

УДК 004.312.46

DOI 10.17513/snt.40091

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТАНОВКИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

<sup>1</sup>Яценко В.М., <sup>2</sup>Константинов И.С., <sup>3</sup>Федоров В.И., <sup>4</sup>Маматов А.В.

<sup>1</sup>ООО «ЭЛСИС БелГУ», Белгород, e-mail: yatsenko\_vm@bsu.edu.ru;

<sup>2</sup>БГТУ им. В. Г. Шухова, Белгород, e-mail: konstantinovi@mail.ru;

<sup>3</sup>НИУ «БелГУ», Белгород, e-mail: fedorov\_v@bsu.edu.ru;

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», Йошкар-Ола,  
e-mail: mamatovav@marsu.ru

Целью данного исследования является совершенствование процесса проведения научных исследований режимов микродугового оксидирования за счет разработки специализированного программного обеспечения. Проведен анализ существующего оборудования для микродугового оксидирования, который показал его малую ориентированность для накопления информации о процессе и использовании его в научных исследованиях. Авторами были сформулированы основные требования к программному обеспечению автоматизированной системы научных исследований микродугового оксидирования, которые можно разделить на три основные группы: общесистемные, пользовательские и функциональные. Проведен анализ функциональных требований к программному обеспечению установок микродугового оксидирования, используемых для сопровождения научных исследований. Предложена структура программного обеспечения автоматизированной системы научных исследований технологического процесса микродугового оксидирования. Приведен пример синтеза автоматизированной системы научных исследований технологического процесса микродугового оксидирования, построенной на базе тиристорно-конденсаторного технологического источника тока. В соответствии с предложенной структурой было создано программное обеспечение автоматизированной системы научных исследований микродугового оксидирования. Показаны результаты работы разработанного программного обеспечения, отдельные экранные формы интерфейса автоматизированного рабочего места исследователя. Таким образом, в статье предложен подход к созданию программного обеспечения автоматизированной системы научных исследований технологического процесса микродугового оксидирования, которое в значительной степени позволяет сократить ресурсы и повысить эффективность и качество проведения исследований, что подтверждено примером реализации системы.

**Ключевые слова:** микродуговое оксидирование, автоматизированная система научных исследований, база данных, программное обеспечение, интерфейс автоматизированного рабочего места

## MICRO-ARC OXIDATION INSTALLATION SOFTWARE TO SUPPORT SCIENTIFIC RESEARCH

<sup>1</sup>Yatsenko V.M., <sup>2</sup>Konstantinov I.S., <sup>3</sup>Fedorov V.I., <sup>4</sup>Mamatov A.V.

<sup>1</sup>LLC «ELISIS BELGU», Belgorod, e-mail: yatsenko\_vm@bsu.edu.ru;

<sup>2</sup>BSTU im. V. G. Shukhov, Belgorod, e-mail: konstantinovi@mail.ru;

<sup>3</sup>NRU «BelSU» Belgorod, e-mail: fedorov\_v@bsu.edu.ru;

<sup>4</sup>Mari State University, Ioshkar-Ola, e-mail: mamatovav@marsu.ru

The purpose of this research is to improve the process of conducting scientific research on microarc oxidation modes through the development of specialized software. An analysis of existing equipment for microarc oxidation was carried out, which showed that it is poorly suited for accumulating information about the process and its use in scientific research. The authors formulated the basic requirements for the software of an automated system for scientific research of micro-arc oxidation, which can be divided into three main groups: system-wide, user and functional. An analysis of the functional requirements for software of micro-arc oxidation installations used to support scientific research was carried out. The structure of the software for an automated system for scientific research of the technological process of micro-arc oxidation is proposed. An example of the synthesis of an automated system for scientific research of the technological process of micro-arc oxidation, built on the basis of a thyristor-capacitor technological current source, is given. In accordance with the proposed structure, software for an automated system for scientific research of microarc oxidation was created. The results of the work of the developed software and individual screen forms of the interface of the researcher's automated workstation are shown. Thus, the article proposes an approach to creating software for an automated system for scientific research of the technological process of micro-arc oxidation, which significantly reduces resources and increases the efficiency and quality of research, which is confirmed by an example of the implementation of the system.

**Keywords:** microarc oxidation, automated research system, software, database, automated workplace interface

### Введение

Развитие способа микродугового оксидирования (МДО) вентильных металлов сегодня ведется в таких направлениях, как по-

иск состава электролитов для формирования требуемых покрытий, поиск моделей описания физико-химических превращений компонент электролита и обрабатываемого

материала в фазе микродуг, поиск решения задач стабилизации параметров процесса обработки в электролитической ванне, поиск новых факторов влияния на свойства покрытий, таких как электромагнитные поля, давление и др.

В области развития и совершенствования электрической составляющей режима обработки продолжает изучаться влияние различных режимов на свойства покрытий, а также совершенствуются подходы к синтезу параметров режимов. Выполняются исследования влияния формы тока и напряжения, частоты и периодичности следования импульсов, последовательности режимов обработки, стабилизации параметров режимов в процессе обработки. Параллельно идет процесс развития систем измерения параметров покрытия в процессе обработки, базирующихся на косвенных измерениях электрических и неэлектрических параметров. В описывающие процесс формирования покрытий модели включают все большее число дополнительных параметров: оптических, спектральных, температурных, параметров проводимости электролита и т.д.

Таким образом, требования, предъявляемые к современному оборудованию и его программному обеспечению, предназначенному для сопровождения исследований, существенно отличаются от требований к промышленным установкам МДО. Особенно это проявляется в части информационного обеспечения, систем измерений параметров, систем обработки и анализа данных. Очевидна необходимость создания специального программного обеспечения (ПО) автоматизированной системы научных исследований (АСНИ), благодаря которой появляется возможность значительно повысить качество исследований и сократить затраты ресурсов на проведение исследований.

**Целью данного исследования** является совершенствование процесса проведения научных исследований режимов микродугового оксидирования за счет разработки специализированного программного обеспечения.

#### **Материалы и методы исследования**

При анализе оборудования для МДО различных производителей и публикуемых материалов авторов, создающих исследовательские установки в рамках своих научных работ, можно отметить, что функциональные возможности оборудования направлены в первую очередь на реализацию технологии нанесения покрытия и форми-

рование режимов обработки, и в меньшей степени подходят для накопления и анализа экспериментальных данных, выявления характерных связей, выполнения синтеза и исследования применимости математических моделей.

Анализ позволил выделить следующие тенденции в области развития способа формирования покрытий с помощью МДО:

- смещение исследований в область изучения влияния сложных форм тока и напряжения в электрических импульсах обработки [1, 2],

- изучение влияния режимов с чередованием импульсов различной формы и режимов с различной частотой импульсов [3];

- изучение возможности стабилизации параметров режимов обработки [4, 5];

- развитие способа косвенных измерений параметров покрытий в процессе обработки [6, 7];

- поиск новых математических моделей, учитывающих большее число управляемых факторов, а также приемов и способов компенсации неучитываемых факторов [8];

- развитие систем поддержки принятия решений для определения режимов обработки при разработке нового оборудования и модернизации существующего [9, 10].

В ходе анализа процессов исследования МДО можно сделать вывод, что развитие способа МДО происходит в направлениях совершенствования методов и подходов к синтезу режимов обработки и создания интеллектуальных систем прогнозирования свойств покрытий. Это, в свою очередь, определяет необходимость создания систем, обеспечивающих процесс научных исследований с разработкой специального ПО.

Авторами были сформулированы основные требования к ПО АСНИ МДО, которые можно разделить на три основные группы: общесистемные, пользовательские и функциональные.

1. К общесистемным требованиям относятся:

- наличие возможности сбора, накопления и обработки экспериментальных данных;

- возможность ввода и хранения данных, полученных от внешних систем и введенных вручную;

- возможность синтеза и оценки математических моделей процесса МДО;

- возможность генерации версии ПО для работы с конкретным типом оборудования МДО.

2. Пользовательские требования к интерфейсу:

- возможность разграничения прав доступа пользователей;

- возможность составления рецептов обработки (последовательности режимов);
- возможность отображения данных в текстовой и графической формах;
- наличие шаблонов настроек режимов и рецептов;

- обеспечение возможности доступа к базе моделей технологического процесса МДО и внесения новых моделей;

- наличие удаленного доступа к системе.

### 3. Основные функциональные требования:

- измерение и отображение интегральных значений напряжения и тока, проходящих через систему «электролит – деталь», температуры электролита и других параметров, а также профиля напряжения и тока за период единичного импульса обработки;
- прогнозирование свойств покрытий на основании косвенных измерений;

- контроль за процессом формирования покрытия, позволяющий детектировать возникновение основных технологических проблем (срыв обрабатываемой детали, травмирование детали, отсутствие зажигания микроразрядов, угасание микроразрядов, возникновение дуговых разрядов и др.);

- сохранение в БД информации о правах доступа, рецептах обработки (последовательности режимов), режимах обработки, регистрируемых параметрах процесса обработки, качестве полученных покрытий и математических моделях, описывающих косвенные измерения и связи между параметрами режимов обработки и свойствами покрытий;

- обеспечение безопасности персонала и защиты от выхода из строя оборудования (ввиду возможности появления напряжений на оборудовании более 1 кВ).

Для выполнения указанных требований при разработке АСНИ МДО необходимо разработать аппаратную и программную части системы. Пример разработки аппаратной части системы был описан в других статьях авторов [11, 12].

Разработка программной части начинается с процедуры синтеза структуры программного обеспечения.

На схеме (рис. 1) представлена структура ПО АСНИ МДО, которая соответствует перечню сформулированных задач.

### Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с предложенной структурой было создано программное обеспечение АСНИ МДО. Аппаратная часть системы была реализована в виде технологического источника тока с силовым регулятором, выполненным по тиристорно-конденсаторной схеме [13]. При создании ПО было разделе-

но на технологическую и информационную части. В качестве модели, по которой строится программное обеспечение, выбрана событийно-ориентированная модель.

Технологическая часть функционирует на специальном модульном контроллере (разработан специально для данной системы) под управлением операционной системы (ОС) реального времени ChibiOS, входящем в состав технологического источника тока (ТИТ). Применение специального контроллера с ОС реального времени было обусловлено необходимостью выполнения следующих требований: гарантированное время реакции на события, высокая отказоустойчивость при управлении высоковольтным оборудованием, обеспечение высокой скорости регистрации электрических параметров, управление формой импульсов обработки.

Информационная часть ПО функционирует в ОС Windows на ПК в виде автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора. Выполнение АРМ в виде программы для ПК открывает возможности дальнейшего развития ПО за счет совершенствования и добавления информационно-управляющих подсистем.

Так, например, в состав ПО включен модуль слежения за параметрами процесса МДО на базе нейронной сети. Модуль позволяет вести наблюдение за свойствами формируемых покрытий на основании косвенных измерений [6].

ПО АРМ написано на языке Java (среда разработки – NetBeans IDE). Система хранения данных построена на базе SQL-сервера (MySQL) и обеспечивает принцип открытости в части обмена данными.

АРМ оператора обеспечивает следующие функциональные возможности:

- различные права доступа персонала;
- вывод информации о происходящих процессах в удобной графической и текстовой форме (графиков напряжений, токов, температур, графиков эюр тока/напряжения нагрузки, текущей схемы силового блока), о параметрах режима обработки, состоянии оборудования ТИТ и электромеханического узла и т.д.;

- создание, сохранение, редактирование, копирование, запуск на выполнение рецептов обработки;

- сохранение информации о пользователях, рецептах, режимах и полной информации о проведенных обработках в реляционной базе данных;

- просмотр информации в графическом и текстовом виде о выполненных обработках и применяемых рецептах с возможностями масштабирования.

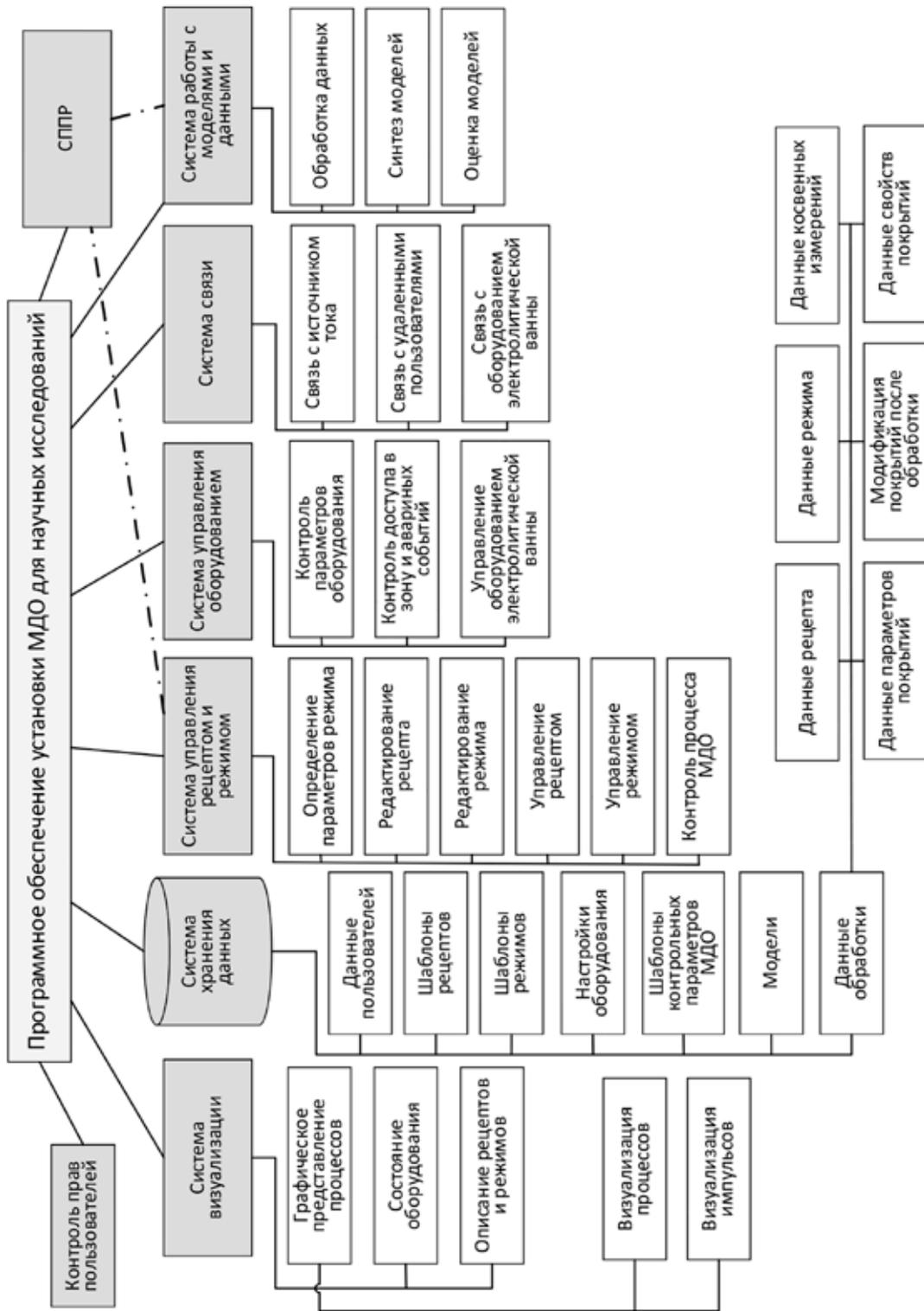


Рис. 1. Структура ПО установки МДО

Авторизация Данные Вывод

Тип Пользователя: Расширенный Пользователь | Имя пользователя: Сергей Сергей

Наименование процесса: DFG

Оператор: Сергей Сергей | Время старта процесса: | Время конца процесса: |

Комментарий: пробник D2\_40 мсб: Fri May 04 16:16:10 MSK 2018

Статус программы: Запущена | Удалить | Очистить | Сохранить

Загрузить | Сохранить

Деталь: поршень | Материал: Al26 | Площадь: 17.0 см2 | Коррекция:  (Была)

Электродит: новый

Время от старта: 0ч.59м.31с | Время до конца обработки: 1ч.36м.44с | V Ванны: 312.0 см3

Добавить режим | Удалить режим

Залусить | Прервать | Смена включения: 1

№ | Тип режима | Время обработки | Комментарий | Смена включения

1 | Строго конденсаторный | 9000.0 | Шаблон

Барбогаж:

Оплаждение:

Ванна: Тэл: 10.66926 | Топл: 536.4275 | Ролл: NAN | Рбарб: NAN | Че-ки: NAN

Деталь:  |

Мешалка:  |

Электродит:

Текущий: 11428.94 | Контроль: 200000.0 | Смена: 200000.0

Режим обработки: Строго конденсаторный

Создать как шаблон | Загрузить | Принять изменения

Параметры режима Исчислительные

Название	Значение	Ед. изм.
C2_Sat	40.0	мсЭ

Время выполнения: 9000.0 с | Осталось: 1ч.36м.42с | Прошло: 0ч.53м.17с

Время отключения 1: | 2: | 3: | Применить

Схема

Комментарий: Шаблон

Имя ле...	Текущее...	-1s	-10s	-60s
Uaa	554.1	555.0	558.9	553.8
Uam	354.0	354.2	355.2	352.8
Uas	398.2	398.7	399.6	397.3
Iaa	6.5	6.6	6.6	6.6
Iam	1.9	1.9	1.9	1.9
Iak	14.7	15.2	14.8	14.7
Uak	717.4	721.4	724.0	715.3
Uka	163.3	166.4	165.1	161.5
Ukm	101.0	102.6	101.4	101.1
Uks	113.2	114.8	113.8	113.1
Ika	8.1	8.5	8.2	8.1
Ikm	3.6	3.6	3.6	3.6
Iks	2.6	2.6	2.6	2.6
Iks	4.5	4.5	4.5	4.5
C1	0.0	0.0	0.0	0.0
C2	39.4	39.4	39.4	39.4

Рис. 2. Пример реализации экранной формы управления рецептом

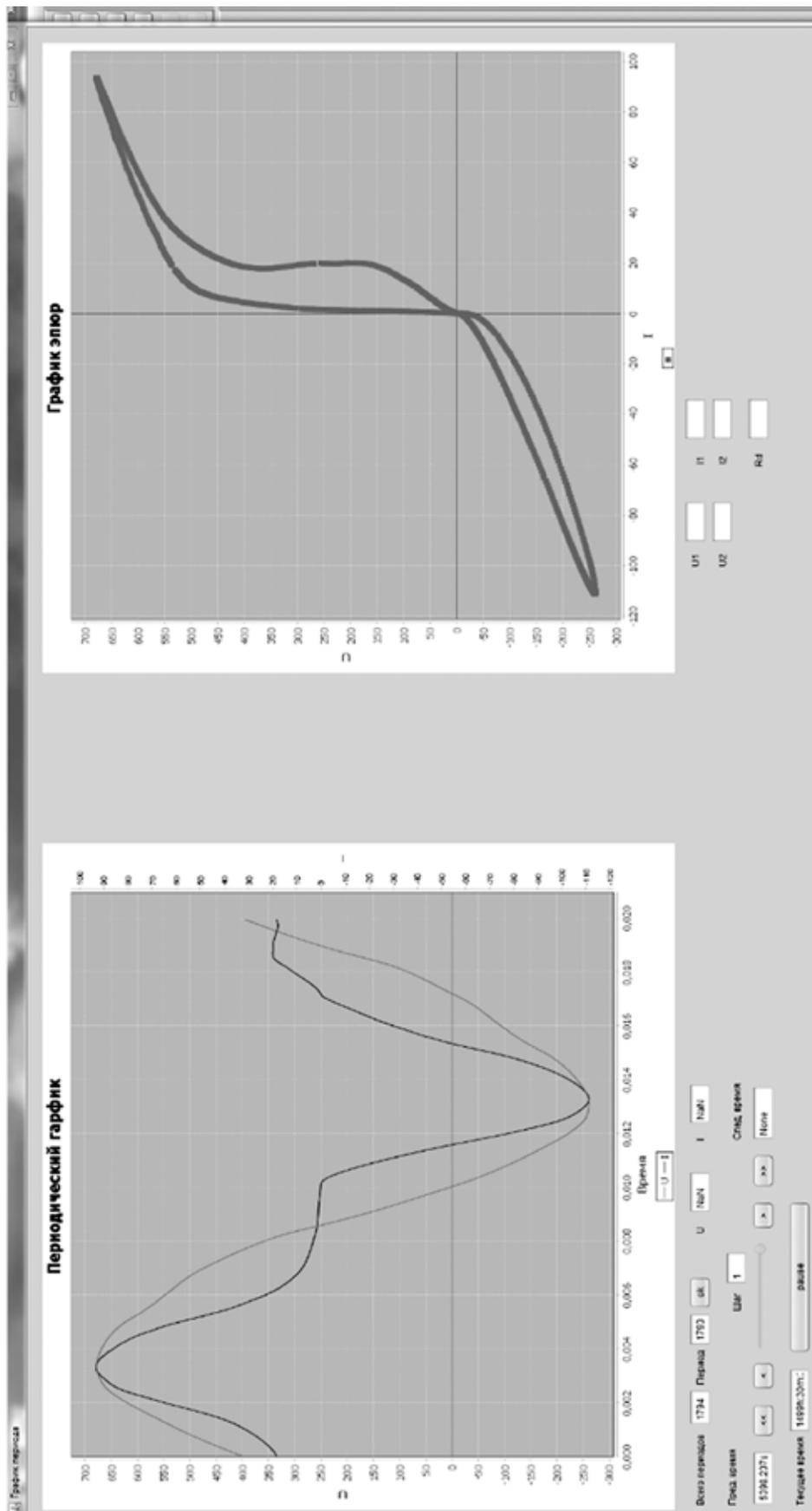


Рис. 3. Формы тока и напряжения системы «электролит – покрытие – деталь»

На рисунке 2 приведен пример начальной экранной формы, которая содержит информацию об операторе, времени проведения обработки, детали, материале и электролите, рецепте обработки, текущих параметрах нагрузки, текущей схеме силового преобразователя и режиме обработки с его параметрами, состоянии систем электрохимического узла электролитической ванны.

На отдельную экранную форму выводится информация в графической форме о процессах, протекающих в нагрузке за период импульса сетевого напряжения (рис. 3).

При проведении процесса обработки ПО АРМ выполняет отслеживание различных ситуаций, при которых необходимо произвести корректировку рецепта или прервать процесс обработки. С этой целью был реализован ряд алгоритмов слежения за параметрами процесса МДО с индикацией наступления события, а именно: превышения максимальных значений напряжения/тока, превышения максимального значения температуры электролита, превышения температуры контура охлаждения, недостаточного давления контура охлаждения, недостаточного давления в системе барботажа, недостаточной скорости потока воздуха в системе вентиляции, превышения количества электричества, прошедшего через электролит (выработка), угасания МДО-разряда, отсутствия зажигания МДО разряда, срыва детали, начала процесса травливания детали.

Контроль наступления указанных событий выполняется ПО АРМ, которое может в зависимости от настроек как останавливать процесс, так и игнорировать событие. Прерывание процесса обработки также может быть инициировано контроллером ТИТ с переходом его в новое состояние и уведомлением об этом событии АРМ.

### Заключение

На основании анализа процессов исследований в области микродугового оксидирования сформированы требования к программному обеспечению автоматизированной системы научных исследований МДО. Исходя из требований определены основные задачи ПО АСНИ. Для решения поставленных задач предложена обобщенная структура ПО, определены основные подсистемы и их функции. Представлен вариант реализации ПО АСНИ для тиристорно-конденсаторной установки МДО, приведен пример структуры БД и экранных форм.

Таким образом, в статье предложен подход к созданию ПО для АСНИ МДО, которая в значительной степени позволяет сократить ресурсы и повысить эффективность и качество проведения исследований, что подтверждено примером реализации системы.

### Список литературы

1. Голубков П.Е., Карпанин О.В. Автоматизированный лабораторный стенд для получения и исследования МДО-покрытий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2015. № 4(16). С. 35-39.
2. Голубков П.Е. Совершенствование средств измерений электрических параметров микродуговых оксидных покрытий: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2002. 163 с.
3. Дударева Н.Ю., Бутусов И.А., Кальщиков Р.В. Влияние режимов микродугового оксидирования на механические свойства образцов из алюминиевого сплава // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 4. С. 102-116.
4. Карпанин О.В., Сафонов А.В., Ометов С.Ю. Автоматизированная установка для микродугового оксидирования // Молодой ученый. 2015. № 9 (89). С. 247-251.
5. Бадаев Р.А., Карпин О.В., Таишев С.Р. Автоматизированная установка микродугового оксидирования // Материалы и технологии XXI века: сборник статей XIV Международной научно-технической конференции (Пенза, 28-29 марта 2016 г.). Пенза: Приволжский Дом знаний, 2016. С. 136-140.
6. Ломакин В.В., Зайцева Т.В., Путивцева Н.П., Яценко В.М., Пусная О.П. Реализация поддержки принятия решений в управлении процессом микродугового оксидирования на базе искусственных нейронных сетей // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2016. № 23(244). С. 124-133.
7. Печерская Е.А., Голубков П.Е., Мельников О.А., Печерский А.В., Макс А.А., Анисимова А.А. Анализ причин, влияющих на показатели качества покрытий, полученных методом микродугового оксидирования // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2 (62). С. 92-102.
8. Печерская Е.А., Голубков П.Е., Карпанин О.В., Козлов Г.В., Печерский А.В. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 2 (28). С. 107-112.
9. Степанов С.В., Карпанин О.В. Автоматизированный лабораторный стенд микродугового оксидирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. «Материаловедение». 2014. С. 153-157.
10. Фаткуллин А.Р., Парфенов Е.В. Автоматизация технологического процесса плазменно-электролитического оксидирования на основе косвенного контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам // Вестник УГАТУ. 2016. № 4 (74). С. 38-44.
11. Яценко В.М., Ломакин В.В. Синтез структурных и технических решений при проектировании установки микродугового оксидирования // Экономика. Информатика. 2023. № 50(2). С. 398-409.
12. Яценко В.М., Ломакин В.В. Распределенный алгоритм управления установкой микродугового оксидирования // Научный результат. Информационные технологии. 2023. № 4. С. 40-49.
13. Яценко В.М., Иванов М.Б., Храмов Г.В. Технологическая установка микродугового оксидирования // Общество с ограниченной ответственностью «Керамик тех» (ООО «Керамик тех»). 2019. Бюл. № 16.