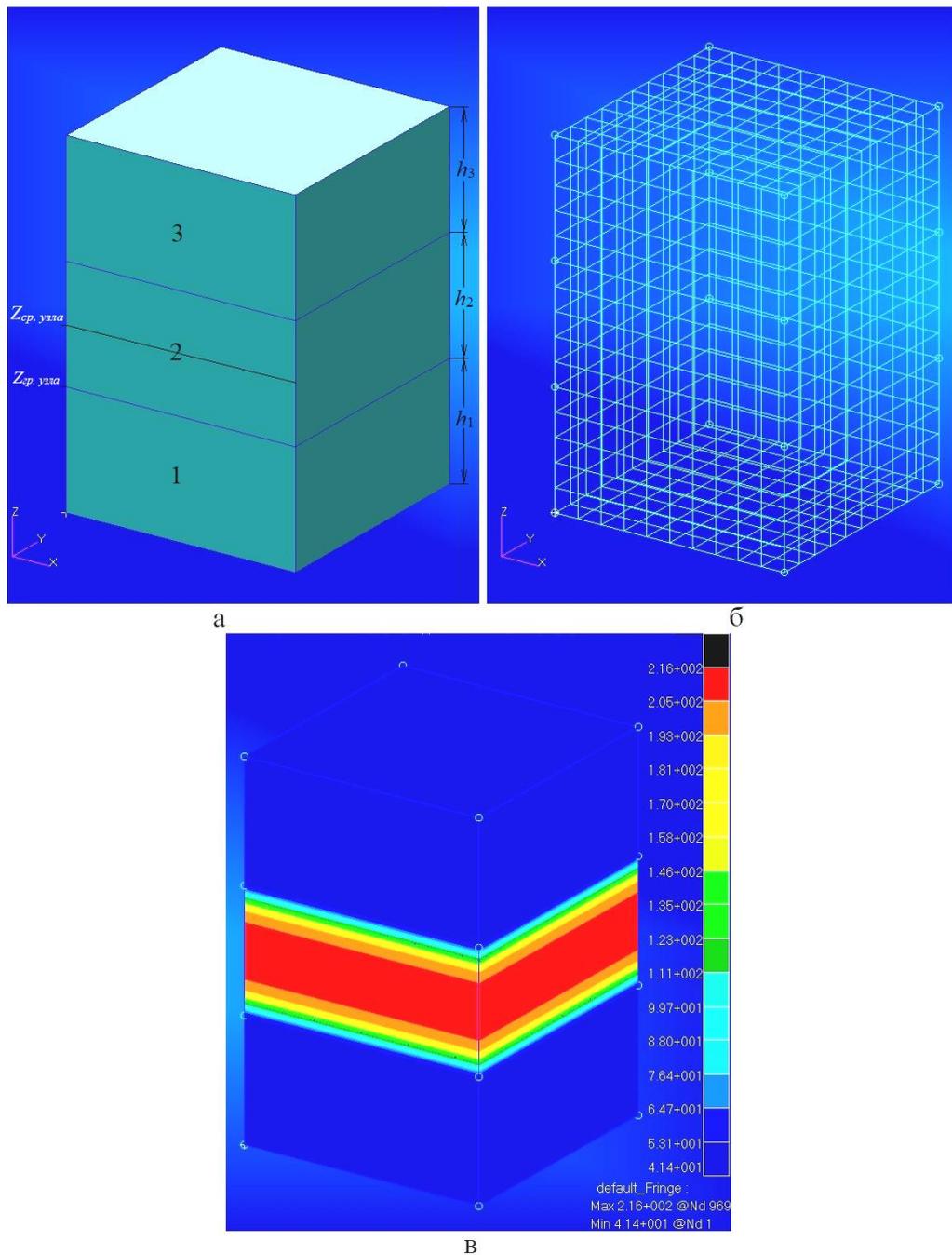


Рисунок 54 – Определение точности вычисления на примере трехслойной технологической системы (а) при уменьшении размера ребра конечно-разностного элемента (б) по рассчитанным значениям температур (в), где 1, 3 – низкопотенциальный и высокопотенциальный электроды рабочего конденсатора соответственно; 2 – обрабатываемый полиамидный образец (ПА6); $Z_{ср. узла}$ – средний узел обрабатываемого образца; $Z_{гр. узла}$ – граничный узел между обрабатываемым образцом и электродом; h_1 , h_2 , h_3 – толщина низкопотенциального электрода, полимера и высокопотенциального электрода соответственно, мм

В соответствии с графиками, представленными на рисунке 55, рассчитанные значения температур в среднем узле полимера ($T_{ср. узла}$) (кривая 1) и на границе полимера с электродом ($T_{ср. узла}$) (кривая 2) не изменяются при уменьшении h_p до 0,21 мм. Тем самым, за минимальный размер ребра конечно-разностного элемента можно принять $h_{p \min} = 0,21$ мм.

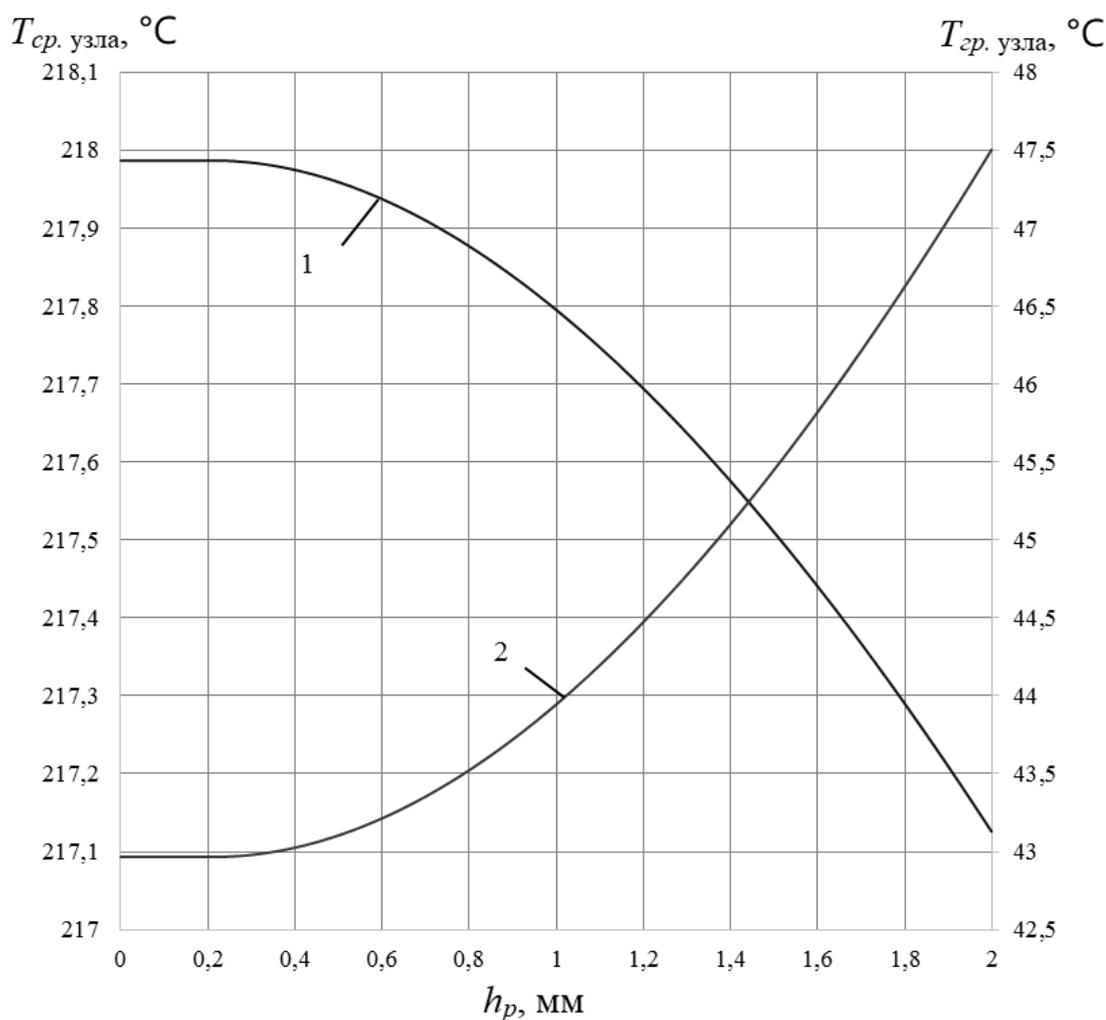


Рисунок 55 – Зависимости рассчитанных значений $T_{ср. узла}$ (кривая 1) и $T_{ср. узла}$ (кривая 2) от h_p

Максимально возможный размер $h_{p \max}$ считаю целесообразным определять исходя из следующих ограничений: с одной стороны минимальный размер ребра ограничен максимальным объемом используемой памяти (2 Гб) программным комплексом MSC Sinda и, с другой стороны, принятой точностью расчета

температуры. Точность расчета температуры можно принять исходя из ширины температурных переходов между фазовыми состояниями.

В таблице 8 приведен анализ справочных данных по диапазонам температуры плавления для различных полимеров, минимальный уровень которой составил 2 °С. Пяти процентная точность расчета при минимальной интересной для использования в АСУ температуре (50 °С) (глава 2, п. 2.3) также не превосходит 2 °С, принимаемых далее за точность расчета.

Таблица 8 – Справочные данные по диапазонам температуры плавления для некоторых полимерных материалов из разных источников

Наименование материала	Диапазон температуры плавления $T_{пл}$, °С
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	100-108 [73]
	105-108 [67]
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	120-135 [73]
	125-135 [67]
Полипропилен (ПП)	160-168 [73]
	164-170 [67]
Фторопласт – 3	210-215 [67]
Политрифторхлорэтилен (ПТФХЭ)	210-215 [73]
Поливиниловый спирт (ПВС)	220-240 [73]
Полиамид 6 (ПА 6)	217-226 [73]
	203-220 [114]
ПА 6 блочный	221-223 [73]
ПА 610	215-221 [73]
ПА 610 литьевой	215-221 [67]
ПА 66	254-262 [73]
	252-260 [67]
ПА 12	178-180 [73]
Полиамид стеклонаполненный (ПА6ВС)	212-216 [67]
Поликарбонат (ПК)	220-240 [73]
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	250-265 [73]
	256-260 [114]
Полибутилентерефталат (ПБТ)	223-227 [73]

Соответственно, согласно рисунку 55, максимально возможный размер ребра был определен для кривой с наибольшей ошибкой расчета – кривой 2 и составил $h_p \text{ max} = 1,36$ мм. Отсюда был определен диапазон необходимого количества узлов рассматриваемой модели: от 7 до 50 узлов ($0,21 \leq h_p \leq 1,36$). Дополнительно ориентируясь на данные источника [82], принимаем необходимое и достаточное количество узлов на сторону рассматриваемого слоя равное 10 узлам.

Третий этап состоит в задании свойств материала. Поскольку реальный технологический процесс ВЧ-обработки полимерных изделий проходит в диапазоне температур от температуры нормальных условий до температуры необходимой обработки (сварка, сушка, термоупрочнение и др.), следовательно, в этом же диапазоне температур необходимо задавать изменение теплофизических свойств материалов технологической системы от температуры.

В ходе данной работы было определено влияние температурных зависимостей коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости на точность расчета при нагреве трехслойной технологической системы, представленной на рисунке 54, напряжением рабочего конденсатора $U_p = 800\text{В}$. Полученные результаты (рисунок 56) распределения температуры по сечению (толщине) полиамидной детали (h_2) при ее нагреве до температуры плавления в течении $\tau_n = 18$ сек. показали, что пренебрежение температурозависимыми параметрами приводит к значительным отклонениям от действительной величины. Температурное поле по h_2 с изменяющимися от температуры свойствами ($C_p(T), \lambda(T)$) характеризует кривая 1, кривая 2 отражает температурное поле при постоянном значении коэффициента теплопроводности ($C_p(T), \lambda = \text{const}$), а кривая 3 при постоянном значении удельной теплоемкости ($C_p = \text{const}, \lambda(T)$).

Отклонения кривых температурного поля по h_2 от действительной величины (кривая 1) находятся в следующих пределах:

- при $C_p(T)$ и $\lambda = \text{const}$ (кривая 2) от 0,12% до 7,13%;
- при $C_p = \text{const}$ и $\lambda(T)$ (кривая 3) от 4,14% до 42,32%.

Полученные отклонения расчетных значений свидетельствуют о недопустимости пренебрежения температурозависимой удельной теплоемкостью полимера, а отклонения, полученные при постоянном значении коэффициента теплопроводности дают адекватные результаты при отсутствии необходимости смещения точки максимального нагрева.

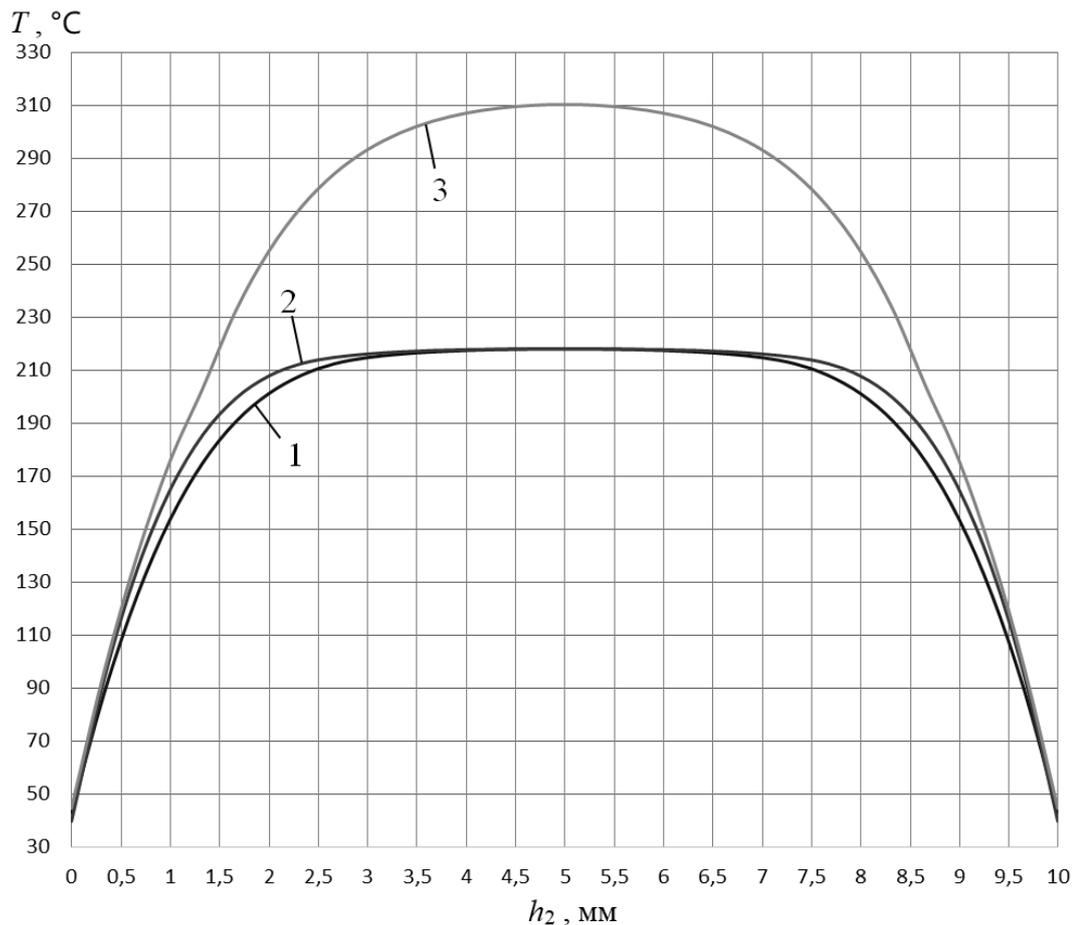


Рисунок 56 – Кривые распределения температуры по h_2 при нагреве полимера до температуры плавления напряжением $U_p = 800\text{В}$ в течении $\tau_n = 18$ сек., при постоянных и зависимых от температуры теплофизических свойствах, где 1 – температурное поле по h_2 при $C_p(T)$ и $\lambda(T)$; 2 – температурное поле по h_2 при $C_p(T)$ и $\lambda = \text{const}$; 3 – температурное поле по h_2 при $C_p = \text{const}$ и $\lambda(T)$

На четвертом этапе расчета требуется задать начальную температуру T_o технологической системы, температуру окружающей среды T_e , коэффициент теплообмена α , внутренние источники тепла $P(T)$, время расчета τ и интервал

вывода параметров расчета Δt . Начальная температура, при этом, приложена ко всем конечно-разностным элементам модели технологической системы, а конвекция является поверхностным эффектом, поэтому прилагается только к внешним поверхностям модели.

Необходимо отметить, что используемый программный комплекс позволяет задавать значение внутреннего объемного источника тепла как переменным в зависимости от изменяющейся температуры, так и постоянным, что, в свою очередь, также можно реализовать в автоматизированном или же автоматическом режиме на реальном промышленном высокочастотном оборудовании, во-первых, изменяя емкость переменного конденсатора, во-вторых изменяя расстояние между обкладками рабочего конденсатора, что приведет к квадратичному изменению напряженности электромагнитного поля, эмпирически связанного с удельной мощностью (2), и даст возможность вывести процесс обработки на равномерный прогрев полимерного изделия.

На пятом этапе производится расчет температурного поля с выводом результатов расчета по всем осям смоделированной технологической системы в любой момент расчетного времени в соответствии с заданным на четвертом этапе интервалом Δt .

3.3 Проверка выполнения требований, предъявляемых к математическим моделям

Основными требованиями, предъявляемыми к математическим моделям, являются универсальность, адекватность и точность [136].

Степень универсальности математической модели характеризует полноту отображения в модели свойств реального объекта. Как было изложено выше, разработанная математическая модель учитывает, как непостоянство всех значимых температурных свойств обрабатываемого изделия и их влияние на процесс обработки, так и свойства материалов, не относящихся к полимерам (например, древесина, влагосодержащие отходы производств и др.) и их влияние.

При этом также было уделено внимание непостоянству удельной мощности внутренних источников тепла в процессе обработки и описаны возможности аппаратного управления исследуемыми процессами для поддержания постоянного значения мощности нагрева.

Точность математической модели оценивается степенью совпадения значений параметров реального объекта и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью оцениваемой математической модели. Так для определения степени точности разработанной математической модели было произведено моделирование симметричной технологической системы (рисунок 54) с последующим расчетом тепловых полей. Затем на промышленной установке ВЧ-нагрева модели УЗП 2500 была реализована технологическая система с той же геометрией и конфигурацией, а также комплексом параметров, и произведен ВЧ-нагрев серии полиамидных образцов. По истечению 20 секунд при отключенном ВЧ-генераторе с помощью термопары производился контроль температуры поверхности нагреваемых полимеров, среднее значение которой составила 68,1 °С. Расчетная температура при моделировании тех же условий на 20-ой секунде составила 69,8 °С, что в свою очередь составляет 1,73% отклонения от величины, измеренной термопарой. Данное отклонение вызвано указанием в разработанной модели нулевого значения конвекции по причинам, описанным выше. Но, не смотря на это полученное отклонение находится в допустимых пределах и поэтому разработанная в рамках настоящих исследований математическая модель нагрева технологической системы в 3D постановке отвечает предъявляемым требованиям точности.

Адекватность математической модели – способность отражать заданные свойства объекта с погрешностью не выше заданной. Адекватность математической модели, как правило, имеет место лишь в ограниченной области изменения внешних параметров – в области адекватности.

Область адекватности разработанной в рамках настоящих исследований, математической модели очень широка и практически не ограничена по номенклатуре полимеров, конфигурации технологической системы и степени

энергетического воздействия, но при этом существуют ограничения в виде отсутствия учета электро-химических и химических процессов, приводящих к деструкции и пробую, скин-эффектов, характерных для процессов электротермии, которые требуют отдельных методов исследования.

3.4 Использование математической модели нагрева технологической системы в 3D постановке при моделировании технологических процессов

При решении практических задач, представленная выше блок-схема расчета системы уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла во всем объеме слоев технологической системы (рисунок 52) может дополняться требуемым количеством этапов в зависимости от задач реализуемых технологических процессов обработки. Рассмотрим более подробно наиболее используемые технологии ВЧ-электротермии: сушку и сварку.

3.4.1 Моделирование процесса сушки партии полимерных деталей

Так при электротермической сушке партии (серии) деталей n блок-схема расчета температурных полей технологической системы в 3D постановке примет следующий вид (рисунок 57).

Представленная блок-схема содержит ряд изменений в этапах 2 и 5. Как было указано в пункте 3.1 настоящей работы, при обработке n деталей температура первой заготовки из партии n_1 и остальных слоев технологической системы равна температуре нормальных условий, а при обработке последующих заготовок (n_{i+1}) температура слоев равна температуре соответствующего слоя предыдущей обработки, то для удобства решения рассматриваемой задачи необходимо разделить конечно-разностную сетку 3D модели на группы, соответствующие слоям технологической системы (этап 2).

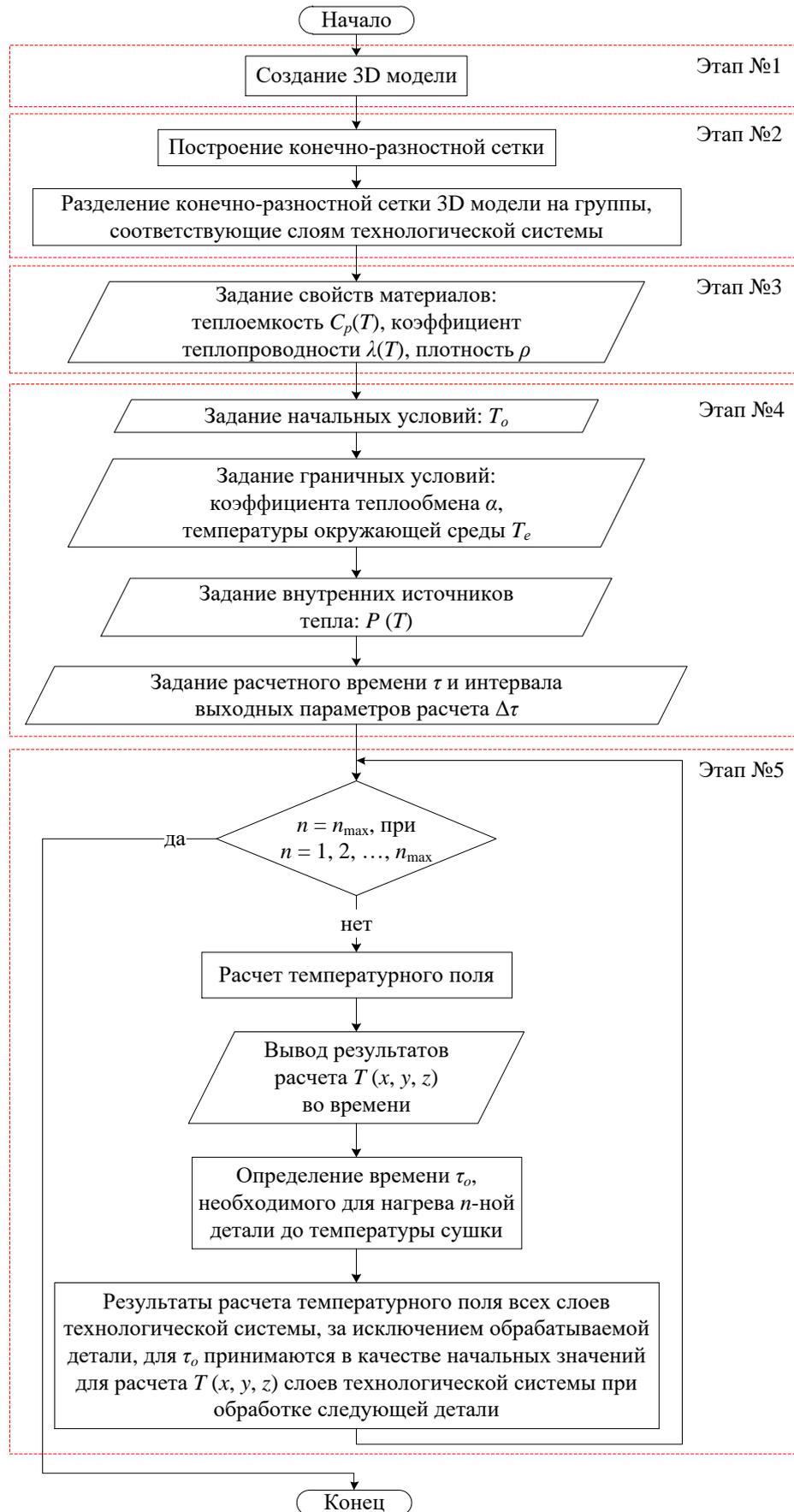


Рисунок 57 – Блок-схема расчета температурного поля при электротермической сушке партии деталей

На пятом этапе производится расчет температурного поля каждой детали n_i из партии с предварительным заданием начальных значений температуры T_o всех слоев технологической системы. Так T_o обрабатываемого изделия равна температуре нормальных условий, а в качестве начальной температуры остальных слоев принимаются значения температурного поля технологической системы по предыдущему расчету при значении времени τ_o , необходимом для нагрева детали до температуры сушки.

Для примера, в соответствии с представленной блок-схемой (рисунок 57), был произведен расчет температурного поля в пятислойной технологической системе (рисунок 58) при электротермической сушке 30 деталей с нагревом до температуры 145 °С напряжением 900В [42].

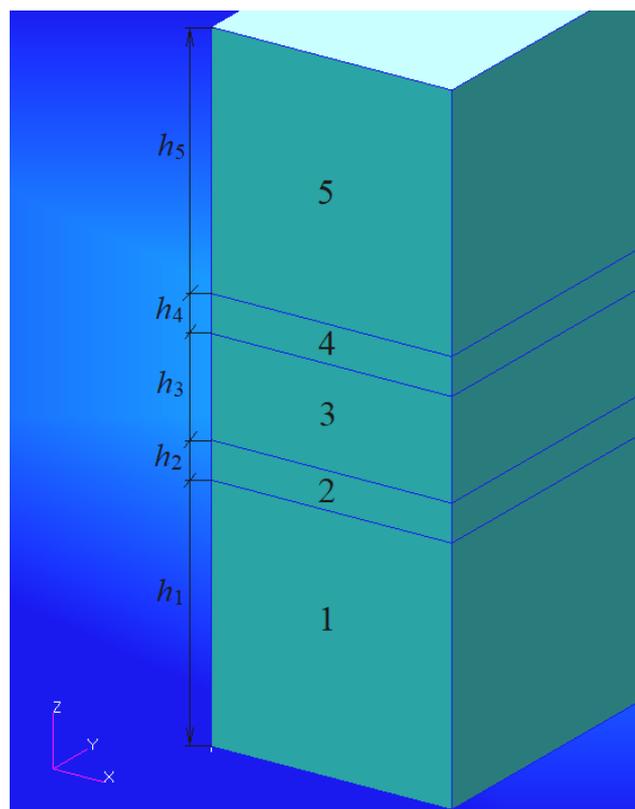


Рисунок 58 – Модель пятислойной технологической системы: 1, 5 – низкопотенциальный и высокопотенциальный электроды соответственно (0,01×0,05×0,01 м); 2, 4 – изоляторы (0,01×0,05×0,0015 м); 3 – обрабатываемая деталь из ПА6 (0,01×0,05×0,004 м);

Произведенный расчет позволил определить изменение времени нагрева τ_0 каждой детали из партии до 145 °С при последовательной их обработке (рисунок 59) в соответствии с представленной технологической системой. При обработке первых пяти деталей наблюдается снижение τ_0 , которое составляет 4,77% от τ_0 первой детали. Такое изменение связано с влиянием температуры электродов $T_э$ и изоляторов $T_{и}$, принимаемой при текущем расчете за начальную температуру T_0 по результатам нагрева предшествующей детали, на температурозависимую величину удельной мощности нагрева. Далее также наблюдается незначительный линейный спад τ_0 , который составил 0,33% от τ_0 первой детали n_1 .

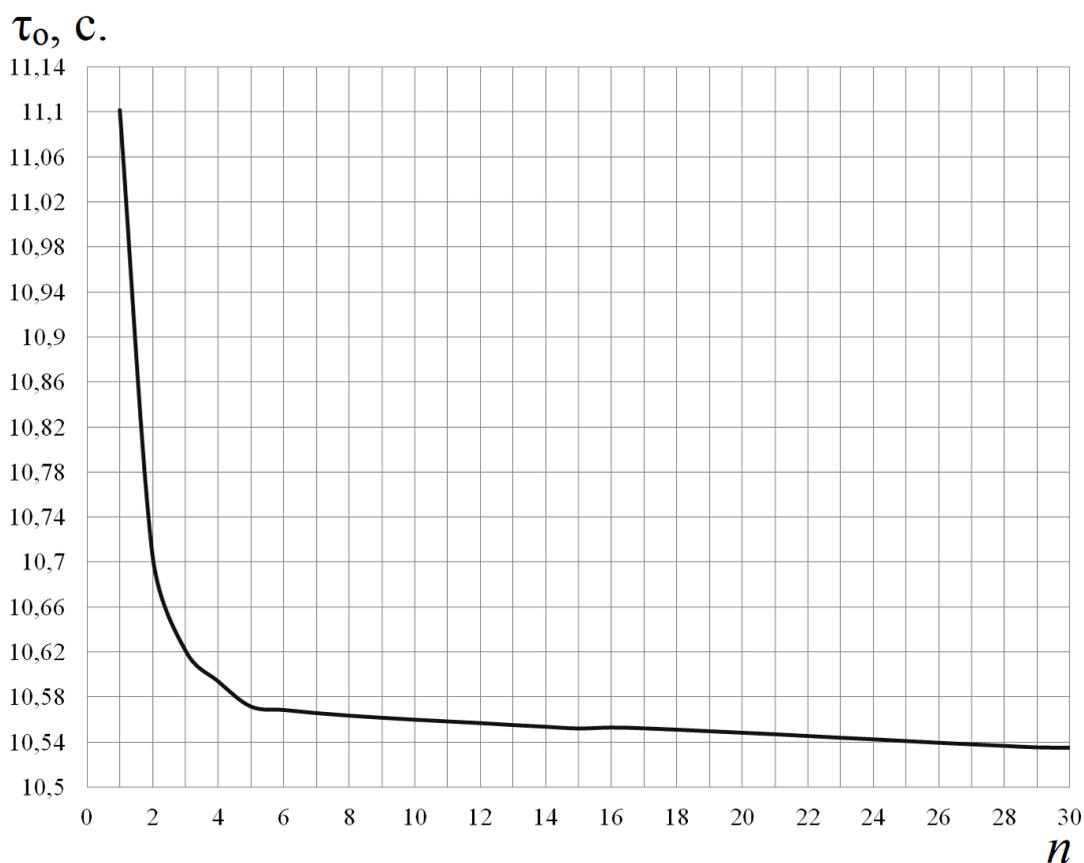


Рисунок 59 – График зависимости τ_0 партии деталей до 145 °С при сушке

На рисунке 60 представлены временные зависимости температуры нагрева среднего узла полимера ($T_{ср. узла}$) (а) и граничного узла полимера с изолятором ($T_{гр. узла}$) (б) крайних деталей (n_1 и n_{30}), отражающие скорость изменения температуры, а на рисунке 61 отражено распределение температуры по сечению

электрода (h_1 или h_5 , поскольку система симметрична) (а) и изолятора (h_2 или h_4 , поскольку система симметрична) (б) при нагреве крайних деталей из партии (n_1 и n_{30}) до 145 °С.

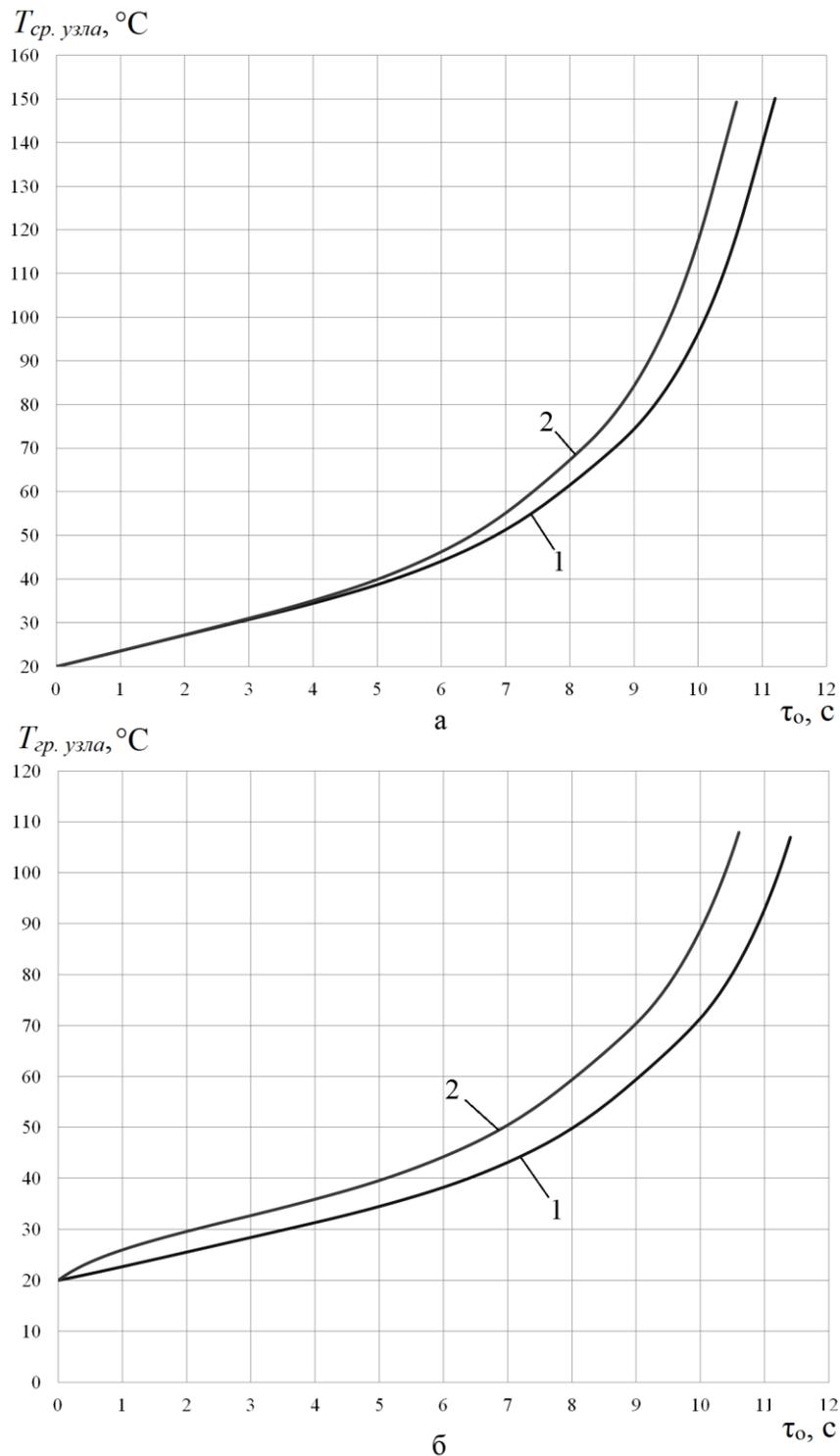


Рисунок 60 – Графики временных зависимостей нагрева $T_{ср. узла}$ полимера (а) и $T_{ср. узла}$ полимера с изолятором (б) для n_1 (1) и n_{30} (2)

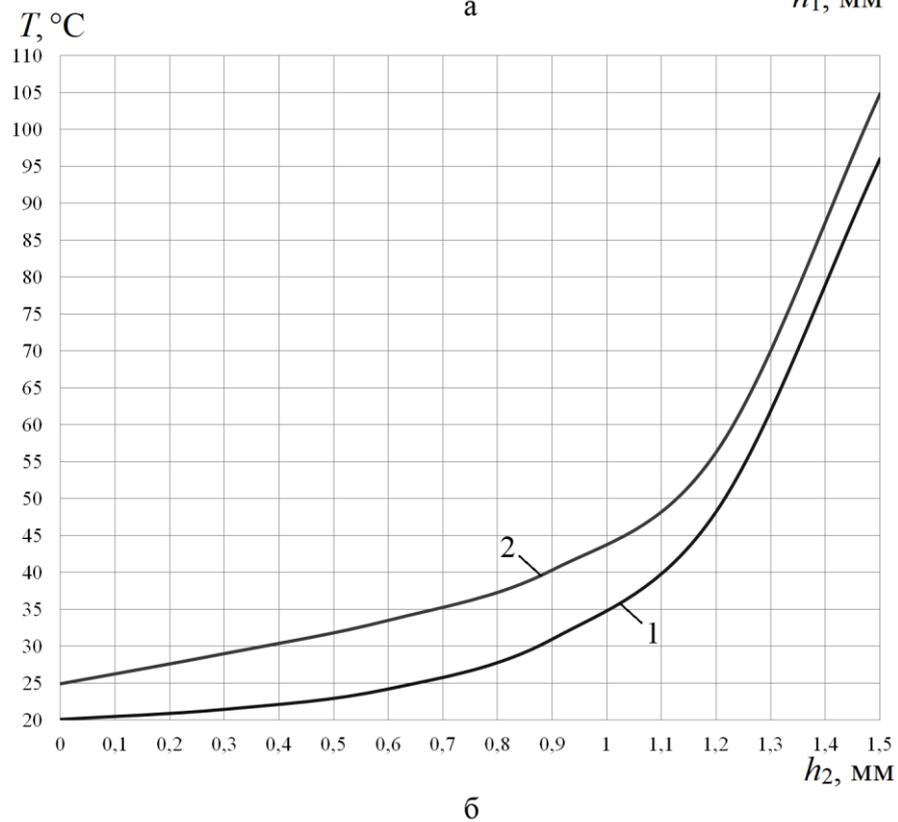
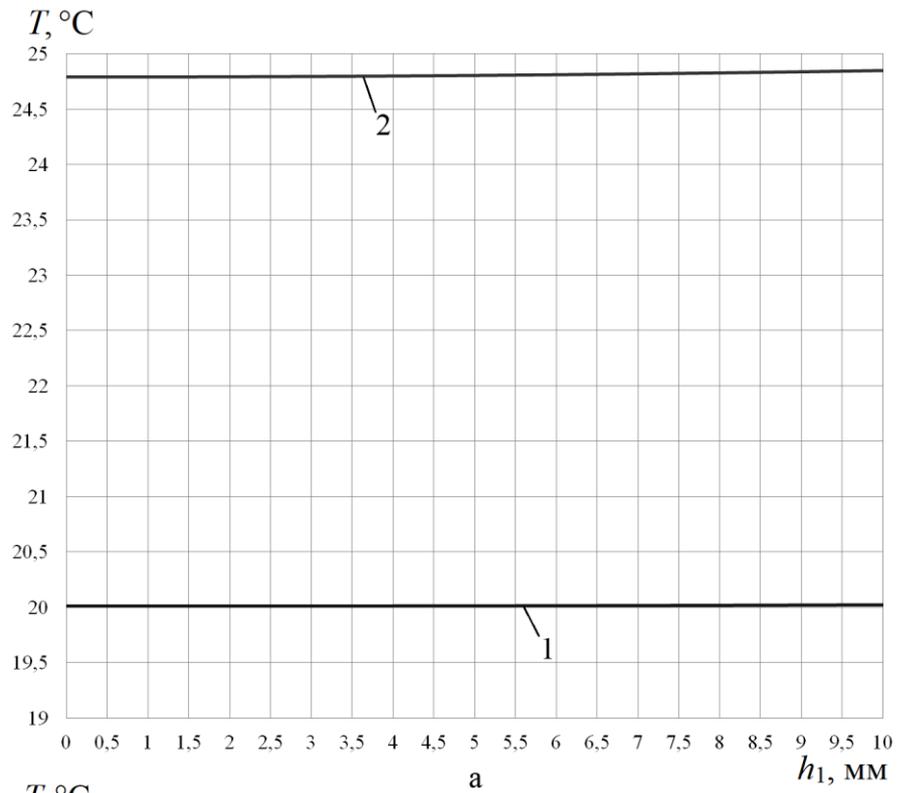


Рисунок б1 – Графики распределения температуры по h_1 (а) и h_2 (б)
при нагреве n_1 (1) и n_{30} (2) до $145 ^\circ\text{C}$

На основе информации, представленной на графиках (рисунок 61а, б, 62), можно сделать вывод о значительном нагреве электродов и изоляторов, которые

составили 25% и 50% от их первоначальной температуры соответственно. Но при этом время достижения необходимой температуры самого полимера для последней детали в партии изменяется незначительно (не более 6%) (рисунок 60а).

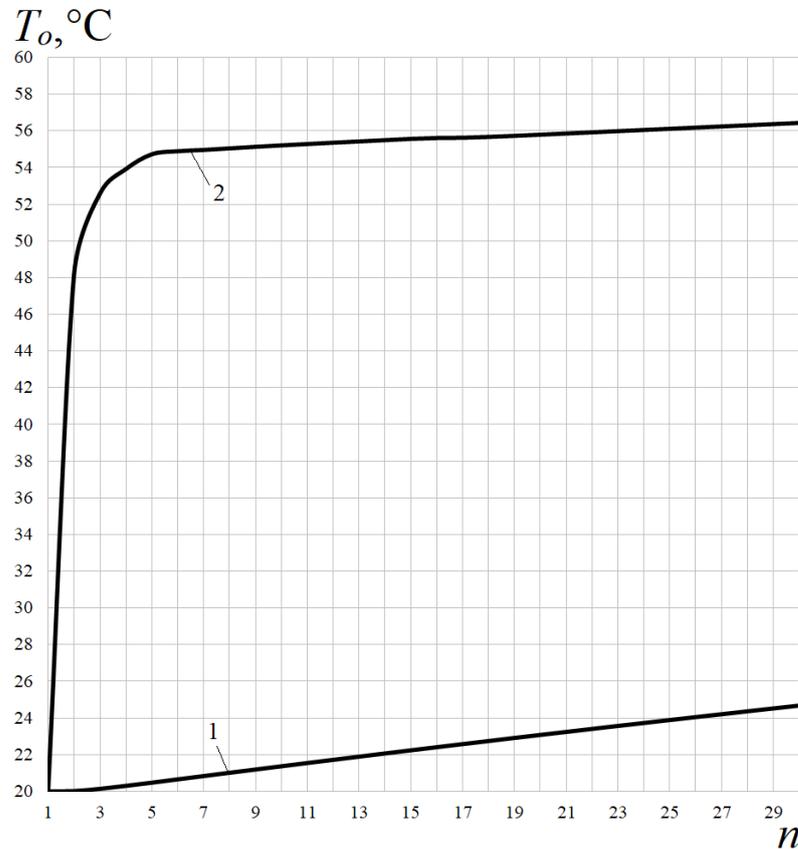


Рисунок 62 – Шкала T_o граничных узлов изолятора с электродом (1) и с обрабатываемой деталью (2)

В работе [82] автор говорит о необходимости замены изоляторов при обработке каждой новой детали, но по результатам проведенных в рамках данной работы исследований можно сделать вывод, что замена изоляторов не целесообразна даже при обработке партии деталей. Более того, при организации процесса управления обработки партии деталей при сушке деталей, соответствующей симметричной технологической системе, отсутствует необходимость контроля температуры электродов и изоляторов.

3.4.2 Моделирование процесса сварки партии полимерных деталей

При моделировании процессов сварки партии полимерных деталей последовательность расчета будет аналогична моделированию процесса сушки, за исключением этапа 5, количество и вид операций в котором будет зависеть от условия решаемой задачи.

Так, например, моделируя процесс сварки партии деталей, при котором технологическая система состоит из пяти слоев (рисунок 63), блок-схема расчета примет следующий вид (рисунок 64).

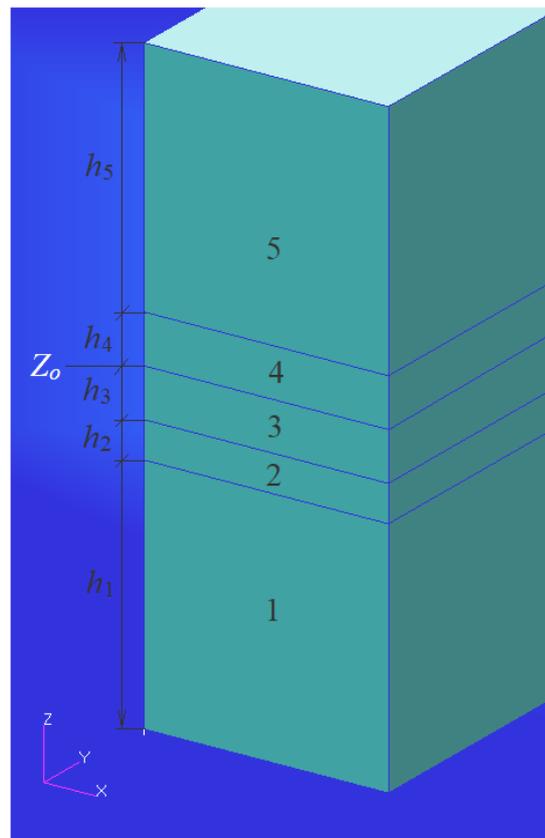


Рисунок 63 – Модель пятислойной технологической системы, где: 1, 5 – низкопотенциальный и высокопотенциальный электроды соответственно ($0,01 \times 0,05 \times 0,01$ м); 2 – изолятор ($0,01 \times 0,05 \times 0,0015$ м); 3, 4 – свариваемые заготовки ($0,01 \times 0,05 \times 0,002$ м); h_i – толщины слоев в соответствии с их номерами, мм; Z_o – координата точки сварки

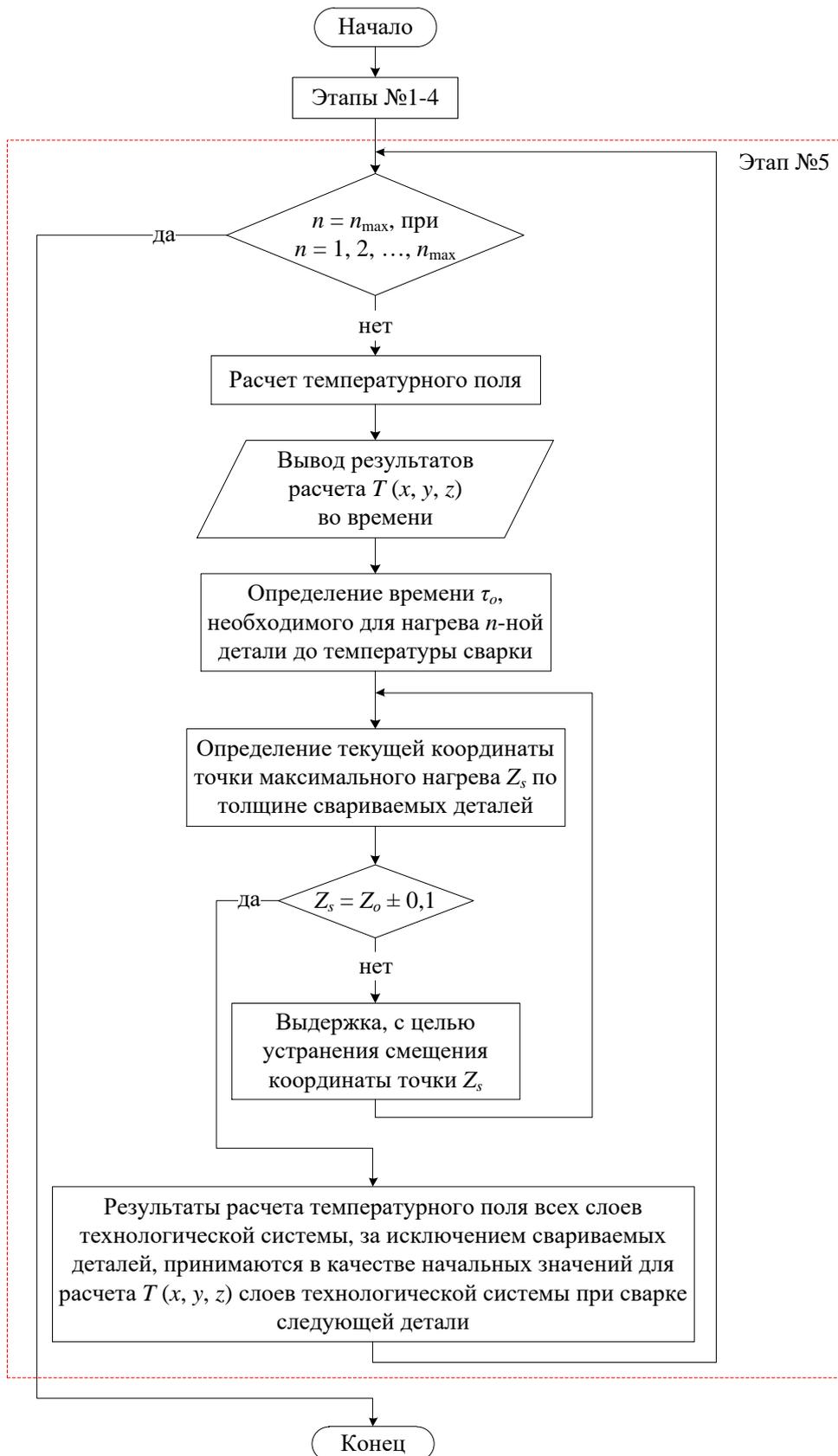


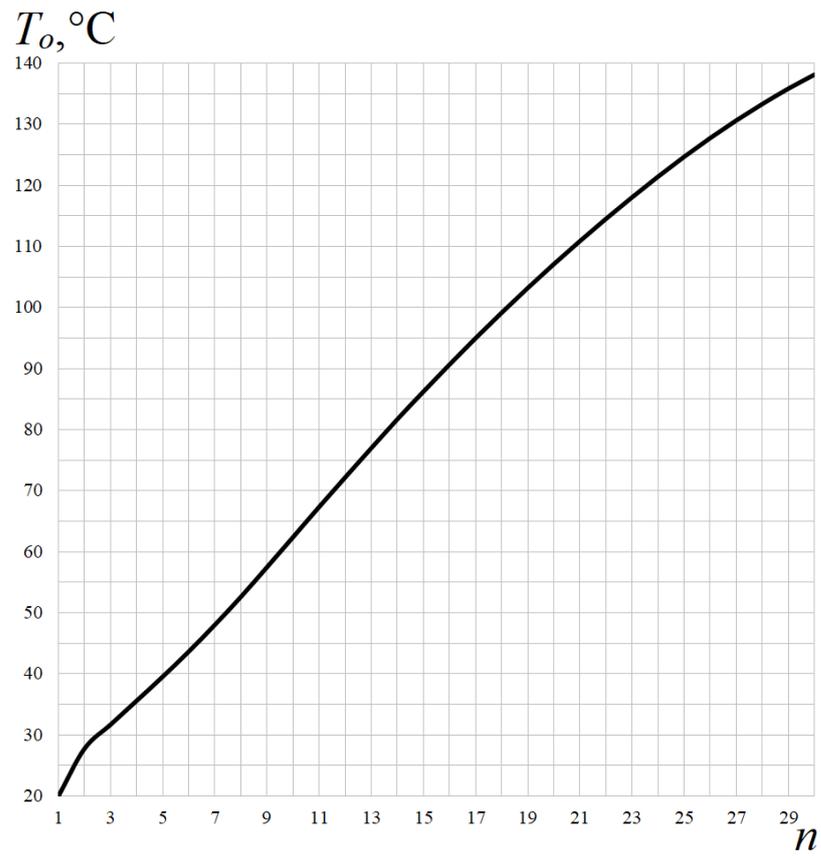
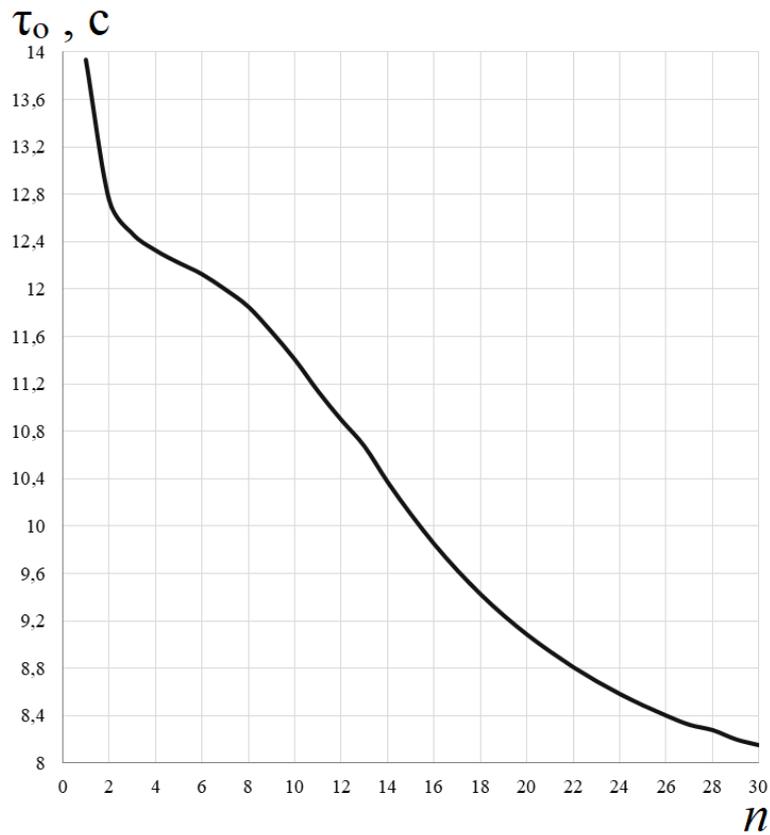
Рисунок 64 – Блок-схема расчета температурного поля при электротермической сварке партии деталей

В отличие от технологической системы, рассмотренной в п. 3.4.1, в данном случае исключается один из изоляторов и добавляется еще один слой полимерного материала.

В работе [82] было отмечено, что для повышения качества сварного соединения и эффективности процесса при сварке в высокочастотном поле необходимо, в отличие от сушки, организовать максимальный нагрев в локальной зоне сварки с минимальным разогревом периферийных зон деталей, тогда пятый этап, рассматриваемой задачи, дополняется процессом определения текущей координаты точки максимального нагрева Z_s по толщине свариваемых деталей и контролем ее смещения от необходимого положения Z_o .

Для подтверждения работоспособности представленного алгоритма был произведен расчет температурных полей при высокочастотном нагреве партии полиамидных ПАБ деталей (30 деталей) напряжением $U_p = 900\text{В}$ до температуры сварки ($T_{\text{сварки}} = 216\text{ }^\circ\text{С}$). При этом начальная температура T_o каждой полимерной детали составляла $20\text{ }^\circ\text{С}$, а в качестве T_o остальных слоев технологической системы (рисунок 63) принималось температурное поле, полученное при доведение предшествующей детали n_{i-1} до температуры плавления. Так на рисунке 65 представлена шкала начальных температурных условий T_o граничного узла высокопотенциального электрода с обрабатываемой заготовкой Z_{4-5} . При этом весь процесс обработки сопровождался снижением времени достижения температуры сварки τ_o при переходе от одной детали к другой (рисунок 66) [37].

Также в ходе экспериментального исследования возможностей математического моделирования, на примере высокочастотной сварки партии деталей, было определено смещение координаты точки максимального нагрева Z_s относительно толщины свариваемых деталей h_3 и h_4 (рисунок 67).

Рисунок 65 – Шкала T_o узла Z_{4-5} Рисунок 66 – График зависимости $\tau_o = f(n)$ при высокочастотной сварке

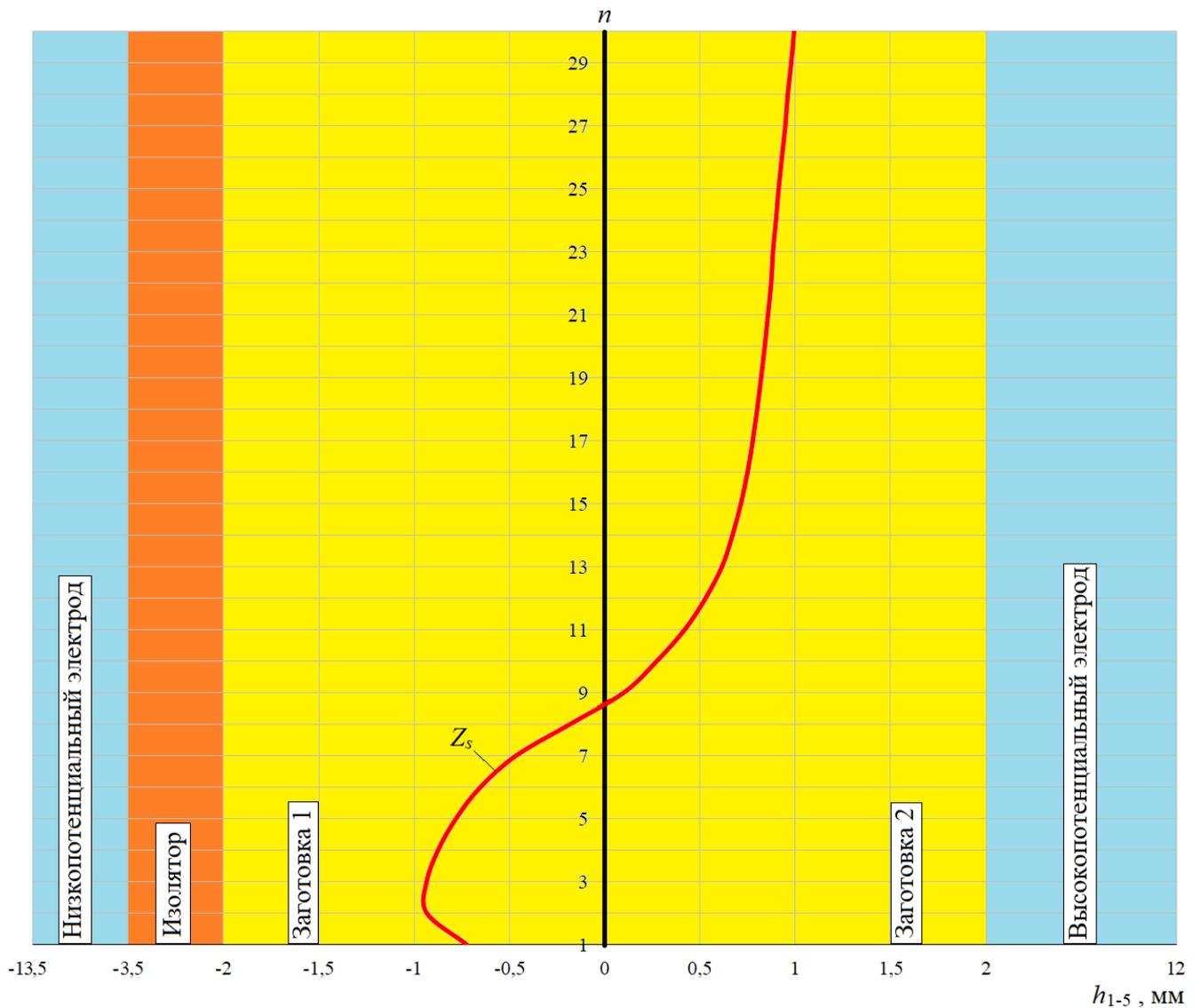


Рисунок 67 – Положение координаты точки максимального нагрева Z_s относительно толщины свариваемых заготовок при моделировании ВЧ-обработки партии деталей в пятислойной технологической системе

Рассмотрим случай сварки одинаковых по толщине заготовок (рисунок 67). Легко видеть, что координата точки Z_s соответствует координате сварки только при обработке n_8 и n_9 деталей, без учета ширины площадки достижения температуры сварки. Влияние температуры разогрева неизолированного электрода (рисунок 65) на остальные детали приводит к неудовлетворительному смещению координаты точки Z_s от требуемой координаты сварки Z_o .

Интересно отметить, что смещение координаты точки Z_s неоднозначно. При последовательной обработке партии деталей при относительно низких

температурах (до 55 °С) (рисунок 65) неизолированного электрода координата точки Z_s смещается в сторону изолятора. С повышением температуры неизолированного электрода направление смещения меняет свой знак [3].

На рисунке 68 отображены распределения температуры по сечению свариваемых заготовок при нагреве первой n_1 (1) и n_{30} (2) деталей из партии до температуры сварки $T_{сварки}$, которые отражают смещение Z_s в сторону более нагретого электрода (без изолятора) при движении n_1 до n_{30} детали.

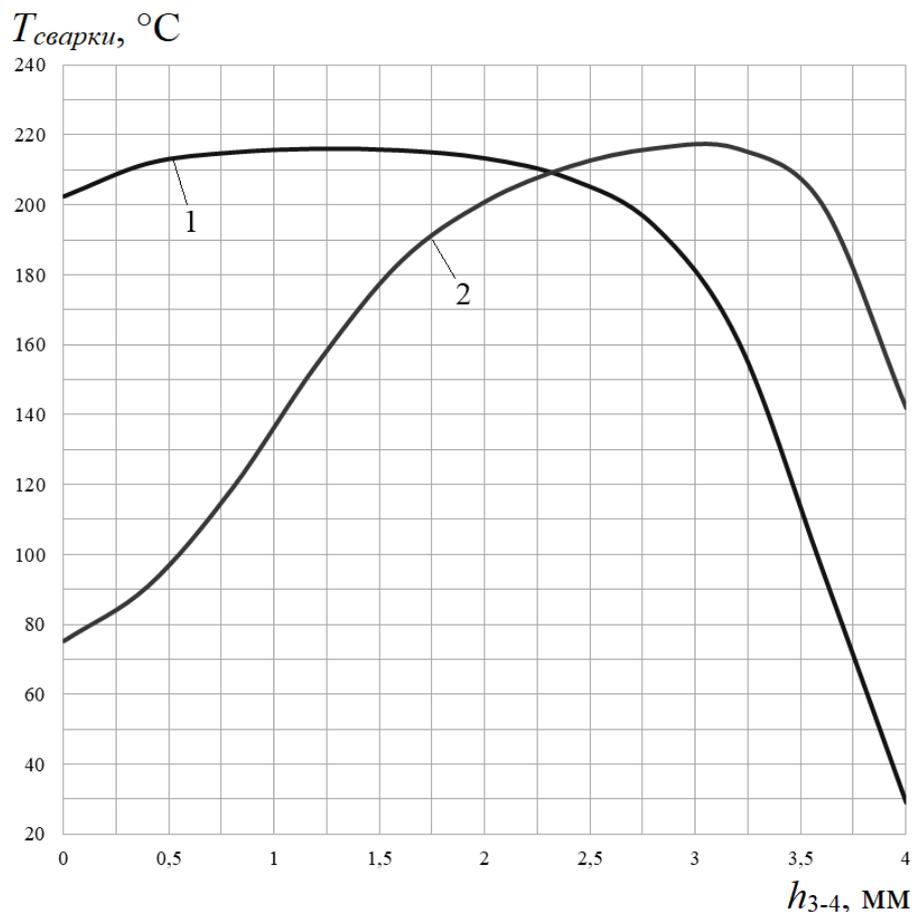


Рисунок 68 – Графики распределения температуры по h_{3-4} свариваемых заготовок при нагреве n_1 (1) и n_{30} (2) детали из партии до $T_{сварки}$

Таким образом, необходимое положение координаты точки максимального нагрева 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.

Производя обработку партии деталей в соответствии с представленным на рисунке 64 одним из вариантов решений и описанными выше рекомендациями, можно сохранять положение Z_s .

3.5 Выводы по главе

1. Разработана математическая модель процесса нагрева технологической системы в 3D постановке как составная часть АСНИ ВЧ, представляющая собой систему дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла, отличающаяся трехмерной постановкой задачи, 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.

2. Разработан общий алгоритм расчета температурного поля при нагреве технологической системы.

3. Определены сходимость, степень универсальности и область адекватности разработанной математической модели, а также установлена ее точность.

4. Проанализированы практические возможности использования разработанной математической модели. Разработаны алгоритмы расчета температурного поля слоев технологической системы применительно к процессам ВЧ-сушки и ВЧ-сварки партии полимерных изделий.

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

6. Определена нецелесообразность замены изоляторов при обработке партии деталей, изолированных с обеих сторон теплоизоляционным картоном.

7. Сформирована 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.

4 Автоматизация управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов с разной степенью полярности

4.1 Разработка автоматизированной системы управления процессами ВЧ-обработки полимерных материалов с разной степенью полярности

Исследования, проведенные в ходе данной работы, выявили недостатки существующих систем автоматизированного управления (САУ) процессами ВЧ-электротермии. До настоящего времени применение ВЧ-электротермии рассматривалось в основном только для таких процессов, как сушка и сварка, причем существующие САУ предусматривали обработку только единичных деталей. При этом в ходе данного исследования были определены новые единичные экстремальные параметры (реперные точки), позволяющие расширить применимость ВЧ-электротермии для разных технологических процессов обработки, и в соответствии с проведенным литературным обзором было выявлено, что для разных полимеров возможно наличие большего количества экстремальных параметров.

Исходя из этого, использование новых параметров усложняется отсутствием единой классификационной базы обрабатываемых полимерных материалов по управляемости при построении экстремальных систем.

Так для технологических процессов сушки, восстановления прочностных свойств полимерных изделий и пропитки было определено два типа экстремальных параметров, применимость которых зависит от конкретного вида обрабатываемого материала, а более точнее от его диэлектрических свойств.

Для некоторых процессов (сварка, склеивание, горячее тиснение, заварка трещин, каландрирование, прокатка, изготовление полимерных форм для высокой и глубокой печати и т. д.), связанных с разогревом обрабатываемого материала до температуры плавления, также была определена общая для большинства полимеров реперная точка управления (минимум анодного тока), но у сильнополярных полимеров, таких как полиуретаны, данный параметр

отсутствует, а позволяет реализовать их обработку другой параметр – минимум скорости изменения анодного тока.

При этом задачей разработки системы управления было создание общего алгоритма автоматизированного управления различными процессами ВЧ-обработки полимерных материалов в зависимости от их степени полярности, обеспечивающих расширение промышленной применимости электротермии, повышение качества получаемых изделий и эффективности проводимых процессов.

И поскольку реализация каждого отдельного процесса обработки любого полярного полимерного материала решается разными экстремальными параметрами, то разрабатываемая система управления в соответствии с классификацией обрабатываемых полимерных материалов по управляемости при построении экстремальных систем должна предусматривать следующие подзадачи:

1. Выбор необходимо 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. Исходя из проведенного литературного обзора количество экстремумов составляет 3-4 шт.

Блок-схема алгоритма автоматизированного управления различными процессами ВЧ-обработки полимерных материалов в зависимости от их степени полярности представлена на рисунках 69-71.

Описанные подзадачи выбора необходимого контролируемого параметра и экстремума в представленной блок-схеме определяются двумя первыми блоками (рисунок 69), а выбор необходимого количества экстремумов осуществляется в каждом из указанных на рисунке 71 ПЛК по алгоритму, блок-схема которого представлена на рисунке 72. При этом сама операция выбора указанных параметров в соответствии с проводимыми технологическими процессами возлагается на оператора.

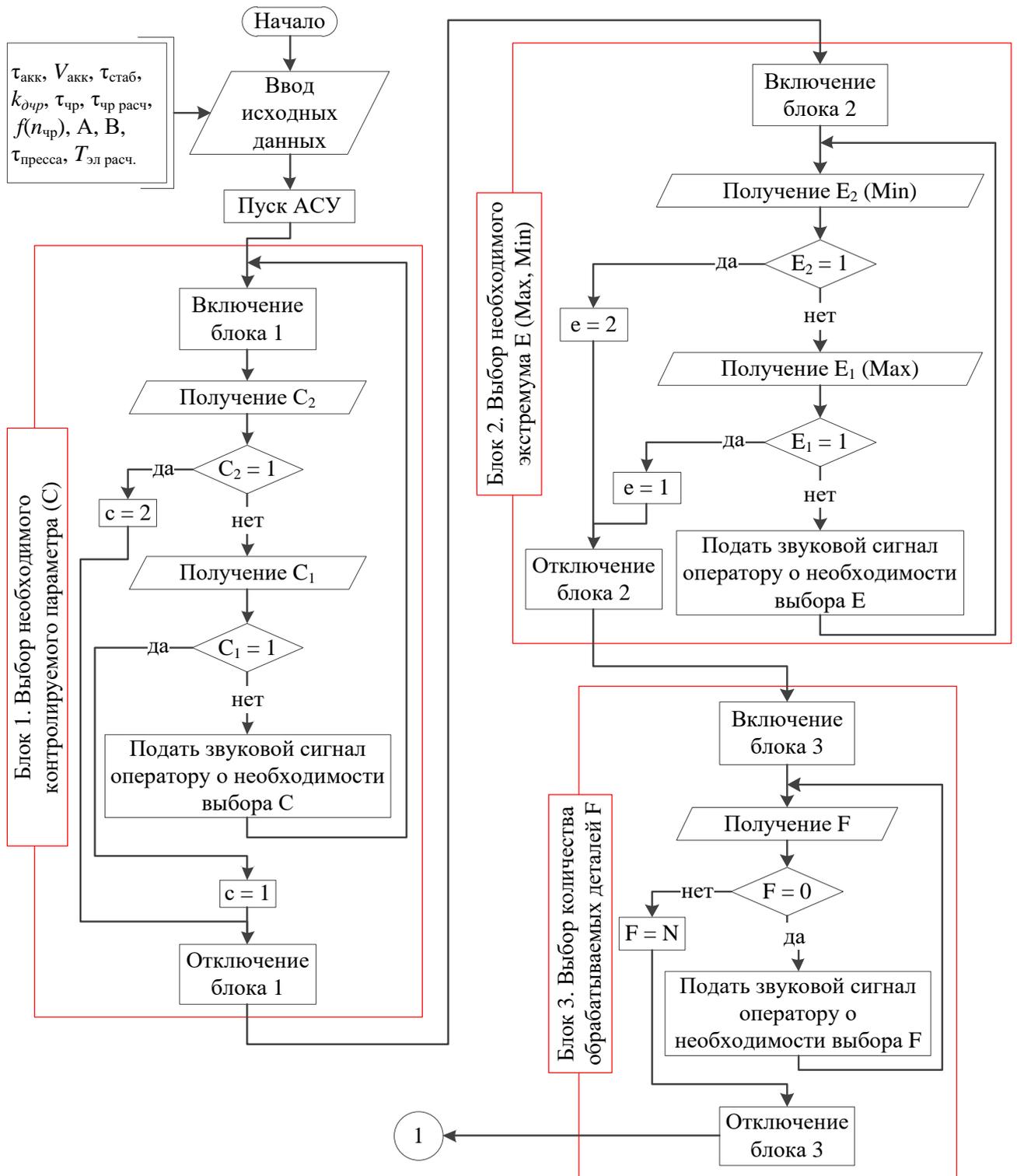


Рисунок 69 – Блок-схема алгоритма автоматизированного управления различными процессами ВЧ-обработки полимерных материалов в зависимости от их степени полярности

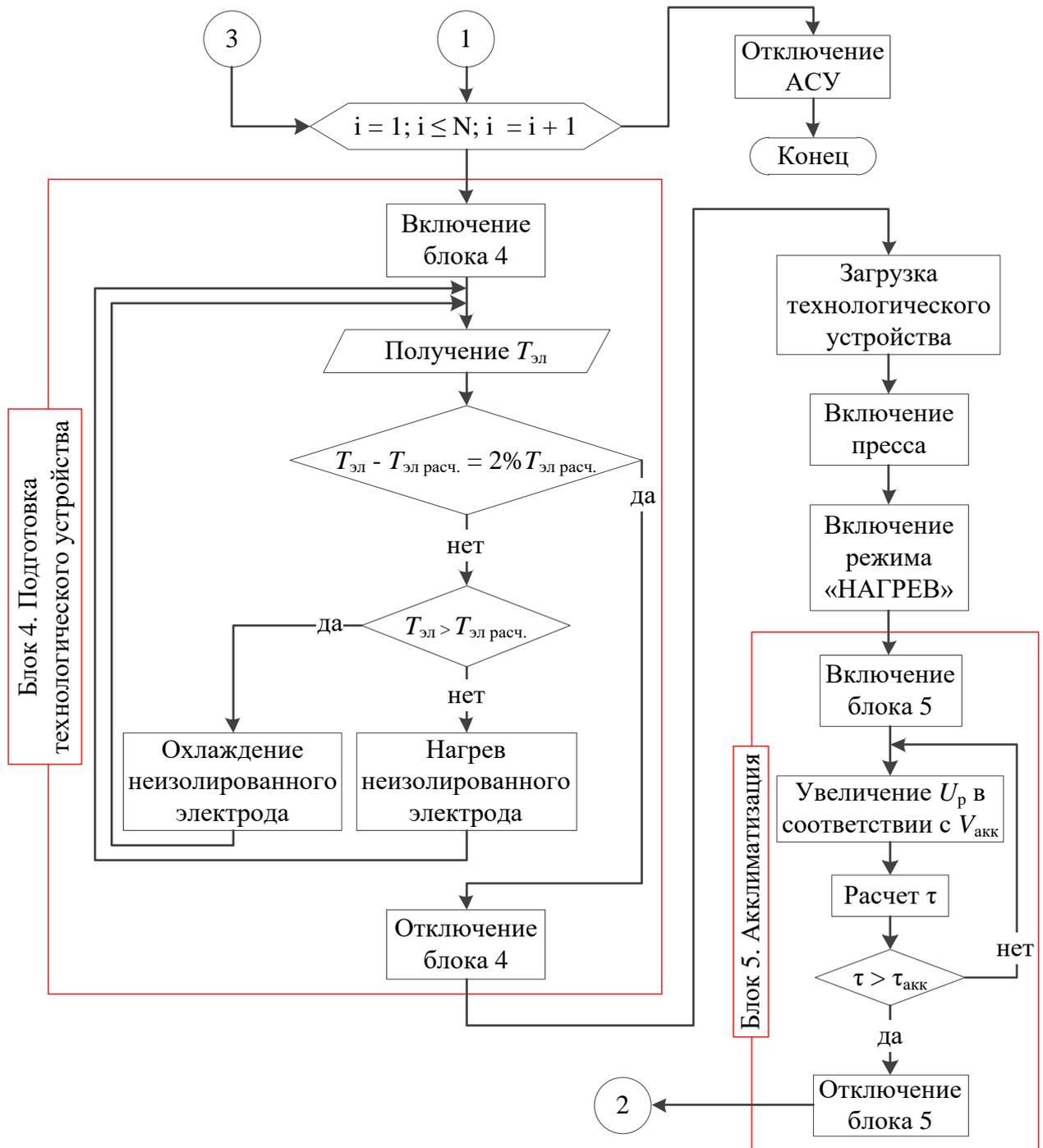


Рисунок 70 – Блок-схема алгоритма автоматизированного управления различными процессами ВЧ-обработки полимерных материалов в зависимости от их степени полярности

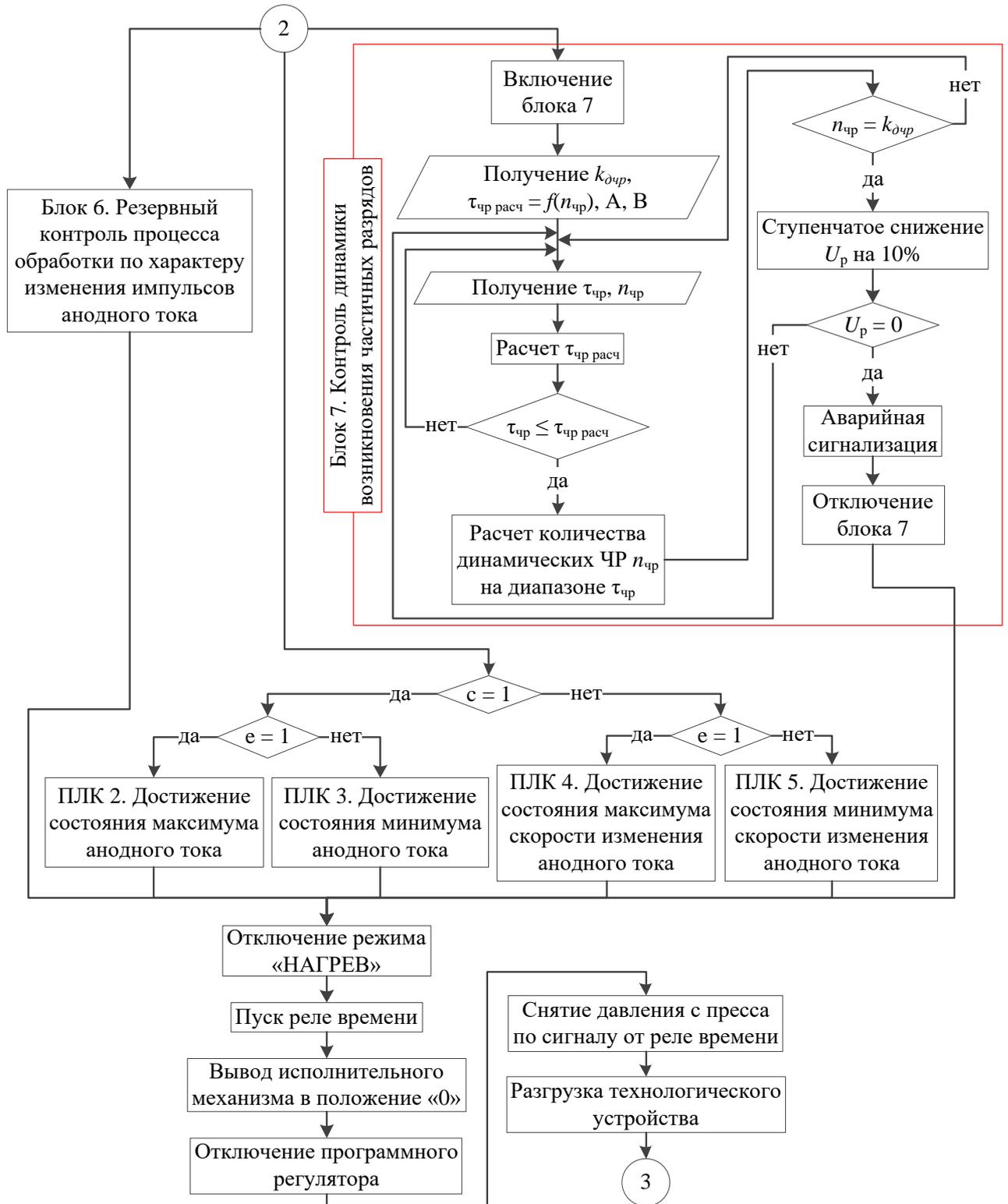


Рисунок 71 – Блок-схема алгоритма автоматизированного управления различными процессами ВЧ-обработки полимерных материалов в зависимости от их степени полярности

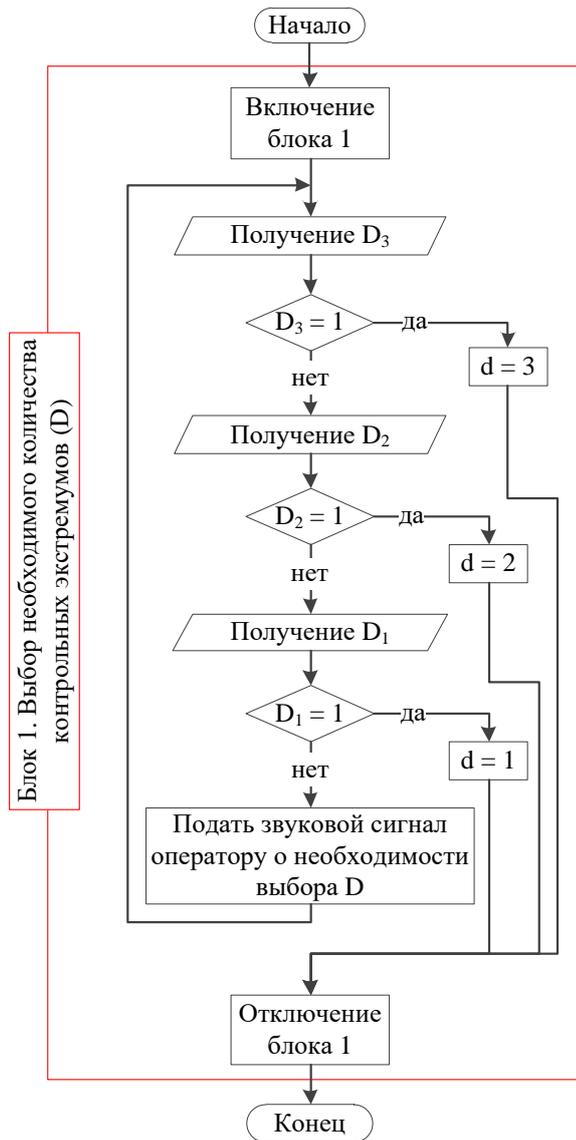


Рисунок 72 – Блок-схема алгоритма выбора необходимого количества контрольных экстремумов

Также в соответствии с блоком 3 оператор должен указать количество обрабатываемых деталей (объем партии N , шт.). Дальнейшую работу система реализует самостоятельно исходя из данных, указанных оператором в первых четырех блоках.

Так полученная система управления в зависимости от степени полярности обрабатываемых полимерных материалов способна реализовать различные технологические процессы по следующим видам экстремумов:

- первый максимум анодного тока – сушка и восстановление прочностных свойств полимерных изделий;

- первый минимум анодного тока – сварка, склеивание, горячее тиснение, заварка трещин, каландрирование, прокатка и изготовление полимерных форм для высокой и глубокой печати;
- первый максимум скорости изменения анодного тока – пропитка (маслонаполнение), а также сушка и восстановление прочностных свойств полимерных материалов с низким порогом термостойкости.
- первый минимум скорости изменения анодного тока – сварка, склеивание, горячее тиснение, заварка трещин, каландрирование, прокатка и изготовление полимерных форм для высокой и глубокой печати сильнополярных полимерных материалов таких, как полиуретан.

При этом организация всех представленных процессов высокочастотной обработки определяется решением следующих общих подзадач:

1. Подготовка технологического устройства, заключающаяся в нагреве или охлаждении электродов рабочего конденсатора до требуемой расчетной температуры, определенной с использованием разработанной в данной работе математической модели, для поддержания координаты точки максимального ВЧ-нагрева в заданном необходимом положении. Также для компенсации смещения рассматриваемой точки можно производить подбор изоляторов разной толщины и материала по описанной в работах [82, 86, 87, 121] методике.

2. При постоянной скорости ($V_{\text{акк}} = \text{const}$) изменения напряжения рабочего конденсатора организовать плавный выход процесса обработки на мощность близкую к максимальной с целью реализации процесса «акклиматизации» обрабатываемого изделия и вывода процесса ВЧ-электротермии в режим максимально возможного воздействия, а также поддержания этого режима до конца данной технологической операции. При этом также предусмотреть возможность изменения времени акклиматизации $\tau_{\text{акк}}$.

3. Для распознавания предпробойного состояния и ликвидации электрического пробоя, после завершения процесса акклиматизации, начать процесс регистрации ЧР с подсчетом их количества $k_{\text{дчр}}$ и определением времени межразрядных интервалов $\tau_{\text{чр}}$.

3.1. При превышении скоростью возникновения ЧР критического значения организовать процесс снижения мощности ВЧ-воздействия. Если принятые меры не приводят к выходу из предпробойного состояния, организовать аварийное отключение с оповещением.

3.2. Обеспечить выход процесса обработки на максимальную мощность с соблюдением условия недопущения электрического пробоя.

4. Организовать контроль выбранного экстремума с целью достижения в обрабатываемом полимерном материале необходимого фазового и (или) релаксационного состояния.

5. Выполнить прекращение процесса ВЧ-обработки либо при достижении необходимой температуры обработки, определяемой по текущему экстремуму, либо по достижению экспериментально определяемого времени обработки.

6. Обеспечить выдержку обрабатываемых деталей под давлением для повышения качества выполняемого процесса и получения необходимого изделия.

Решения подзадач, описанных в пунктах 2 и 3, в рамках настоящего исследования были взяты из работ [82, 121, 151] в неизменном виде. А решения подзадач, описанных в остальных пунктах, были переработаны и дополнены в соответствии с выявленными недостатками существующих разработок и требуемым комплексом операций заявленных процессов.

При этом решения подзадач, описанных в пунктах 4 и 5, для приближения к их реализации в реальных производственных условиях возлагаются на 4 ПЛК, работающих по своему отдельному алгоритму.

Так блок-схема алгоритма работы ПЛК 2, реализующего технологические процессы ВЧ-сушки и восстановление прочностных свойств полимерных изделий, состоит из четырех последовательных блоков и представлена на рисунке 73. Блок 2, в представленной блок-схеме, определяет достижение состояния дипольно-сегментальных потерь в обрабатываемом полимерном материале, соответствующего максимуму анодного тока. Причем, среди исследованных в данной работе полимеров были выявлены только единичные максимумы и

минимумы. Блок 3 обеспечивает выдержку обрабатываемого изделия до полного высушивания в состоянии необходимого максимума (блок 4).

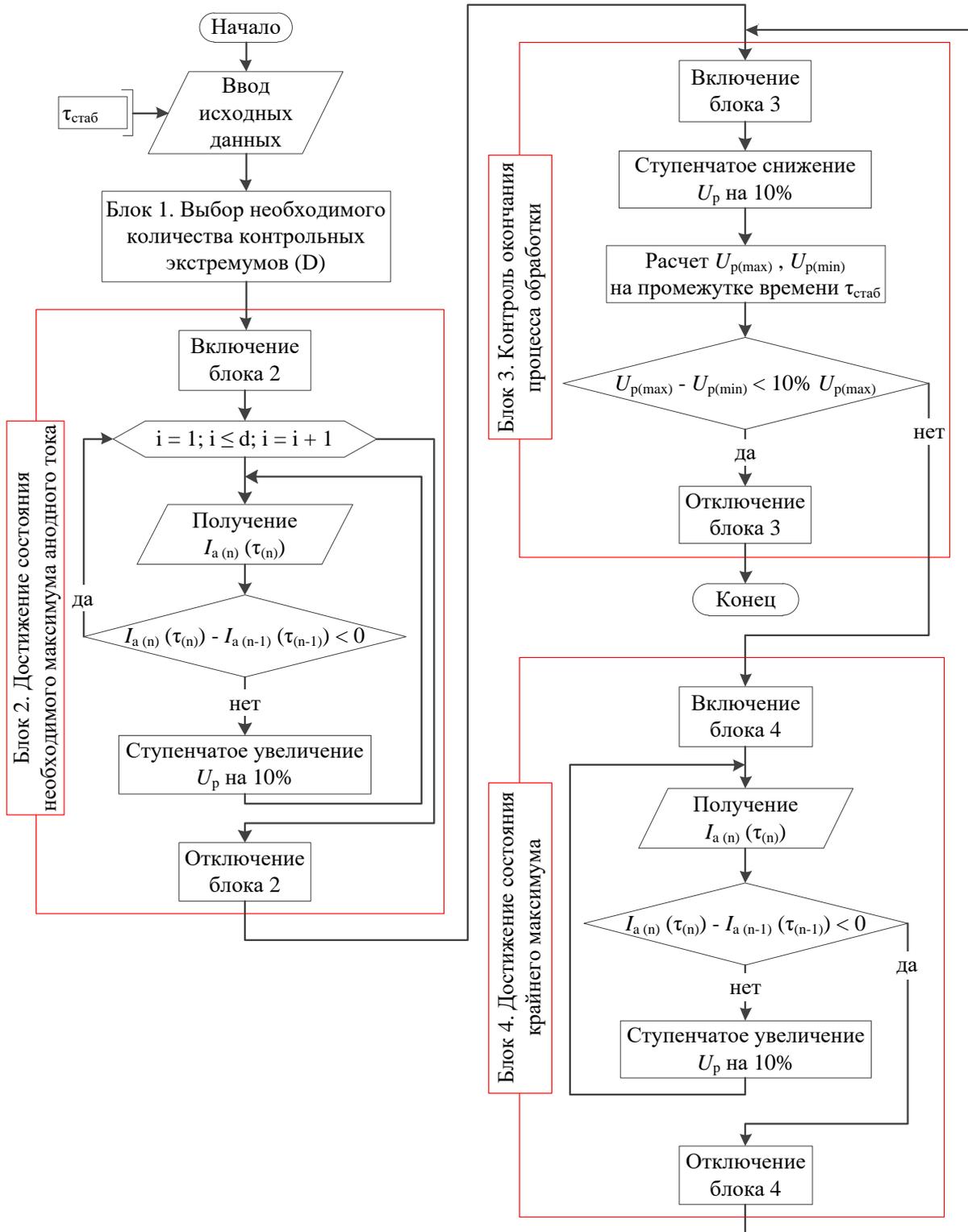


Рисунок 73 – Блок-схема алгоритма работы ПЛК 2, реализующего технологические процессы ВЧ-сушки и восстановление прочностных свойств полимерных изделий

ПЛК 3 реализует технологические процессы сварки, склеивания, горячего тиснения, заварки трещин, каландрирования, прокатки и изготовления полимерных форм для высокой и глубокой печати по алгоритму работы, блок-схема которого представлена на рисунке 74. Блок 2 также, как и в предыдущей блок-схеме (рисунке 73), определяет достижение состояния дипольно-сегментальных потерь в полимере, а блок 3 определяет достижение состояния плавления обрабатываемого изделия, соответствующего минимуму анодного тока.

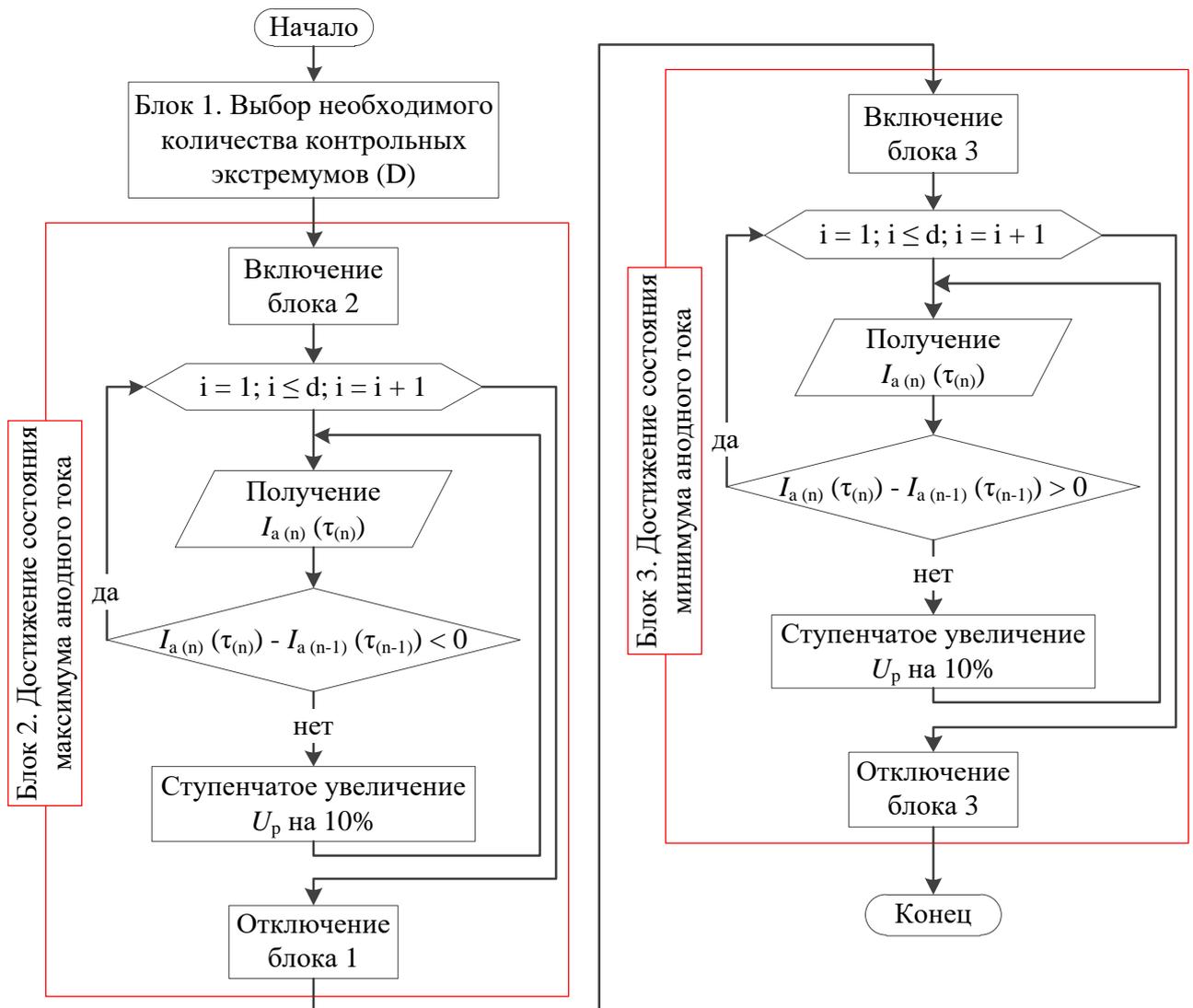


Рисунок 74 – Блок-схема алгоритма работы ПЛК 3, реализующего технологические процессы сварки, склеивания, горячего тиснения, заварки трещин, каландрирования, прокатки и изготовления полимерных форм для высокой и глубокой печати

В отношении представленных блок-схем алгоритмов работы ПЛК 3 и 4, необходимо отметить, что для достижения экстремумов анодного тока возможна и другая математическая реализация, связанная, как было отмечено во второй главе, с прохождением скорости изменения анодного тока dI_a/dT через ноль. Блок-схема алгоритмов второго варианта контроля момента достижения необходимых состояний по прохождению dI_a/dT через ноль представлена на рисунке 75. Любой из представленных алгоритмов одинаково точно решает поставленную задачу.

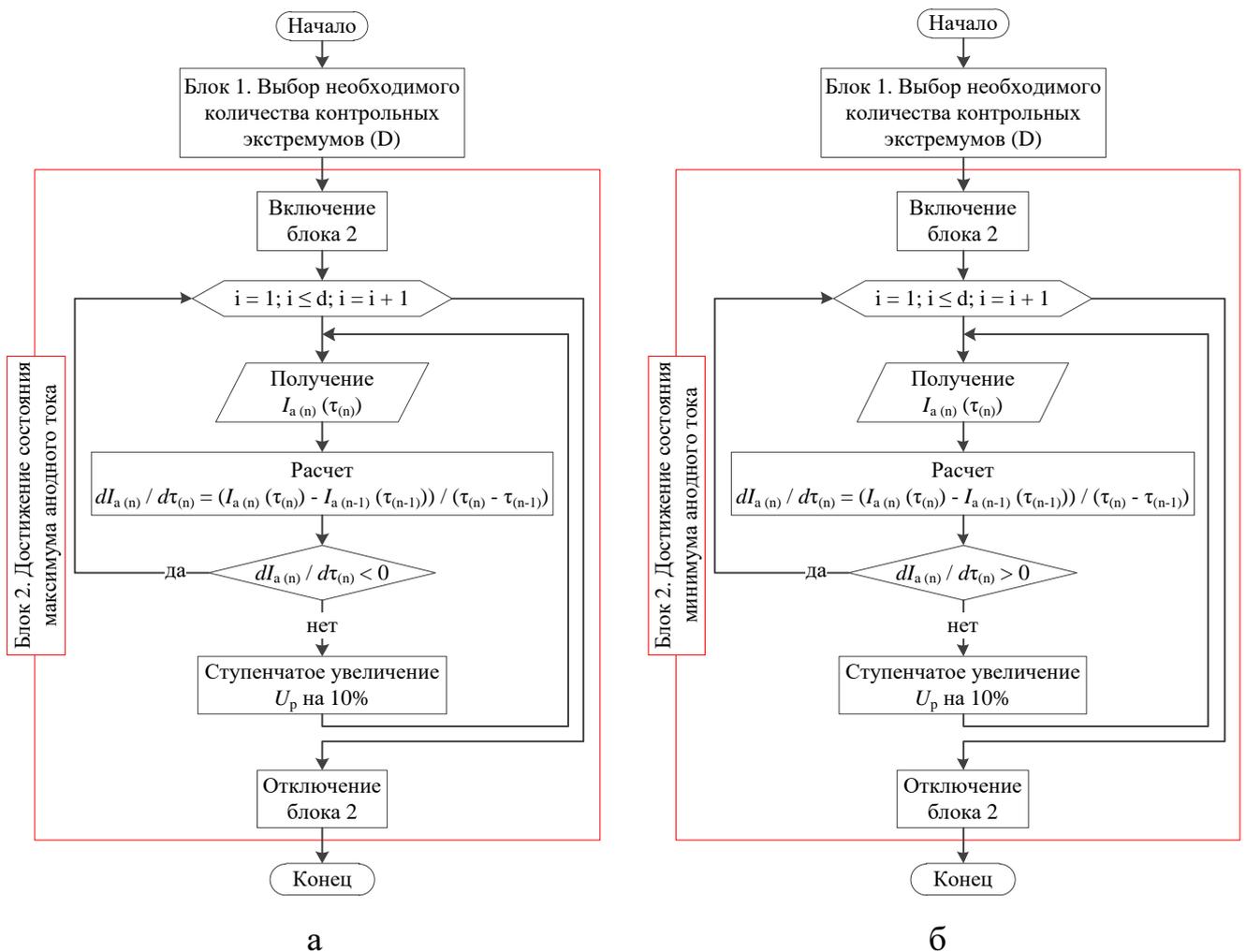
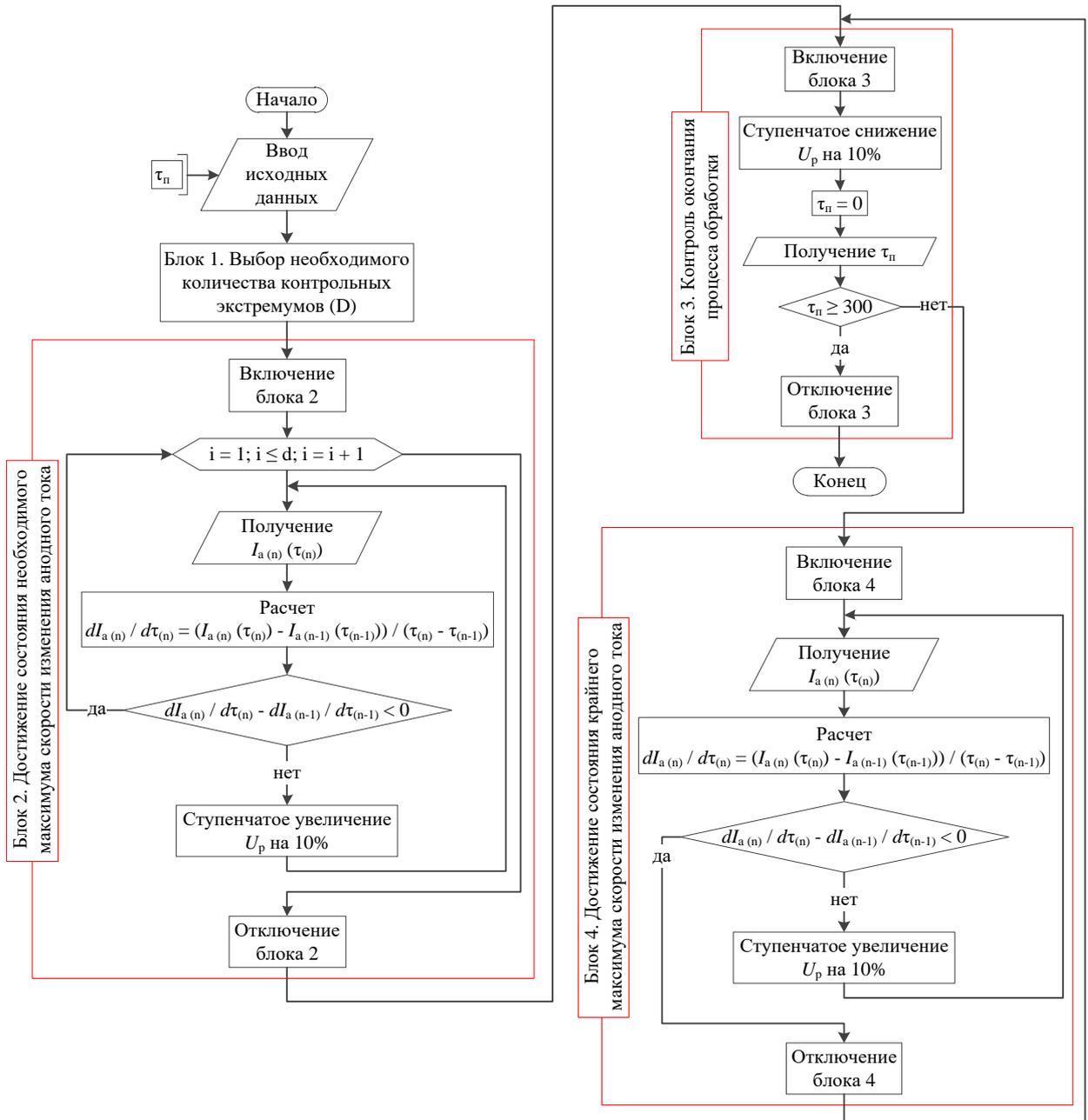


Рисунок 75 – Блок-схема алгоритмов контроля момента достижения максимума (а) и минимума (б) анодного тока по прохождению dI_a/dt через ноль

ПЛК 4 занимается реализацией технологических процессов пропитки (маслонаполнения) полимерных материалов, а также сушки и восстановления прочностных свойств полимеров с низким порогом термостойкости. Блок-схема алгоритма работы данного контроллера, состоящая из четырех блоков, представлена на рисунке 76.



Рисунке 76 – Блок-схема алгоритма работы ПЛК 4, реализующего технологические процессы пропитки (маслонаполнения) полимерных материалов, а также сушки и восстановления прочностных свойств полимеров с низким порогом термостойкости

При этом блок 2 определяет достижение состояния максимума скорости изменения анодного тока, пригодного для реализации процессов пропитки полимеров, например, моторными маслами, а также данный экстремальный параметр является единственно возможным для реализации процессов ВЧ-сушки и ВЧ-восстановления прочностных свойств полимеров, имеющих температуру деструкции меньше температуры плавления. Блок 3 обеспечивает выдержку обрабатываемого изделия до полного высушивания и заполнения необходимым, желателен неполярным, веществом в состоянии крайнего необходимо максимума (блок 4). При этом указанное в блок-схеме время $\tau_{\text{н}}$ было определено и установлено экспериментально в работе [38], но более точное определение времени данного процесса требует дополнительно исследования.

И последний ПЛК 5 включен в общую систему управления для реализации тех же процессов сварки, склеивания, горячего тиснения, заварки трещин, каландрирования, прокатки и изготовления полимерных форм для высокой и глубокой печати только для сильнополярных полимерных материалов таких, как полиуретан, не имеющих экстремумов анодного тока, но имеющих только минимум dI_a/dT , совпадающий с состоянием начала плавления. Поэтому алгоритм работы данного контроллера, блок-схема которого представлена на рисунке 77, пока является частным случаем, ввиду, как уже отмечалось, отсутствия на сегодняшний день единой классификационной базы обрабатываемых полимерных материалов по управляемости при построении экстремальных систем и сравнительно малого количества исследованных в данной работе материалов.

Представленная блок-схема состоит из единственного блока, контролирующего достижение минимума скорости изменения анодного тока, являющегося контрольным в указанных процессах.

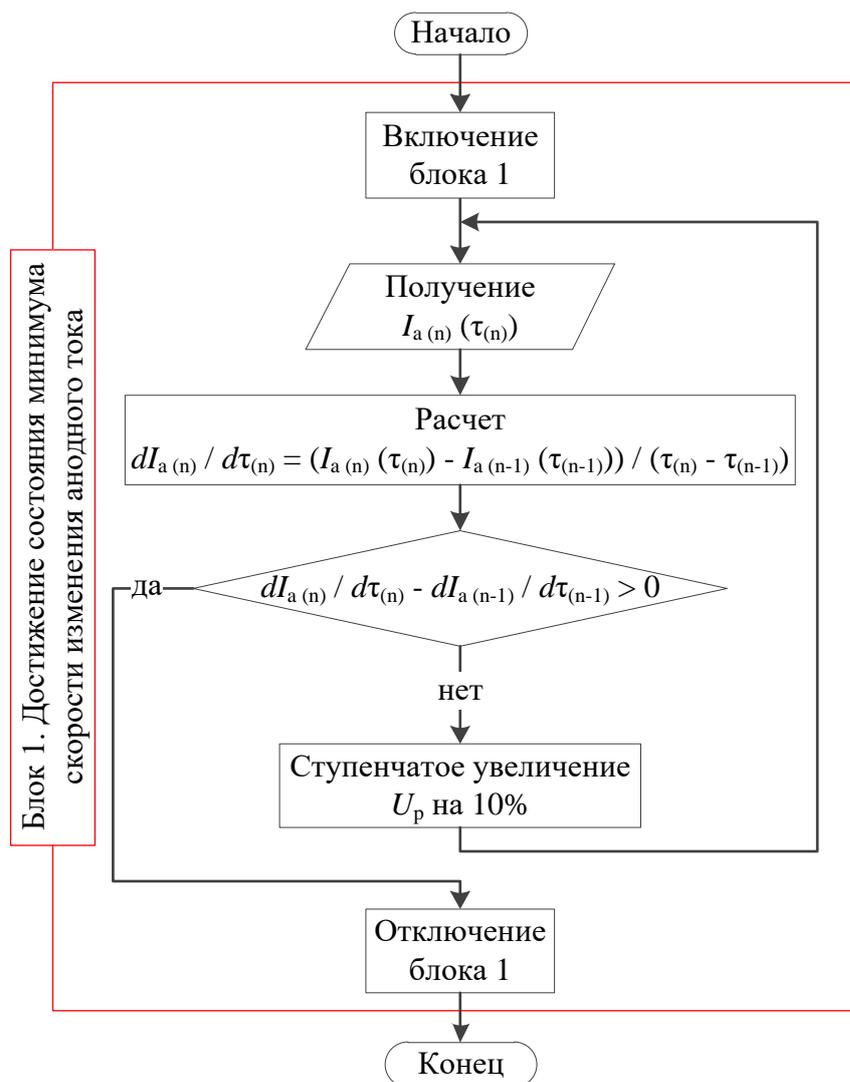


Рисунок 77 – Блок-схема алгоритма работы ПЛК 5, реализующего технологические процессы сварки, склеивания, горячего тиснения, заварки трещин, каландрирования, прокатки и изготовления полимерных форм для высокой и глубокой печати сильнополярных полимерных материалов так

По окончании работы каждого из четырех контроллеров (ПЛК 2-5) по представленным алгоритмам, работа переходит на основной контроллер (ПЛК 1), который отключает режим нагрева и одновременно с этим запускает реле времени для выдержки обрабатываемого изделия под прессом и вывода программного регулятора (исполнительного механизма) в начальное исходное положение, соответствующее положению «0». По окончании выдержки контроллер подает команду на снятие давления с пресса и разгрузку технологического устройства. Затем, в зависимости от объема обрабатываемой партии деталей, система

возвращается к подготовке технологического устройства (рисунок 70, блок 4) под обработку новой детали или отключению АСУ, в случае обработки последней детали из партии.

Во второй главе данной диссертационной работы были представлены результаты импульсного ВЧ-воздействия с характерной динамикой изменения анодного тока во времени, которая также выявила 2 условных экстремума, причем условный экстремум также был выявлен при обработке пластика ПВХ, не имеющего экстремумов на температурной зависимости анодного тока. В соответствии с выявленными условными экстремальными параметрами был разработан принцип управления и сформированы предпосылки организации импульсной ВЧ-обработки. Но на данном этапе импульсное ВЧ-воздействие еще недостаточно исследовано и не апробировано на практике. Поэтому в разработанную в данной работе систему управления импульсное воздействие включено как возможный резервный блок контроля процесса обработки (рисунок 71), но в действительности оно не реализовывалось.

Таким образом, представленная общая система управления реализует различные технологические процессы ВЧ-обработки изделий любой геометрической формы из широкой номенклатуры полимерных материалов. Также она учитывает различия диэлектрических свойств обрабатываемых полимеров, применима к любому типу лабораторного и промышленного оборудования и нацелена на реализацию в реальных производственных условиях.

Каждый ряд процессов ВЧ-обработки в соответствии со своим контрольно-управляющим экстремальным параметром реализуется на отдельном ПЛК по заранее отложенной и не требующей перезаписи программе, что облегчает работу оператора. При этом время обработки при каждом отдельном процессе для разных полимеров является переменной величиной и зависит от многих факторов (диэлектрические свойства, степень загрязненности поверхностного слоя, наличие дефектов, условия хранения, транспортировки и эксплуатации, технология производства и переработки).

4.2 Проектирование блока автоматизированной системы управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов с разной степенью полярности

Проектирование блока автоматизированной системы управления велось исходя из основных задач, поставленных в ходе диссертационного исследования, а именно, разработка универсального, экономически выгодного, ремонтнопригодного, легковоспроизводимого устройства, реализующего различные технологические процессы ВЧ-обработки полимерных материалов с разной степенью полярности на промышленном электротермическом оборудовании в производственных условиях.

Поэтому для выполнения конкретных видов ВЧ-обработки полимерных материалов и управления связанных с ними процессами было решено использовать отдельные ПЛК (Arduino Mega 2560), каждая из которых работает по отдельному алгоритму. Общее их количество составило 5 штук.

На рисунке 78 изображена схема блока автоматизации устройства реализации и управления процессами ВЧ-электротермии полимеров с разной степенью полярности, содержащая: 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 – термопара; 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 термопары и акустических датчиков.

Работа блока осуществляется следующим образом. Одновременно с включением высокочастотного генератора, включаются блоки управления и автоматизации. При этом оператору в соответствии с производимым технологическим процессом обработки с помощью соответствующих панелей выбора (12), (13), (14) и (18) необходимо произвести выбор параметров обработки. Последовательно на аналоговые входы вычислительного устройства ПЛК 1 передаются данные по температуре низкопотенциального электрода, которые сравниваются с расчетным значением температуры, предварительно определенном в математической модели по методике, описанной в главе 3. В случае расхождения температурных значений в пределах 2% производится подготовка низкопотенциального электрода к обработке, заключающаяся в его подогреве с помощью нагревательного прибора (9) или естественном охлаждении в зависимости от знака расхождения. Способ подогрева и принцип работы нагревательного прибора были определены в главе 2 настоящего диссертационного исследования.

Последовательно после загрузки технологического устройства производится акклиматизация полимерной заготовки и непосредственно сама обработка в соответствии с алгоритмами, представленными в предыдущем пункте данной работы.

При этом линейный токовый датчик (6) измеряет анодный ток высокочастотного генератора, а акустические датчики (7) регистрируют ЧР, возникающие на полимере в процессе ВЧ-обработки. Данные по ЧР передаются на аналоговые входы вычислительного устройства ПЛК 1, а по I_a на аналоговые входы вычислительных устройств остальных четырех ПЛК.

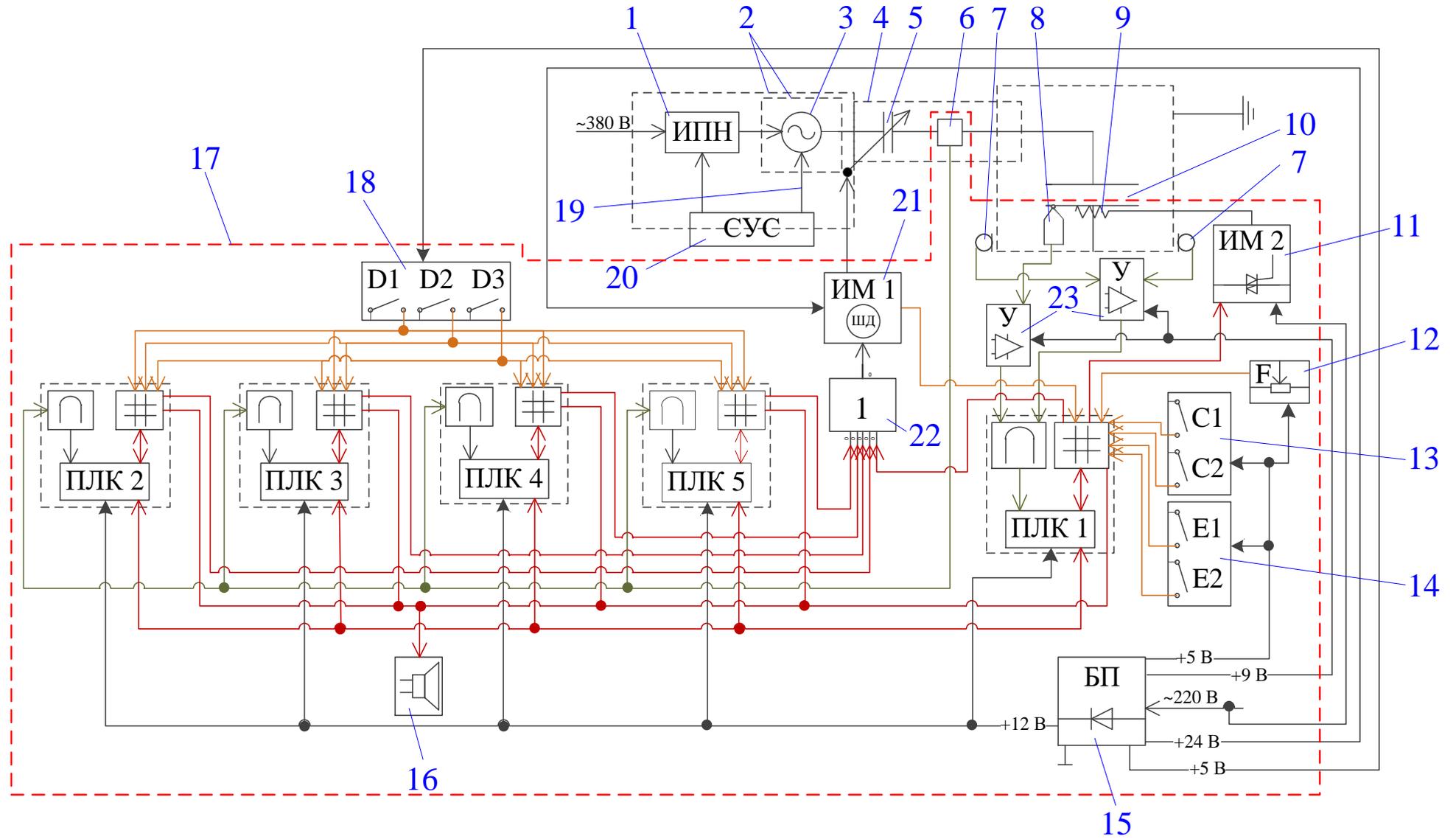


Рисунок 78 – Схема блока автоматизации устройства

ПЛК 1 производит расчет количества ЧР и межразрядного времени. Если регистрация значимых ЧР превышает пороговое значение, определенное в работах [82, 121, 151], то микроконтроллер подает команду ИМ 1 (21) на уменьшение мощности ВЧ-воздействия. Остальные ПЛК (ПЛК 2, ПЛК 3, ПЛК 4 и ПЛК 5) производят контроль и расчет величины изменения анодного тока и времени проводимого процесса. По интенсивности изменения анодного тока определяется достижение необходимого состояния обрабатываемого полимера. Привязка отдельного ПЛК к конкретному экстремальному параметру контролируемого показателя описана в предыдущем пункте.

Каждый ПЛК связан с ИМ 1 (21) через логический элемент «ИЛИ» (22) для обеспечения его правильного функционирования по следующей схеме (рисунок 79).

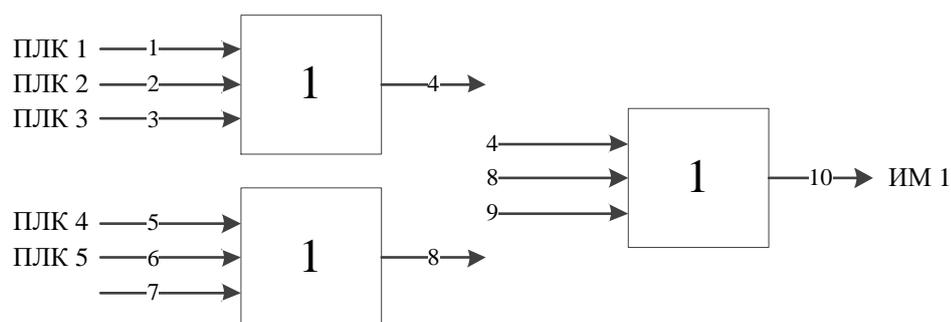


Рисунок 79 – Схема подключения каждого ПЛК к ИМ 1 через микросхему типа 5411J серии TTL (TTL)

В качестве логического элемента использовалась микросхема типа 5411J серии TTL (TTL) с функциональным назначением «3 элемента 3ИЛИ».

Регулирование мощности ВЧ-воздействия обеспечивалось ИМ 1 (21), в качестве которого был использован шаговый двигатель модели «КВА-Planeta» (рисунок 80).

Данный ИМ 1 (21) обеспечил точный поворот подвижной пластины переменного конденсатора на заданный угол.



Рисунок 80 – Шаговый двигатель модели "КВА-Planeta"

Таким образом, созданная АСУ ТП, позволяет производить в автоматизированном режиме обработку изделий из полимерных материалов разной степени полярности с защитой от пробойных явлений, выбором контролируемых параметров и количества обрабатываемых изделий, а также контролем фазового и релаксационных состояний обрабатываемого материала.

4.3 Внедрение АСУ ТП ВЧ-обработкой полимерных изделий разной степени полярности

Внедрение предложенной АСУ ТП ВЧ-обработки значительно расширяет возможности использования ВЧ-оборудования. Так одним из направлений использования ВЧ-электротермии является нагрев полимерных изделий транспортного машиностроения для их пропитки смазочными веществами.

Как отмечалось в п. 2.3 данной диссертационной работы, традиционная технология пропитки (наполнения) предусматривает погружение предварительно высушенных полимерных изделий в ванну термо-камеры, частично заполненную смазочным веществом, с последующей выдержкой этих изделий в данной камере при постоянной температуре. Подобную технологическую систему можно создать применительно и к высокочастотному оборудованию. При этом одним из основных изделий транспортного машиностроения, требующего пропитки смазочными веществами являются подшипники качения и скольжения, а также их

комплектующие (рисунок 81). А в работах [43, 79, 151], авторы разработали методику конструирования технологической оснастки для ВЧ-обработки полимерных изделий сложной формы, например, таких как полиамидный сепаратор подшипника буксового узла вагона.



Рисунок 81 – Подшипники и их комплектующие, изготовленные из полимерных материалов

Перспективность использования ВЧ-энергии при пропитке полимерных изделий объясняется физической сущностью данного процесса. Необходимым этапом пропитки является сушка полимера до полного "высыхания", а на место испаренной жидкости проникает смазочное вещество, т. е. полимер словно "губка" начинает впитывать смазку. Причем, проводя пропитку в ВЧ-поле, смазочное вещество не требует добавления поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые ускоряют процесс пропитки при традиционных способах [38]. Использование ВЧ-энергии при пропитке полимерных изделий еще малоизучено и являются одним из направлений будущих исследований.

Здесь также необходимо отметить, что разработанная АСУ ТП ВЧ-обработки была внедрена 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 (приложение Е). 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.

Результаты настоящего диссертационного исследования также были внедрены 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) (приложение Ж).

4.4 Выводы по главе

1. Разработаны алгоритмы управления процессом ВЧ-обработки полимерных материалов с разной степенью полярности, включающие процессы сварки, склеивания, горячего тиснения, заварки трещин, каландрирования, прокатки, изготовления полимерных форм для высокой и глубокой печати, сушки, пропитки и восстановления прочностных свойств полимерных материалов и изделий из них, предусматривающие обработку партии изделий.

2. Создана автоматизированная система управления процессом ВЧ-нагрева промышленного использования с защитным контуром от пробойных явлений, контуром выбора контролируемых параметров и количества обрабатываемых изделий, блоками контроля фазового и релаксационных состояний обрабатываемого материала.

3. Созданная в рамках данной диссертационной работы автоматизированная система управления высокочастотной обработкой полимеров разной степени полярности внедрена в производство на предприятие полиграфической отрасли в составе оборудования высокочастотной электротермии с годовым экономическим эффектом *1 026 539* рублей.

4. Результаты настоящего диссертационного исследования внедрены в учебный процесс в курсы дисциплин уровней специалитета и магистратуры.

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-регулирования для обеспечения траектории нагрева, позволяющая производить контроль температурной зависимости линейного расширения полимера и построение амперметрической 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, 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, с целью решения исследовательских и практических задач.

5. Установлены закономерности влияния нагреваемого 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Arduino. Arduino Mega 2560 – Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardMega2560>
2. Bader, H. High frequency drying of porous materials / H. Bader // *Drying Technology*. – 1996. – V. 14, № 7-8. – P. 1499-1523.
3. 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.
4. Hou, A. Effect of microwave irradiation on the physical properties and morphological structures of cotton cellulose/ A. Hou, X. Wang, L. Wu // *Carbonate Polymers*. – V. 74. – 2008. – P. 934-937.
5. Land D.V. An Efficient, Accurate and Robust Radiometer Configuration for Microwave Temperature Measurement for Industrial and Medical Application // *J. of Microwave Power*. 2001. Vol. 36, №3. P.139-153.
6. Livshits, A. V. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Pushpa Publishing House, Allahabad, India
7. Lyons, P. W. Drying of porous medium with internal heat generation / P. W. Lyons, J. D. Hatcher, J. E. Sunderland // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. – 1972. – V. 15, № 5. – P. 897-905.
8. Metaxas, A. C. Industrial Microwave Heating / A. C. Metaxas, R. J. Meredith // Peter Peregrinus. – 1983. – C.111-150.
9. Ohe, T. Microwave Irradiation onto Nylon 6 Fibers in Organic Solvent / T. Ohe, Y. Yoshimura // *Sen'i Gakkaishi*. – V.65. – №1. – 2009. – P. 64–70.
10. Tinga, W.R. Dielectric properties of materials for microwave processing – tabulated / W.R. Tinga, S.O. Nilson // *J. of Microwave Power*, 1973. – V.8. – № 1. – P.27–33.

11. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768
[https://staff.guilan.ac.ir/staff/users/chaibakhsh/fckeditor_repo/file/documents/Optimum %20Settings%20for%20Automatic%20Controllers%20\(Ziegler%20and%20Nichols,%201942\).pdf](https://staff.guilan.ac.ir/staff/users/chaibakhsh/fckeditor_repo/file/documents/Optimum%20Settings%20for%20Automatic%20Controllers%20(Ziegler%20and%20Nichols,%201942).pdf)
12. Об стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года: Приказ М-ва промышленности и торговли Рос. Федерации и М-ва энергетики Рос. Федерации от 8 апреля 2014 г. № 651/172
13. О внесении изменений в Стратегию развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года, утвержденную приказом М-ва промышленности и торговли Рос. Федерации и М-ва энергетики Рос. Федерации от 8 апреля 2014 г. № 651/172: Приказ М-ва промышленности и торговли Рос. Федерации и М-ва энергетики Рос. Федерации от 14 января 2016 г. № 33/11
14. СанПиН 2.2.4.1191–03 Физические факторы производственной среды Электромагнитные поля в производственных условиях, на рабочих местах / Утверждено Первым заместителем Министра здравоохранения Российской Федерации 30.01.2003 года // Дата введения: 1.05.2003 г.
15. Александров, А. А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей: дис. ... кан. тех. наук 05.13.18: защищена 2016 / Александров Андрей Алексеевич. – Иркутск: 2014. – 164 с.
16. А.с. 1437241 СССР, МКИЗ В29С 65/04. Устройство для регулирования процесса высокочастотной сварки. / А. И. Панасюк, А. А. Савченко (СССР). – № 678.056.4; заявл.30.12.87; опубл. Бюл. № 42, 1988. – 12с.
17. Архангельский, Ю. С. Сверхвысокочастотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов // Вестник СГТУ. Саратов: СГТУ, 2011. - №4. Выпуск 3. – С. 5-15.
18. Базарова, Ф. Ф. Органические и неорганические полимеры в конструкциях радиоэлектронной аппаратуры / Ф. Ф. Базарова. М.: «Сов. радио», 1974. – 160 с.

19. Барвинский, И. А. Проблемы литья под давлением изделий из термопластичных материалов: спаи / И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. – М.: Издательский дом «Отраслевые ведомости», 2009. - №7. С. 25-33.
20. Барвинский, И. А. Проблемы литья под давлением изделий из термопластичных ПМ: неустойчивое заполнение формы / И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. – М.: Издательский дом «Отраслевые ведомости», 2009. - №8. С. 14-21.
21. Барвинский, И. А. Проблемы литья под давлением изделий из ПМ: недолив // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. – М.: Издательский дом «Отраслевые ведомости», 2011. - №1. С. 42-46.
22. Барвинский, И. А. Проблемы литья под давлением изделий из полимерных материалов: уплотнение / И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. – М.: Издательский дом «Отраслевые ведомости», 2014. - №3.
23. Безменов, Ф. В. Некоторые вопросы высокочастотной сварки термопластичных материалов / Ф. В. Безменов, В. В. Коробова, И. Г. Федорова // Электротехника, 1986. - №7. – С. 61-62.
24. Берлинер, М. А. Автоматическое управление процессами сушки // В кн. Автоматизация процессов сушки в промышленности и сельском хозяйстве. – М.: Машгиз, 1963. – С. 8-22.
25. Бобович, Б. Б. Химики – автолюбителям: справочное издание / Б. Б. Бобович, Г. В. Бровак, Б. М. Бунаков и др. – 2-е изд., испрр. – Л.: Химия, 1991. – 320 с.
26. Богданов, А. Пластики на рельсах // Пластикс: сырье и добавки. – Самара: ООО «Информационный центр», 2013. - №8(126). – С. 17-22.
27. Бортников, В. Т. Основы технологии переработки пластических масс / В. Т. Бортников. Л.: Химия, 1983. – 303 с.
28. Брицин, Н. Л. Нагрев в электрическом поле высокой частоты. – М., Л.: Машиностроение, 1965 – 186 с.

29. Брицын Н.Л. Сварка полиамидов при нагреве в электрическом поле высокой частоты / Н. Л. Брицын // Тр. ВНИИ токов высокой частоты им. В. П. Вологодина. – М.: Машгиз. 1964. – С. 131-138.
30. Бубнов, А. В. Автоматизированная система управления мобильной СВЧ-установкой для термообработки материалов: дис. ... канд. техн. наук. – СПб: – СПбГТУ, – 2004. – 113 с.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.

36. 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.
37. 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.
38. Буторин, Д. В. Исследования жидкофазного наполнения полимеров и композитов на их основе моторными маслами / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, С. И. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2017. - № 2(54). – С. 60-66.
39. Буторин, Д. В. Комплексованный 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.
40. Буторин, Д. В. Комплексованный 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.
41. Буторин, Д. В. Комплексованный метод автоматизированной высокочастотной параметрии контроля фазовых превращений в полимерных материалах / Н. Г. Филиппенко, Д. В. Буторин, 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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. - №4.

46. 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. - № 4(48) – С. 80-86.

47. Волкова, А. В. Рынок крупнотоннажных полимеров. Часть II. Полистирол, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат. – СПб.: НИУ ВШЭ, 2016. – 81 с.

48. Втюрин, В. А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами / В. А. Втюрин. – СПб: Государственная лесотехническая академия, 2006. – 153 с.

49. Гайдамака, А. В. Роликоподшипники букс вагонов и локомотивов: моделирование и усовершенствование: монография / А. В. Гайдамака. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. – 312 с.
50. Гареев, Ф. Х. Сушка древесины электромагнитными волнами / ЛесПромИнформ. Деревообрабатывающее оборудование. – 2004. №9 (22) – С. 74-78.
51. Глуханов, Н. П. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении / Н. П. Глуханов, И. Г. Федорова. – Л.: Машиностроение, 1983. – 160 с.
52. Глуханов, Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева. – Л.: Машиностроение, 1979. – 61 с.
53. ГОСТ 8.395-80 ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 12 с.
54. ГОСТ 17648-83 Полиамиды стеклонаполненные. – М.: Издательство стандартов, 1983 г. – 19 с.
55. Диэлектрические потери [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://stud.izhdv.ru/rir/4A_4.html
56. Зайцев, К. И. Сварка пластмасс / К. И. Зайцев – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
57. Зайцева, К. И. Сварка полимерных материалов / К. И. Зайцева, Л. Н. Мацюк. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
58. Зайчиков, М. А. Системный анализ и моделирование физико-химических характеристик полимеров в условиях ультразвукового контроля их качества: дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж: – Гос. технол. акад., 2008. – 192 с.
59. Законы регулирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kipiavp.ru/info/zakoni-regulirovaniya.html>
60. Законы регулирования. Измерение температуры: теория и практика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://poznayka.org/s14766t1.html>
61. Зонненшайн, М. Ф. Полиуретаны. Состав, свойства, производство, применение. – М.: ЦОП Профессия, 2018 – 576 с.

62. Калганова, С. Г. Влияние СВЧ воздействия электромагнитного поля на кинетику отверждения эпоксидной смолы / С. Г. Калганова // Вестник СГТУ. – Саратов: СГТУ, 2006. – №1(10). – Вып. 1. – С. 90-96.
63. Калганова, С. Г. Влияние СВЧ электромагнитного поля на процесс отверждения эпоксидных смол / С. Г. Калганова, В. А. Лаврентьев // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. Тр. – Красноярск: Краснояр. гос. техн. ун-т, 2002. – С. 139-140.
64. Калганова, С. Г. Измерения в СВЧ электротехнологии / С. Г. Калганова // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП–2004: труды VII Междунар. науч.–техн. конф. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С. 58-60.
65. Калинин, Э. Л. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий. Справочное издание. / Э. Л. Калинин, М. Б. Соковцева. – Л.: Химия, 1987. – 416 с.
66. Каталог на марочный ассортимент композиционных материалов: таблицы свойств. – М.: НПП «ПОЛИПЛАСТИК», 2014. – 44 с.
67. Кацнельсон, М. Ю. Пластические массы: Свойства и применение: Справочник / М. Ю. Кацнельсон, Г. А. Балаев. – 3-е изд., перераб. – Л.: «Химия», 1978 – 384 с.
68. Киселева, Т. Ф. Технология сушки: Учебно-методический комплекс / Т. Ф. Киселева. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2007. – 117 с.
69. Княжевская, Н. П. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Н. П. Княжевская. – М.: Энергия, 1980. – 374 с.
70. Княжевская, Г. С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г. С. Княжевская, М. Г. Фирсова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 71 с.
71. Княжевская, Г. С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г. С. Княжевская, М. Г. Фирсова. – Л.: Машиностроение, 1989. – 64 с.
72. Кочнев, А. М. Физикохимия полимеров / А. М. Кочнев, А. Е. Заикин, С. С. Галибеев, В. П. Архиреев. – Казань: Издательство «Фэн», 2003. – 512 с.

73. Крыжановский, В. К. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко, Ю. В. Крыжановская. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 стр., ил.
74. Кузнецов, Е. В. Альбом технологических схем производства полимеров и пластмасс на их основе / Е. В. Кузнецов, И. П. Прохорова. – Москва: Химия, 1969. – 73 с.
75. Кузнецов, Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
76. Ларченко А. Г. Автоматизированное выявление дефектов в изделиях из полиамидных материалов методом высокочастотного излучения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, – 2014. – №1 (41). С. 160-165.
77. Ларченко, А. Г. Высокочастотный метод диагностики полиамидных сепараторов подшипников буксового узла / А. Г. Ларченко, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко // Сб. статей IV Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – С. 206-211.
78. Ларченко, А. Г. Инновационный метод диагностики изделий из полимерных материалов / А. Г. Ларченко, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко // Сборник научных трудов. Транспортная инфраструктура Сибирского региона, 2013. - №2. С.437-440.
79. Ларченко, А. Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием при производстве и эксплуатации изделий из полимерных материалов: дис. ... кан. тех. наук 05.13.06: защищена 2014 / Ларченко Анастасия Геннадьевна. – Иркутск: 2014. – 164 с.
80. Лившиц, А.В. Автоматизация научных исследований высокочастотной обработки полимеров / А. В. Лившиц // Science and practice: new discoveries: материалы Международной научной конференции, Чехия, г. Карловы Вары – Россия, г. Москва, 24-25 октября 2015 г., С. 106–114.

81. Лившиц А. В. Автоматизированная система научных исследований высокочастотной электротермии // Проблемы машиностроения и автоматизации. М.: Изд-во НИАТ. 2015. № 4. С. 54-60.
82. Лившиц, А. В. Автоматизированное управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров: дис. ... док. тех. наук 05.13.06: защищена 2016 / Лившиц Александр Валерьевич. – Иркутск: 2016. – 351 с.
83. Лившиц, А.В. АСНИ ВЧ (Автоматизированная система научных исследований высокочастотной обработки) и изучение электрических пробойных явлений в электротермии / А. В. Лившиц // Научные исследования: от теории к практике: материалы V Междунар. Науч.-практ. Конф. (Чебоксары, 06 нояб. 2015 г). – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – № 4 (5).
84. Лившиц, А. В. Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты / А. В. Лившиц, А. Я. Машович, Н. Г. Филиппенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2011. - № 2(30). – С. 135-140.
85. Лившиц, А. В. Высокочастотная обработка полимерных материалов. Организация систем управления / А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко, С. К. Каргапольцев. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – 172 с.
86. Лившиц, А. В. Исследование процесса высокочастотной электротермии термопластов на основе его математического моделирования / А. В. Лившиц // Системы. Методы. Технологии. – Братск: БрГУ, 2014. – №1 (21).
87. Лившиц, А. В. Математическое моделирование процессов высокочастотного нагрева термопластов и повышение качества сварных полимерных деталей / А. В. Лившиц // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2014. – Вып. 1 (41).
88. Липатов, Ю. С. Справочник по химии полимеров / Ю. С. Липатов, А. Е. Нестеров и др. – Киев: Наукова думка, 1971. – 536 с.

89. Лущейкин, Г. А. Диэлектрическая релаксация в полиамидных пленках / Г. А. Лущейкин, В. В. Сурова, В. Д. Воробьев и др. // Высокомолекулярные соединения. – 1975. – Сер. Б. – Т.17. – № 2. – С. 159-162.
90. Лыков, В. А. Теория сушки / В. А. Лыков. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 420 с.
91. Лыков, А. В. Тепло и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 518 с.
92. Макаров, В. Г. Промышленные термопласты / В. Г. Макаров, В. Б. Коптенармусов // Справочник. – М.: Химия; М.: Колосс, 2003. – 204 с.
93. Максименко, В. А. Автоматизация СВЧ-установок на магнетронах бытовых микроволновых печей [Электронный ресурс] / В. А. Максименко, А. А. Парапонов // – Режим доступа: www.rusnauka.com/26_WP_2013/Tecnic/6_145107.doc.htm
94. Максимов, Г. А. Исследование процессов тепло- и массообмена при внутреннем источнике тепла.: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М.: МТИЛП, 1956. – 18 с.
95. Малов А.Н. Краткий справочник металлиста. Изд. 2-е. М.: Машиностроение, 1971.
96. Марков, А. В. Автоматический контроль температуры в процессе высокочастотной сварки пластмасс / А. В. Марков, С. Н. Румынский, Ю. П. Юленец //Сварочное производство, 2005. - №4. – С. 45-47.
97. Марков, А. В. Многофункциональный контроль параметров технологического процесса в электротермической установке высокочастотного диэлектрического нагрева / А. В. Марков, Ю. П. Юленец // Электротехника, 2007. – № 7. – С. 60-64.
98. Маркова, Т. Э. Современное состояние и направления развития полимерной индустрии / Т. Э. Маркова // Экономические науки. М.: Экономические науки, 2014. - № 6 (115). – С. 94-98.

99. Махов, А. Н. Разработка эффективной технологии сушки стеклонаполненных полиамидов: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов: – СГТУ – 2009.
100. Мир сварки. Относительная диэлектрическая проницаемость [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://weldworld.ru/theory/summary/otnositelnaya-dielektricheskaya-pronicaemost.html>
101. Михайленко, В. С. Методы настройки нечёткого адаптивного ПИД-регулятора / В. С. Михайленко, В. Ф. Ложечников // ААЭКС. – 2009. – №2(24)
102. Нейман, Дж. Сварка пластмасс / Дж. Нейман, Ф. Дж. Бокхоф. – М.: Машиностроительная литература, 1961. – 124 с.
103. Нетушил, А. В. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А. В. Нетушил, Б. Я. Жуховицкий, В. Н. Кудин. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 480 с.
104. Панов, Ю. Т. Современные методы переработки полимерных материалов. Экструзия. Литье под давлением: учеб. пособие / Ю. Т. Панов, Л. А. Чижова, Е.В. Ермолаева; Владим. гос. ун-т имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2013. – 128 с.
105. Панова, Л. Г. Способы, технологии и оборудование переработки полимерных композиционных материалов методами прессования и литья под давлением: учеб. пособие / Л. Г. Панова, С. Г. Кононенко, Т. П. Устинова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. – 120 с.
106. Патент RU №16579, МПК H05B3/00. Устройство для высокочастотной сварки полимерных материалов / А. Г. Гудков, Г. А. Кошеваров, В. Ю. Леушин; заявитель и патентообладатель Гудков А. Г., Кошеваров Г. А., Леушин В. Ю. – № 2000124241/05; заявл. 07.02.2000; опубл. 27.09.2000, Бюл. № 31.
107. Патент RU №151071, МПК F26B3/34. Устройство для сушки отходов при изготовлении топливных брикетов / Н. Г. Филиппенко, С. Н. Филатова, С. И. Попов, А. В. Лившиц; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей

сообщения (ФГБОУ ВПО ИрГУПС). – № 2014135254/28; заявл. 28.08.2014; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8.

108. Патент на полезную модель № 132549. Устройство измерения температуры поверхности объекта / С. И. Попов, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко. заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВПО ИрГУПС). Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20.09.2013.

109. Патент РФ №2017623, МПК В29С65/04. Электрический блок устройства для высокочастотной сварки пластмасс / Б. В. Антоньянц, А. М. Иванов; В. Ю. Рымынов; заявитель и патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью – фирма «Грэгори электроникс». – № 92 001861/05; заявл. 22.10.1992; опубл. 15.08.1994, Бюл. № 24. – 12 с.

110. Пахомов, С. И. Поливинилхлоридные композиции: учеб. пособие / С. И. Пахомов, И. П. Трифонова, В. А. Бурмистров. – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2010. – 104 с.

111. Перегуд, Е. А. Санитарная химия полимеров. Санитарно-химические исследования при производстве и применении синтетических полимеров. – Л.: Издательство «Химия», Ленинградское отделение, 1967. – 380 с.

112. Перельмутер, А. В. Беседы о строительной механике. Научное издание / А. В. Перельмутер. – М.: Издательство SCAD Soft, издательство ассоциации строительных вузов, 2014. – 250 с.

113. Петрова, П. Н. Исследование механизмов формирования износостойких маслонаполненных композитов на основе политетрафторэтилена, полученных путем пропитки пористых заготовок / П. Н. Петрова, А. Л. Федоров // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – Якутск: СВФУ имени М. К. Аммосова, 2010. Т. 7. №4. – С. 52-58.

114. Пивень, А. Н. Теплофизические свойства полимерных материалов. Справочник / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. – Киев: Издательское объединение «Вища школа», 1976. – 180 с.
115. ПИД-закон регулирования. Методы нахождения ПИД коэффициентов [Электронный ресурс] // «Термодат» – Режим доступа: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf>
116. Пищулин, И. Сушка – дело тонкое / И. Пищулин // Пластикс: индустрия переработки пластмасс. – Самара: ООО «Информационный центр», 2012. - №11(117). – С. 38-42.
117. Пластмассы СПб. Железнодорожный транспорт – Режим доступа: <http://www.plastspb.ru/zheleznodorozhnyj-transport>
118. Побединский, В. С. Активирование процессов отделки текстильных материалов энергией электромагнитных волн ВЧ, СВЧ и УФ диапазонов – Иваново: ИХР РАН, 2000. – 128 с., ил.
119. Полиамид 6 (ПА 6) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.anid.ru/poliamid/6>
120. Попов, М. С. Способ нанесения полимерных порошковых покрытий ВЧ-электротермическим нагревом и автоматизация научных исследований процесса / М. С. Попов, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко, А. С. Попов, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2017. - № 1(53). – С. 78-84.
121. Попов, С. И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров: дис. ... кан. тех. наук 05.13.06: защищена 2013 / Попов Сергей Иванович. – Иркутск: 2013. – 150 с.
122. Попов, С. И. Восстановление подшипников буксовых узлов подвижного состава / С. И. Попов, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко // Сборник научных трудов Sworld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012», 2–12 октября 2012г. Том 2. Транспорт, Физика и математика. – Одесса. – 2012. – С.39-43.

123. Попов, С. И. Экспериментальные исследования возможности восстановления изделий из полимерных материалов / С. И. Попов, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы третьей всероссийской научно–практической конференции с международным участием. 13-17 мая 2013 г. Иркутск: ИрГУПС, 2013. С.430-437.
124. Применение полимеров в машиностроении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mplast.by/encyklopedia/primenenie-polimerov-v-mashinostroenii/>
125. 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.
126. 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.
127. Расчет нагрева элементов технологической системы при высокочастотной термической обработке. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617957 / А. В. Лившиц, С. И. Попов, Н. Г. Филиппенко, А. Г. Ларченко // Правообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28.08.2013г.
128. Регуляторы температуры. Вводная часть [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.omsketalon.ru/?action=regul_vvod

129. Румынский, С. Н. Автоматизированная система управления процессом высокочастотной сварки изделий из полиамида: дис. ... кан. тех. наук 05.13.06, 05.09.10: защищена 2005 / Румынский Сергей Николаевич. – СПб: 2005. – 133 с.
130. Румынский, С. Н. Автоматизация процесса высокочастотной сварки корпусов щелочных аккумуляторов / С. Н. Румынский, Ю. П. Юленец // Сб. научн. тр. по химическим источникам тока. – СПб: Химиздат, 2004. – С. 135-139.
131. Румынский, С. Н. Оптимизация процесса высокочастотной сварки изделий из полиамида / С. Н. Румынский, В. В. Кашмет, А. В. Марков // Материалы 5 Международ. конф. «Действие ЭМ-полей на пластичность и прочность материалов». Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. – С. 199-201.
132. Сажин, Б. И. Современные методы сушки / Б. И. Сажин. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
133. Сажин, Б. И. Электрические свойства полимеров / Б. И. Сажин. – Л.: Химия, 1986. – 224 с.
134. Саундерс, Дж. Х. Химия полиуретанов / Дж. Х. Саундерс, К. К. Фриш. – М.: Химия, 1968. – 470 с.
135. Семчиков, Ю. Д. Высокомолекулярные соединения: учеб. Для вузов / Ю. Д. Семчиков. – Н. Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского; М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 368 с.
136. Свойства математических моделей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/3001845/page:2/>
137. 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.
138. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров: монография / А. А. Тагер. – Изд. 4-е изд., перераб. И доп. – М.: Научный мир, 2007. – 576 с.

139. Техника переработки пластмасс / под ред. Н. И. Басова, В. М. Броя – М.: Химия, 1985. – 347 с.
140. Трофимов, Н. В. Автоматизированная система управления процессом высокочастотной сварки изделий из пластмасс сложной формы / Н. В. Трофимов, Ю. П. Юленец, А. В. Марков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 7 – С. 1-6.
141. Трофимов, Н. В. Высокочастотная сварка деталей из пластмасс в изделиях сложной формы / Н. В. Трофимов, Ю. П. Юленец, А. В. Марков // Сварочное производство, 2009. – № 8. – С. 28-31.
142. Трофимов, Н. В. Математическая модель оптимального режима высокочастотной сварки пластмасс / Н. В. Трофимов, А. В. Марков // Материалы XXII Международ. Науч. Конф. «Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-21)». – Т.10. – Псков: Псковский гос. политехн. институт, 2009. – С. 71-73.
143. Трофимов, Н. В. Управление режимом высокочастотной сварки изделий из пластмасс сложной формы: дис. ... кан. тех. наук 05.13.06: защищена 2011 / Трофимов Николай Валентинович. – СПб: 2011. – 112 с.
144. Термопласты конструкционного назначения / Под ред. Е. Б. Тростянской. – М.: Химия, 1975. – 240 с.
145. Установка для сварки пластмасс / Завод «Промышленная электроника Габрово» // Паспорт УЗП 2500А, 412. 921.055, 1987. – 60 с.
146. Фадина, Ю. И. Анализ российского рынка полимеров и дальнейшие пути его развития / Ю. И. Фадина // Бизнес-образование в экономике знаний. – Иркутск: ИГУ, 2017. - №1. – С. 99-101.
147. Федоров, А. Л. Износостойкие композиты на основе ПТФЭ, полученные модифицированием моторными маслами / А. Л. Федоров, П. Н. Петрова // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: СамНЦ РАН, 2011. Т. 13. №1(2). – С. 404-406.
148. Федорова, И. Г. ВЧ-сварка пластмасс / И. Г. Федорова, Ф. В. Бензменов. – М.: Машиностроение, 1980. – 234 с.

149. Филиппенко, Н. Г. Автоматизация высокочастотной термообработки полимерных материалов / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, А. Я. Машович // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. – Иркутск: ИрГТУ, 2011. – Вып.12(59). – С. 357-362.
150. Филиппенко, Н. Г. Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 адаптивным методом. Использование автоматизированной установки в лабораторных целях / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, А. Я. Машович // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2011. - № 2(30). – С. 193-198.
151. Филиппенко, Н. Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов: дис. ... кан. тех. наук 05.13.06: защищена 2012 / Филиппенко Николай Григорьевич. – Иркутск: 2012. – 161 с.
152. Филиппенко, Н. Г. Автоматизированная система управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. - №4(32). – С. 50-55.
153. Филиппенко, Н. Г. Адаптивное управление высокочастотным нагревом / Н. Г. Филиппенко, А. Г. Ларченко, С. И. Попов, А. В. Лившиц // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. Трудов. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – С. 155-163.
154. Филиппенко, Н.Г. Контроль и управление высокочастотной электротермией. Новые аспекты: монография / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, С. К. Каргапольцев // LAP Academic Publishing AV Akademikerverlang GmbH & Co. KG Heintz-Böcking-Str.6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2013. 157 с.
155. Филиппенко, Н. Г. Определение эффективных режимов электротермической сушки полимерных материалов / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, А. Я. Машович // Известия ВУЗов Прикладная химия и биотехнология. – Иркутск: ИрНИТУ, 2013. – С. 82-88.

156. Филиппенко, Н. Г. Система управления и блок устройства автоматизации высокочастотной обработки полимерных материалов [Электронный ресурс] / Н. Г. Филиппенко, С. К. Каргапольцев, А. В. Лившиц // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011».: доклад международной конференции. – 2011. – Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/transportation-411/maintenance-and-repair-of-transportation-411/11637-411-0277>
157. Филиппенко, Н. Г. Физико-технические процессы в технологических операциях термической, механической, высокочастотной и ультразвуковой обработки полимерных и композитных конструкционных материалов: монография / Н. Г. Филиппенко, Д. В. Буторин, С. К. Каргапольцев, А. В. Лившиц; под общ. ред. С. К. Каргапольцева. – Иркутск: ИрГУПС, 2017. – 256 с.
158. Циркина, О. Г. Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения эффективности технологий отделки текстиля с использованием поля токов высокой частоты: дис. ... док. тех. наук 05.19.02: защищена 2015 / Циркина Ольга Германовна. – Иваново: 2015. – 418 с.
159. Чалых, А. Е. Диффузия в полимерных системах / А. Е. Чалых. – М.: Химия, 1987. – 312 с.
160. Штарке, Лотар. Использование промышленных и бытовых отходов пластмасс / Л. Штарке; Перевод с нем. В. В. Михайлова; Под ред. В. А. Брагинского. – Л.: Издательство «Химия», Ленинградское отделение, 1987. – 175 с.
161. Юленец Ю. П. Автоматизация процессов термической обработки дисперсных материалов при высокочастотном нагреве. – дис. ... докт. техн. наук. – СПб: СПбГТИ(ТУ), 1999. – 460 с.
162. Юленец, Ю. П. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь и влагосодержания по параметрам электрического режима установки высокочастотного нагрева / Ю. П. Юленец, А. В. Марков // Известия вузов. – Приборостроение, 1997. – Т.40, – №5. – С. 60–65.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программный модуль обеспечения исследования взаимосвязи параметров высокочастотного электротермического оборудования и электрофизических параметров полимеров

```
#include <PID_v1.h>
const int payPin = 8; // выход 8 – нагреватель
const int tempPin = 5; // вход 5 – термопара
const int cPin = 2; // вход 2 – емкость настроенного конденсатора
const int uPin = 3; // вход 3 – напряжение на рабочем конденсаторе
const int pPin = 4; // вход 4 – потребляемая мощность
const int nemoPin = 1; // вход 1 – свободный канал
const char tab = '\t';
const int iPin = 0; // вход 0 – анодный ток
const int curPin = 13; // выход 13 – включение высокочастотного генератора
const int temp_v = 3000; // время работы генератора для вывода параметров
// оборудования, мс
int mill_0, mill_1, flag=0, j;
int step1=10; // шаг изменения температуры
int tstop=10000; // время выдержки при постоянной температуре, мс

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,0.8,3,0, DIRECT);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(payPin, OUTPUT);
  pinMode(curPin, OUTPUT);
  // начальная температура разогрева
  Setpoint = ((analogRead(tempPin)* (5.000 / 1023.000) * 102.54 - 54.983)+10)/10;
  j=Setpoint;
```

```

Setpoint=j*10;
// текущая температура в °C
Input = analogRead(tempPin)* (5.000 / 1023.000) * 102.54 - 54.983;

myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetOutputLimits(0, Setpoint*0.14);
myPID.SetSampleTime(1000);
}

void loop()
{
// ВЫВОД стабилизируемого уровня температуры
Serial.print(Setpoint); Serial.print(tab);
// текущая температура в °C
Input = analogRead(tempPin)* (5.000 / 1023.000) * 102.54 - 54.983;
Serial.print(Input); Serial.print(tab);
Serial.print(analogRead(iPin)); Serial.print(tab);
Serial.print(analogRead(cPin) * (5.000 / 1023.000)); Serial.print( tab );
Serial.print(analogRead(uPin) * (5.000 / 1023.000)); Serial.print( tab );
Serial.print(analogRead(pPin) * (5.000 / 1023.000)); Serial.print( tab );
Serial.print(analogRead(nemoPin) * (5.000 / 1023.000)); Serial.print( tab );
Serial.print(k); Serial.print(tab);
if ((flag==0) && (abs(Input-Setpoint)<0.3))
{
mill_0=millis();
flag=1;
}
myPID.Compute();
Serial.println(Output);

i= Output;

```

```
i *= 10;
digitalWrite(payPin,HIGH);
delay(i);
digitalWrite(payPin,LOW);
delay(1000 - i);

mill_1=millis();
if ((flag==1) && (abs(mill_1-mill_0) > tstop))
{
    digitalWrite (curPin, HIGH);
    flag=2;
}
if ((flag==2) && (abs(mill_1-mill_0) > tstop+temp_v))
{
    flag=0;
    digitalWrite (curPin, LOW);
    Setpoint=Setpoint+step1;
    myPID.SetOutputLimits(0, Setpoint*0.14);
}
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015614766

Программный модуль обеспечения исследования
взаимосвязи параметров высокочастотного
электротермического оборудования и электрофизических
параметров полимеров

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Иркутский государственный университет путей
сообщения» (ФГБОУ ВПО ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015611613

Дата поступления 10 марта 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 апреля 2015 г.

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



ПРИЛОЖЕНИЕ В

```
const char tab = '\t'; // символ-разделитель значений
const int payPin = 8; // нагреватель подключен к выходу 8
const int tempPin = 5; //термопара подключена к входу 5
const int iPin = 0; // Выводим анодный ток
.const int cPin = 2; // Выводим C
const int uPin = 3; // Выводим Ur
const int pPin = 4; // Выводим потребляемую мощность
const int nemoPin = 1; // канал неизвестный
const float delta = 0.1; // частота считывания температуры, сек
const int heat = 6; // скорость нагрева, °C/min
const float heatSpd = heat / 60 * delta; // скорость нагрева за время delta
const float heatSpd2 = heat / 60 * 10; // скорость нагрева за 10 секунд
const int curPin = 13; // Пин для анодного тока (включение генератора)

int deltaPower = 1; // скорость изменения ширины импульса
int maxHeat = 100; // максимальное значение ширины импульса (%)
int minHeat = 1; // минимальное значение ширины импульса
int seconds = 0; // секунд после начала работы
float tem = 0.000; // переменная для хранения текущего значения t
float temPrev = 0.000; // переменная для хранения значения t n секунд назад
float temTimeAgo = 0.000; // температура 10 секунд назад
int power = minHeat; // начальное значение для ШИМ
boolean allowCur = true; // вкл-выкл генератора (1 - вкл, 0 - выкл)
float iA = 0.00; //анодный ток
float c = 0.00; //напряжение на рабочем конденсаторе
float uR = 0.00; //напряжение настроечного конденсатора
float p = 0.00; //мощность нагрузки
float nemo = 0.00;
```

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(payPin, OUTPUT);    // установка порта на выход
  pinMode(curPin, OUTPUT);    // установка порта на выход

  // инициализация таймера 1
  cli();    // отключение глобальных прерываний
  TCCR1A = 0;    // TCCR1A регистр = 0
  TCCR1B = 0;    // то же для TCCR1B
  TCNT1 = 0;    // счетчик = 0
  // регистр сравнения
  OCR1A = (16000000 * delta) / (1024) - 1;
  // режим CTC
  TCCR1B |= (1 << WGM12);
  TCCR1B |= (1 << CS12) | (1 << CS10);
  // разрешить прерывание для сравнения
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
  sei();    // разрешение глобальных прерываний

  //for (int i = 0; i < 99; i++)
  //Serial.println("testing");

  Serial.print( "sec" ); // Выводим секунду после запуска
  Serial.print( tab );
  Serial.print( "power" ); // Выводим ширину импульса
  Serial.print( tab );
  Serial.print( "signal" ); // Выводим сигнал на реле
  Serial.print( tab );

```

```
Serial.print( "temp" ); // Выводим температуру
Serial.print( tab );
Serial.print( "Ia" ); // Выводим анодный ток
Serial.print( tab );
Serial.print( "C(mkF)" ); // Выводим C
Serial.print( tab );
Serial.print( "Ur" ); // Выводим Ur
Serial.print( tab );
Serial.println( "Pc" ); // Выводим потребляемую мощность
}

void loop()
{
    SetPWMWidth(power);
}

// ШИМ
void SetPWMWidth(int i) // i - ширина импульса в процентах
{
    i *= 20;
    digitalWrite(payPin,HIGH);
    delay(i);
    digitalWrite(payPin,LOW);
    delay(2000 - i);
}

//функция считывания температуры
void GetTemp()
{
    seconds += delta*10;
```

```

if ((seconds) % 20 == 0)
{
  iA = analogRead(A0);
  c = analogRead(A2);
  uR = analogRead(A3);
  p = analogRead(A4);
  nemo = analogRead(nemoPin);

  float diff = tem - temPrev;

  if (diff >= 0 && diff <= heatSpd)
    power += deltaPower;
  if (diff > heatSpd)
    power -= deltaPower * 5;
  power = max(power, minHeat); power = min(power,maxHeat);
  temPrev = tem;
  tem = analogRead( tempPin ); //Считываем входное значение с термопары
// Значение в градусах оС
  tem = tem * (5.000 / 1023.000) * 102.54 - 54.983;

  if (!(seconds%10) && seconds > 60) // каждые 10 секунд анализируем скорость
нагрева и подстраиваемся
  {
    float x = (tem - temTimeAgo) // heatSpd2;
    if ( x < 1 ) deltaPower += 1; //динамика добавления мощности
    temTimeAgo = tem;
  }
}
Serial.print( iA*(5.000/1023.000)); // Выводим анодный ток
Serial.print( tab );

```

```
Serial.print( nemo );  
  Serial.print( tab );
```

```
Serial.print( c * (5.000 / 1023.000));    // Выводим C  
  Serial.print( tab );
```

```
Serial.print( uR * (5.000 / 1023.000));    // Выводим Ur  
  Serial.print( tab );
```

```
Serial.print( p * (5.000 / 1023.000));    // Выводим потребляемую мощность  
  Serial.print( tab );
```

```
Serial.print( tem );    // Выводим температуру  
  Serial.print( tab );
```

```
Serial.println( seconds /10 );    // Выводим секунду после запуска  
  Serial.print( tab );
```

```
Serial.println( power );    // Выводим ширину импульса  
  Serial.print( tab );
```

```
Serial.print( digitalRead (curPin));    // Выводим температуру  
  Serial.print( tab );
```

```
if (seconds > 1)  
{  
  if (allowCur && seconds % 120 == 0)  
  {  
    digitalWrite (curPin, HIGH);
```

```
    allowCur = !allowCur;
}
else if (!allowCur && (seconds - 40) % 120 == 0) // время контроля анодного
тока
{
    digitalWrite (curPin, LOW);
    allowCur = !allowCur;
}
}
}
// прерывание таймера 1
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    GetTemp();
}
```


ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2625630

Способ определения границ фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *Буторин Денис Витальевич (RU), Филиппенко Николай Григорьевич (RU), Лившиц Александр Валерьевич (RU), Каргапольцев Сергей Константинович (RU)*

Заявка № 2016126731

Приоритет изобретения 04 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 17 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 04 июля 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Е



28.05.2018 г.

АКТ

внедрения автоматизированных установок для горячего тиснения, сварки соединений крышка-обложки школьно-письменной и бумажно-беловой продукции и сушки фотополимерных форм

Мы, нижеподписавшиеся, зам. директора по производству Бухаров П.О., начальник цеха Чернова О.В., и.о. главного технолога Чернова Л.А., составили настоящий акт в том, что в период с 15.09.2017 г. – 20.05.2018 г. сотрудниками ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ИрГУПС) в составе:

д.т.н., доцент, проректор по научной работе А.В. Лившиц,
 к.т.н., доцент, доцент каф. АПП Н.Г. Филиппенко,
 соискатель Д.В. Буторин,

выполнен комплекс работ по проектированию, запуску и наладке технологического процесса, изготовления полимерных форм для высокой печати и горячего тиснения, прессового соединения (сварки) продукции из поливинилхлоридных материалов (ПВХ) и бесшовного склеивания корешков блоков клеевыми полиуретановыми материалами.

В результате проведенных работ введены в действие и модифицированы автоматизированные системы управления высокочастотных установок прессовой ВЧ-сварки соединений обложка-вкладка школьно-письменной и бумажно-беловой продукции (изделия Арт31-2, Арт25-1, Арт23-1, Арт14-4 из ПВХ, толщиной 0,25 мм, ГОСТ 14332-78; изделия Арт29-3, Арт18-1, Арт13-2. установки для нагрева клеевого сырья из полиуретана, фракции 2,5 - 3мм, ГОСТ 14896-84) и сушки фотополимерных форм акцидентных работ для структурного подразделения Центра корпоративного учета и отчетности "Желдоручет" ОАО РЖД на оборудовании высокой печати (ПС-1М, ПС-1).

Высокочастотная установка на базе генератора УЗП-2500А снабжена автоматизированной системой управления и технологическими приспособлениями для сварки изделий Арт31-2 (производительность до 900 шт./смену), Арт25-1 (производительность до 1380 шт./смену), Арт29-3 (производительность до 1000 шт./смену), Арт18-1 (производительность до 950 шт./смену).

Установки на базе генератора УЗП-6000 снабжены автоматизированной системой управления для горячего тиснения изделий Арт23-1 (производительность до 840 шт./смену), Арт14-4 (производительность до 910 шт./смену), Арт13-2 (производительность до 1030 шт./смену) и сушки фотополимерных форм акцидентных работ для структурного подразделения Центра корпоративного учета и отчетности "Желдоручет" ОАО РЖД на оборудовании высокой печати (ПС-1М, ПС-1).

Все ВЧ-установки оснащены КИП и автоматизированы, при этом предусмотрено:

- автоматическое управление режимом сварки и нагрева с учетом изменяющихся диэлектрических свойств обрабатываемых материалов и смещения координаты точки максимального нагрева;
- автоматическое отключение нагрева без превышения температуры плавления;
- снижение мощности при возникновении предпробойного состояния;
- повышение мощности при нормальном протекании процесса;
- выдержка изделия под давлением по временной программе.

Внедрение автоматизированной системы управления с контролем фазового и релаксационных состояний полимера, автоматическим поддержанием координаты точки максимального нагрева и температуры, необходимой для сварки и тиснения, обеспечивает качественную обработку полимерных материалов и за счет контроля релаксационных состояний приводит к значительному снижению брака продукции с 5% до 1%.

Все вышеперечисленные мероприятия позволили увеличить межремонтный период дорогостоящей штамповой оснастки.

Годовой экономический эффект от внедрения автоматизированной системы управления составляет 1 026 539 руб.

Зам. директора
по производству

И.о. главного технолога

Начальник цеха
Главный бухгалтер



Бухаров

Чернова

Захаренкова

Бухаров П.О.

Чернова Л.А.

Чернова О.В.

Захаренкова Т.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО ИрГУПС

/Каргапольцев С.К.

« 25 » июня 2018 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов
диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме «Автоматизация управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов разной степени полярности», выполненной по направлению подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника, направленности подготовки 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) на кафедре Автоматизация производственных процессов, внедрены в учебный процесс кафедры Автоматизация производственных процессов на основании заседания кафедры Автоматизация производственных процессов ФГБОУ ВО ИрГУПС, протокол № 10 от «01» июня 2018 г.

Результаты диссертационного исследования включены 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).

Проректор по учебной работе

 /Куценко С.М.
« 25 » июня 2018 г.

Начальник отдела
организации учебного процесса

 /Исакова И.А.
« 25 » июня 2018 г.

Заведующий кафедрой
Автоматизация производственных процессов

 /Лившиц А.В.
« 25 » июня 2018 г.

Соискатель ученой степени

 /Буторин Д.В.
« 25 » июня 2018 г.