

УДК 681.326.3
DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-2-398-409

Синтез структурных и технических решений при проектировании установки микродугового оксидирования

¹ Яценко В.М., ² Ломакин В.В.

¹ МИП ООО «ЭЛСИС БелГУ»,

Россия, 308034, г. Белгород, ул. Королева 2а, корпус 4, офис 103

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

E-mail: yatsenko_vm@bsu.edu.ru

Аннотация. В статье описывается процесс синтеза структурных и технических решений при создании технологической установки для проведения научных исследований в области микродугового оксидирования вентильных металлов. Определены критерии и рассмотрены решения при выборе типа технологического источника тока для создания исследовательской установки. Обоснованы требования к наличию нескольких реализуемых режимов обработки перечню измеряемых параметров процесса для обеспечения последующего синтеза математических моделей, связывающих свойства покрытий с измеряемыми параметрами и режимами обработки. Рассмотрены основные этапы создания установки: разработка функциональной схемы, формирование требований к программному и аппаратному обеспечению, синтез структуры установки, процесс принятия решений по необходимому функциональному обеспечению, декомпозиция решения с формированием требований к отдельным подсистемам и блокам. Приведены общая и структурная схемы установки, а также структура создаваемого аппаратного обеспечения технологического источника тока. Описаны отдельные создаваемые электронные модули и их ключевые особенности. Определены основные требования к необходимому быстродействию системы измерения параметров процесса и системе обеспечения безопасности персонала и оборудования.

Ключевые слова: структурные и технические решения при создании оборудования, микродуговое оксидирование, функциональные возможности, функциональные блоки, режимы микродугового оксидирования, параметры режимов микродугового оксидирования, свойства покрытий

Для цитирования: Яценко В.М., Ломакин В.В. 2023. Синтез структурных и технических решений при проектировании установки микродугового оксидирования. Экономика. Информатика, 50(2): 398–409. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-398-409

Synthesis of Structural and Technical Solutions in the Design of a Microarc Oxidation Plant

¹ Vladimir M. Yatsenko, ² Vladimir V. Lomakin

¹ SIE LLC "ELSYS BelGU",

2a Koroleva St, building 4, office 103, Belgorod, 308034, Russia

² Belgorod State National Research University,

85 Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russia

E-mail: yatsenko_vm@bsu.edu.ru

Abstract. The article describes the process of synthesis of structural and technical solutions when creating a technological installation for scientific research in the field of microarc oxidation of valve metals. Criteria are defined and decisions are considered when choosing the type of technological current source for creating a research facility. The requirements for the presence of several realizable processing modes, the list of measured process parameters to ensure the subsequent synthesis of mathematical models that relate the properties of coatings with the measured parameters and processing modes are substantiated. The main stages of installation creation are considered: development of a functional diagram, formation of requirements for software and hardware, synthesis of the installation structure, decision-making process on the necessary functional support, solution decomposition with the formation of requirements for individual subsystems and blocks. The general and structural diagrams of the installation, as well as the structure of the created hardware for the technological current source, are given. Separate created electronic modules and their key features are described. The basic requirements for the required speed of the system for measuring process parameters and the system for ensuring the safety of personnel and equipment are determined.

Keywords: structural and technical solutions in the creation of equipment, microarc oxidation, functionality, functional blocks, microarc oxidation modes, parameters of microarc oxidation modes, coating properties

For citation: Yatsenko V.M., Lomakin V.V. 2023. Synthesis of Structural and Technical Solutions in the Design of a Microarc Oxidation Plant. Economics. Information technologies, 50(2): 398–409 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-398-409

Введение

Процесс формирования многофункциональных покрытий на вентильных металлах с помощью МДО производится с использованием широкого спектра технологического оборудования, которое имеет существенно различные возможности как по режимам обработки, так и по возможностям измерения и управления процессом [Суминова, 2005]. При исследовании системных зависимостей между режимами обработки, параметрами режима обработки и свойствами покрытий необходимо специальное оборудование, обеспечивающее исследователя необходимыми возможностями в области реализации режимов обработки, а также получения, хранения и анализа экспериментальных данных.

Известны исследования [Герасимов, 2008, Голубков, 2015, Гринченков, 2011, Людин, 2008, Павленко, 2011], в которых создавались установки для изучения влияния параметров и режимов обработки на формируемые покрытия. Однако возможности описываемых установок достаточные для решения поставленных перед исследователями задач оказываются недостаточными для поиска более общих зависимостей. Для решения задачи по синтезу режимов и параметров обработки на основании требований к покрытиям, а также влиянию измеряемых параметров процесса на свойства покрытий требуется разработка специализированного оборудования с функциями измерения, накопления, анализа данных и синтеза моделей.

Рассмотрим основные этапы создания серийной установки, предназначенной для проведения научных исследований в области МДО, которая обладала бы следующим рядом ключевых особенностей: изменяемой схемой силовой части для исследования различных

технологических режимов, возможностью создания режимов обработки в виде рецептов (последовательностей режимов) с хранением их в БД, системой измерения параметров протекающего процесса с записью их в БД, аналитическими функциями программного обеспечения по выбору режимов обработки для получения заданных свойств покрытия [Асадулаев, 2017], функциями наблюдения за параметрами покрытия в процессе МДО системой автоматических защит и блокировок для безопасной работы персонала. В результате проектирования была синтезирована следующая функциональная схема установки (рисунок 1). Помимо основных элементов, присущих подобным установкам, предлагается включение следующих дополнительных подсистем:

- подсистемы выбора режима обработки, которые помогают оператору выбрать оптимальные параметры режима обработки;
- подсистемы наблюдения за параметрами покрытия, которые предоставляют оператору информацию о свойствах покрытия в процессе обработки;
- подсистемы слежения, которые выполняют мониторинг работы подсистемы косвенных измерений [Фаткуллин, 2016] и подсистемы выбора режимов обработки, позволяет выполнить их настройку.



Рис. 1. Функциональная схема установки МДО для научных исследований
 Fig. 1. Functional diagram of the MAO facility for scientific research

Установка МДО состоит из технологического источника тока (ТИТ), в котором происходит формирование электрических импульсов специальной формы; электролитической ванны, в которой происходит процесс МДО; электромеханического узла, в котором обеспечиваются условия протекания процесса; автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора, который выполнен на базе персонального компьютера (ПК) с предустановленным программным обеспечением (ПО). Была выбрана система управления установкой состоящая из двух взаимосвязанных частей: одна – на базе контроллера управления технологическим источником тока и вторая – на базе персонального компьютера (АРМ оператора). При этом были приняты во внимание следующие сильные стороны каждой из систем:

- оперативное управление силовыми цепями установки и измерения необходимо выполнять с максимальной надежностью, без задержек (в реальном масштабе времени) что подразумевает использование специализированного контроллера с операционной системой реального времени;

– гибкие возможности персонального компьютера, такие как: привычный интерфейс ПК, организация БД с существенными объемами данных и обеспечении доступа к ней и ее целостности на уровне ПО ПК на базе специализированной СУБД, возможности представления и преобразования информации (графики, таблицы, отчеты, обмен данными), наличие специальных программ для работы с нейронными сетями по обработке данных и синтезу моделей, гибкость в модернизации и расширении функциональных возможностей в последствии.

На рисунке 2 приведена общая схема установки. Вводное устройство выполняет функции включения-выключения, защиту входных цепей от перегрузок и короткого замыкания (КЗ). Дополнительно вводное устройство обеспечивает реализацию функций защиты персонала от поражения электрическим током. Преобразование электрического тока сети в требуемый для нагрузки электрический ток осуществляется в энергетических цепях ТИТ, в составе которых функционируют силовые полупроводниковые и электромеханические ключи, а также блоки силовых конденсаторов. Управление силовыми ключами и блоками конденсаторов осуществляется с помощью системы управления. Система управления обеспечивает оперативное управление энергетическими цепями ТИТ, контролируя состояние процессов преобразования энергии, происходящих в энергетических цепях с помощью измерительных цепей.



Рис. 2. Общая схема установки МДО
Fig. 2. General scheme of the MAO installation

Общее управление ТИТ выполняет система автоматизации. Система автоматизации обеспечивает управление оборудованием внешнего электромеханического узла, который формирует необходимые условия протекания процессов в нагрузке. Система автоматизации обеспечивает функционирование ТИТ на основе внешнего задания и информации, поступающей из системы мониторинга. Система мониторинга выполняет функции сбора и обработки информации датчиков протекания процесса, информации полученной от измерительных цепей и органов управления.

Система НМИ обеспечивает человеко-машинное взаимодействие с оператором, формирование управляющих команд в системе автоматизации, визуализацию процессов, протекающих в ТИТ, электромеханическом узле и нагрузке, а также хранение, обработку и отображение полученной в процессе работы информации. Система НМИ состоит из

специального программного обеспечения установленного на ПК оператора процесса и панели оператора установленной на двери ТИТ.

С целью повышения стабильности условий протекания процесса формирования покрытия в состав электромеханического узла установки были включены: система охлаждения электролита (змеевик), система гомогенизация раствора (лопастная мешалка, система барботажа), система вращения обрабатываемой детали.

Технологический источник тока

Технологический источник тока на практике определяет основные параметры и возможности установки МДО в части формирования режимов обработки [Печерская, 2019, Печерская, 2019, Пономарев, 2013] и измерение параметров процесса, а также определяет основную часть стоимости [Яценко, 2015]. При его выборе были рассмотрены варианты различных существующих решений (рис. 3). На первом этапе были определены кластеры критериев оценки, базирующиеся на функциональных возможностях (критериях). В результате анализа возможных альтернатив с учетом требований к необходимому функциональному обеспечению (возможность проведения научных исследований различных режимов, модернизации режимов, стабилизации режимов) было принято решение в качестве ТИТ использовать тиристорно-конденсаторную установку. Для системы мониторинга свойств покрытий, базирующейся на косвенных измерениях на основе информации о протекающих электрических процессах в нагрузке и температурных параметрах в ванне, были учтены требования к измерению формы напряжений и токов нагрузки [Голубков, 2022, Мамаев, 2005]. Это потребовало разработки специального быстродействующего высоковольтного блока измерений.

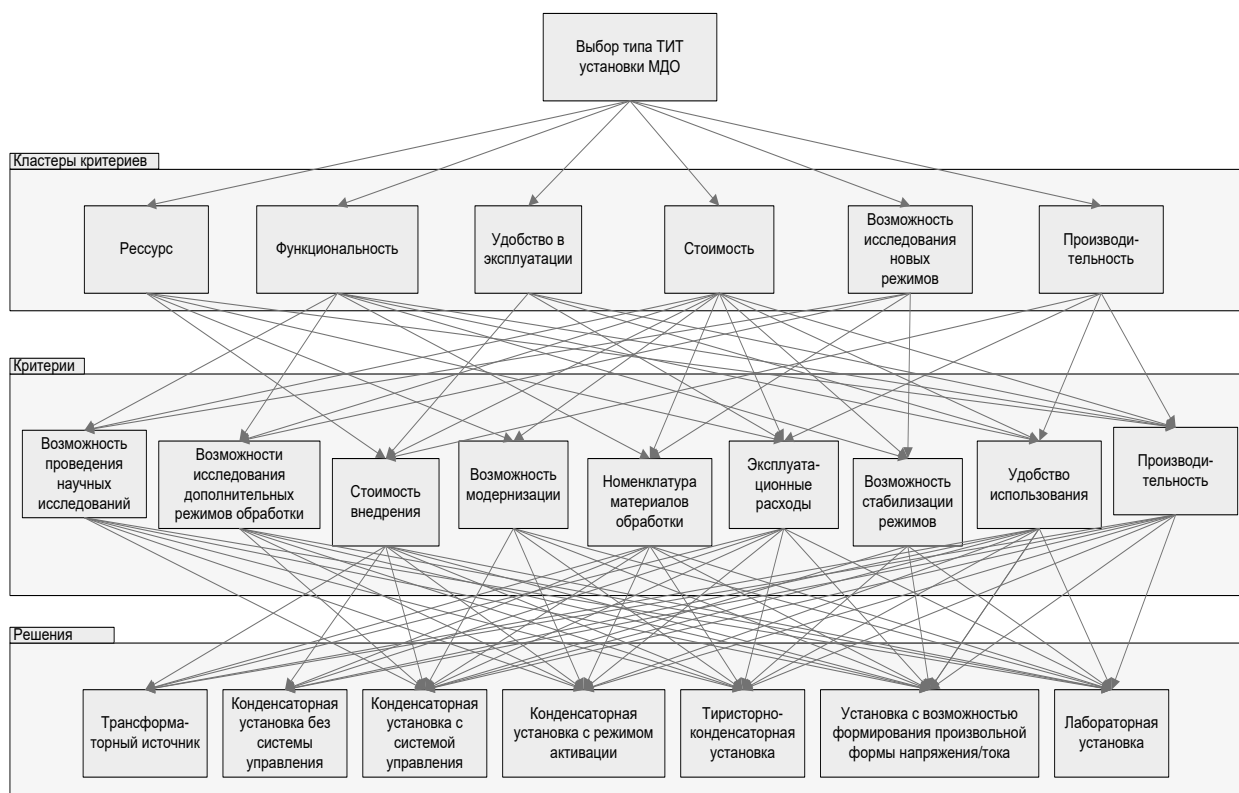


Рис. 3. Иерархия выбора ТИТ для установки МДО
 Fig. 3. Hierarchy of TIT selection for MAO installation

На структурной схеме (рис. 4) приведены основные функциональные блоки установки и связи между ними. Центральным элементом является блок управления. Он обеспечивает управление всеми элементами ТИТ (силовым преобразователем, блоком управления

тиристорами, блоками измерения электрических и не электрических параметров) и электромеханического узла, а также функционирование системы аварийных защит. Блок управления связан с ПК, на котором выполняется программа АРМ оператора.

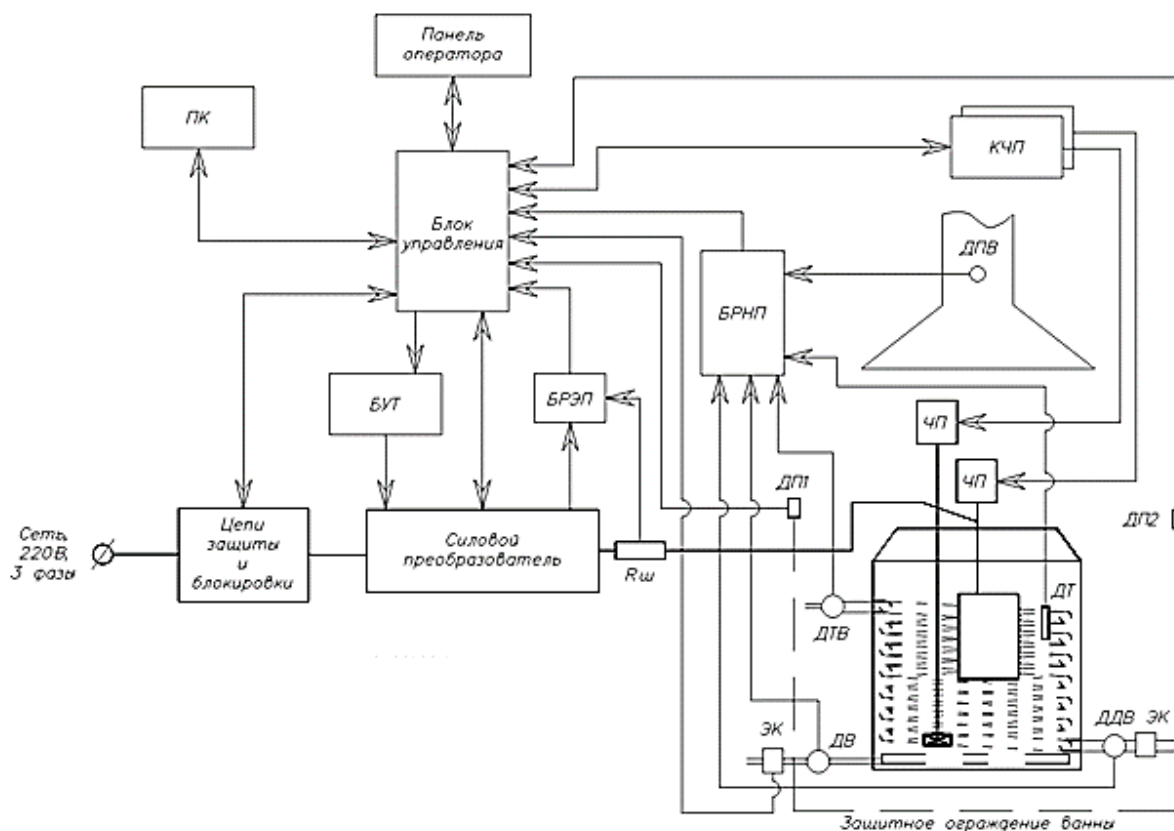


Рис. 4. Структурная схема установки МДО:

- ПК – персональный компьютер; БУТ – блок управления тиристорами;
- БРЭП – блок регистрации электрических параметров;
- БРНП – блок регистрации неэлектрических параметров; Rш – токовый шунт;
- КЧП – контроллер частотного привода; ДПВ – датчик потока воздуха;
- ЧП – частотный привод; ДП1, ДП2 – датчики доступа к ванне;
- ДТВ – датчик температуры системы охлаждения; ЭК – клапан системы барботажа;
- ДВ – датчик давления воздуха системы барботажа; ДТ – датчик температуры раствора;
- ДДВ – датчик давления системы охлаждения; ЭК – клапан системы охлаждения.

Fig. 4. Structural diagram of the MDO plant:

- PC – personal computer; BUT – thyristor control unit;
- BREP – electrical parameters recording unit; BRNP – non-electrical parameters recording unit;
- R-rod shunt; KChP – frequency drive controller; DPV – air flow sensor; FC – frequency drive;
- DP1, DP2 – bath access sensors; DTV – cooling system temperature sensor;
- EC – bubbling system valve; DV – bubbling system air pressure sensor;
- DT – solution temperature sensor; DDV – cooling system pressure sensor;
- EC – cooling system valve.

Силовая часть источника тока (рис. 5) была разработана с возможностью изменения структуры. Гибкие возможности изменения силовой структуры ТИТ с помощью магнитных пускателей и управление формой импульсов с помощью тиристоров обеспечивают возможность исследования различных режимов обработки (табл. 1), а также смену режима в процессе обработки с реализацией различных последовательностей и длительностей режимов (рецепты). Силовая схема установки позволяет также выполнять установку любых значений емкости конденсаторных батарей в диапазоне от 1,0 до 1250 мкФ с дискретностью 1,0 мкФ, а также выполнять балансировку и калибровку конденсаторов в батареях (С1 и С2) с

целью максимально точной установки заданной емкости и симметричности режима при обработке. Коммутация конденсаторов в батареях выполняется таким образом, чтобы максимально приблизить емкость батареи к заданной на основании реальных данных емкости каждого конденсатора батареи.

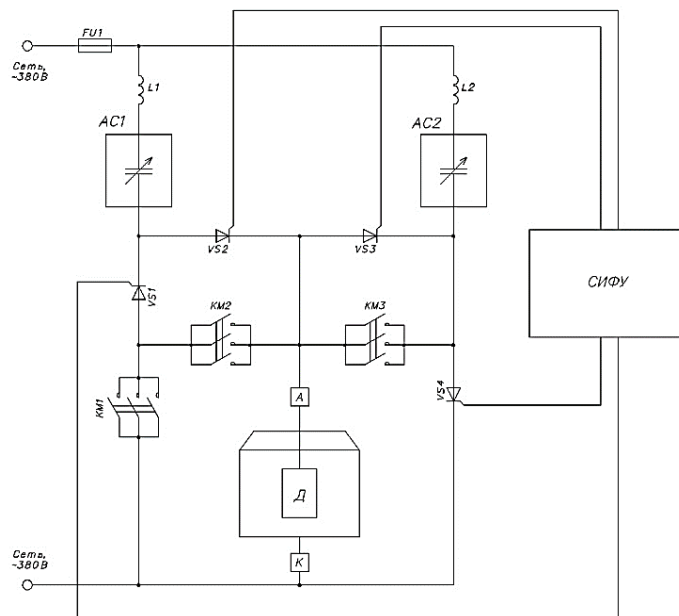


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема силовой части ТИТ
 (KM1-KM3 – электромагнитные пускатели;
 СИФУ – система импульсно-фазного управления; Д – деталь;
 VS1-VS4 – тиристоры; AC1-AC2 – батареи конденсаторов; L1-L2 – дроссели)
 А – анод (деталь), К – катод (ванна)
 Fig. 5. Electrical circuit diagram of the power part of the TIT
 (KM1-KM3 – electromagnetic starters; SIFU – pulse-phase control system;
 D – detail; VS1-VS4 – thyristors; AC1-AC2 – capacitor banks; L1-L2 – chokes)
 A – anode, K – catode (tank)

Таблица 1
 Table 1

Реализуемые режимы обработки и их возможности
 Implemented processing modes and their capabilities

Ре- жим	Форма импульсов	Управление фронтом	I_K/I_A	Частота, Гц
1	Обработка синусоидальными импульсами напряжения без регулирования фронтов и спадов при равных плотностях анодного и катодного токов. Среднее значение выходного тока зависит от емкости батареи конденсаторов. Частота следования импульсов напряжения составляет 50 Гц	нет	1	50, ~17
2	Обработка импульсами напряжения синусоидальной или пилообразной форм с регулируемыми фронтами анодных и/или катодных импульсов. Среднее значение анодного тока I_A зависит от емкости батареи C1, а катодного I_K – C2.	да	0 - ∞	~17
3	Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с регулируемыми фронтами (жесткостью режима) анодных и/или катодных импульсов. Среднее значение анодного тока I_A зависит от емкости батареи C1, а катодного I_K – C2.	да	0 - ∞	50

Окончание табл. 1
 End table 1

Ре-жим	Форма импульсов	Управление фронтом	I_K/I_A	Частота, Гц
4	Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с регулируемыми фронтами (жесткостью режима) анодных и/или катодных импульсов. Среднее значение анодного тока равно катодному и зависит от емкости батареи конденсаторов.	да	1	50
5	Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с возможностью наложения на них пилообразных импульсов, на их фронтах или спадах. Напряжение наложения регулируется контроллером. Среднее значение катодного тока определяется емкостью батареи C1, а анодного суммой емкостей C1 и C2.	да	< 1	50
6	Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с возможностью наложения на них пилообразных импульсов, на их фронтах. Напряжение наложения регулируется контроллером. Среднее значение анодного тока определяется емкостью батареи C1, а катодного суммой емкостей C1 и C2.	да	> 1	50
7	Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с регулируемыми спадами анодных и/или катодных импульсов. Среднее значение выходного тока зависит от емкости батареи C1.	да	1	50

Блок управления ТИТ

Блок управления ТИТ построен на базе собственного контроллера, разработанного специально для данной установки. Это обеспечило необходимые функции измерения и управления в режиме реального времени, а также позволило внедрить многоступенчатую систему защиты и блокировок (на уровне ТИТ). Контроллер состоит из центрального блока и отдельных функциональных модулей расширения, соединение между модулями выполнено информационной шиной I2C (рис. 6). Такая система может быть сконфигурирована под различное количество входов и выходов, иметь несколько блоков измерений и блоков управления тиристорами или транзисторами. Программное обеспечение контроллера защищено свидетельством на ПО [Яценко].

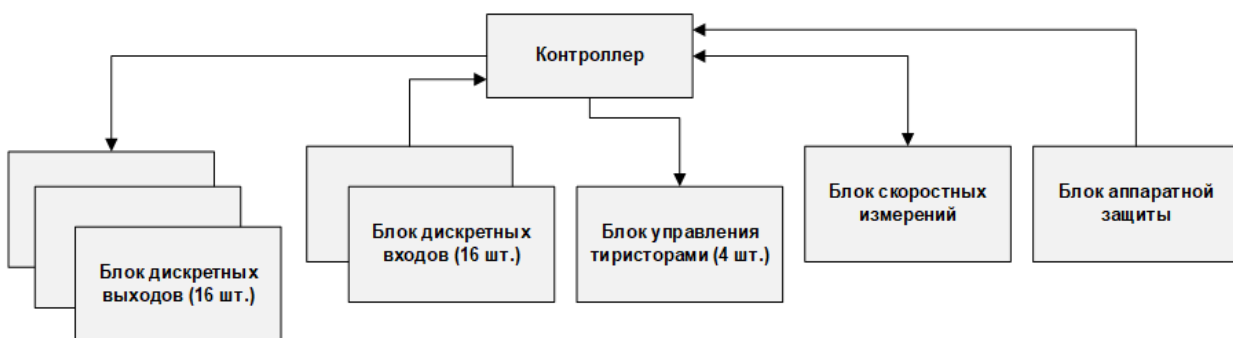


Рис. 6. Контроллер ТИТ с блоками расширения
 Fig. 6. TIT controller with expansion units

В составе установки блок контроллера непосредственно обеспечивает:

- взаимодействие по интерфейсу Ethernet с ПК, на котором выполняется АРМ оператора,
- взаимодействие с графической панелью оператора для отображения оперативных параметров процесса,
- управление силовыми коммутационными аппаратами через блоки дискретных выходов,
- регистрацию электрических параметров силовых цепей с помощью блока скоростных измерений,
- управление силовыми тиристорами,
- управление частотными приводами вращения детали и лопастной мешалки,
- управление световой и звуковой сигнализацией,
- взаимодействие с блоком аналоговых вводов для измерения температуры электролита и охлаждающей жидкости, давления охлаждающей жидкости, давления воздуха в системе барботажа и скорости потока воздуха в системе вытяжной вентиляции,
- управление клапанами барботера и охлаждающей жидкости,
- получение со счетчика электрической энергии информации о параметрах потребляемой электрической энергии и качестве питающего напряжения,
- детектирование аварийных и предупредительных событий с переключением оборудования в соответствующее контролируемое состояние.

Основной задачей при разработке систем управления и автоматизации ТИТ было обеспечение необходимой скорости регистрации электрических и физических параметров процесса МДО, а также достижение необходимого быстродействия в управлении силовой частью установки. Частота измерения электрических параметров для регистрации параметров микродуг и формы импульсов тока была выбрана 50 кГц, а время реакции на аварийные события не более 10 мкс. Также обеспечивается синхронность управления временем открытия тиристоров на уровне не хуже 25 мкс.

Особое внимание при разработке оборудования уделялось защите оборудования и персонала от поражения электрическим током (ввиду возможного напряжения порядка 1000 В), а также контролю выхода параметров в контролируемых цепях за допустимые пределы, для чего были предусмотрены и внедрены 5 различных контуров защиты оборудования:

1-й контур: логическая защита в ПО АРМ установки МДО (защита от включения установки без необходимых прав доступа оператора, защита от изменения рецептов обработки, защита при выходе параметров силовых цепей за допустимые границы, защита при выходе за допустимый диапазон напряжения питания, защита по выходу параметров процесса обработки за установленные границы);

2-й контур: логическая защита на базе контроллера ТИТ (проверка последовательности включения силовых элементов с контролем их состояния, непредвиденного появления напряжений на силовых элементах схемы, отсутствия необходимых напряжений в контрольных точках, превышения допустимых уровней напряжений и токов);

3-й контур: защита оборудования от несанкционированного доступа в процессе обработки (открытие дверей ТИТ или ограждения электромеханического узла во время обработки, открытия дверей шкафа ТИТ, потери связи между контроллером и ПК);

4-й контур: защита от несанкционированного появления опасного потенциала на электролитической ванне или на обрабатываемой детали;

5-й контур: аппаратная защита от превышения допустимых электрических параметров на компонентах силового оборудования (превышение тока в цепях конденсаторов и в основной силовой цепи, в цепях питания оборудования управления, возникновения импульсных перенапряжений и т.д.).

Ниже приводятся основные особенности разрабатываемых блоков.

Блок контроллера управления ТИТ. Обеспечивает обмен данными по интерфейсам Ethernet (с ПК) и RS-485 (с панелью оператора, со счетчиком электрической энергии, с блоками частотного привода, с блоком ввода аналоговых сигналов). Контроллер выполнен на базе микроконтроллера STM32F407. В качестве операционной системы реального времени была выбрана ChibiOS версии 2.6. Внешний вид контроллера со снятой крышкой приведен на рисунке 7. Высокое быстродействие контроллера позволяет регистрировать формы напряжения и тока питающей сети, нагрузки, конденсаторных батарей, формы напряжений и токов в силовом преобразователе (выполняется более 1000 измерений на одну волну сетевого

напряжения), а также управлять жесткостью режимов обработки за счет управления моментом включения силовых тиристоров в каждой полуволне сетевого напряжения.

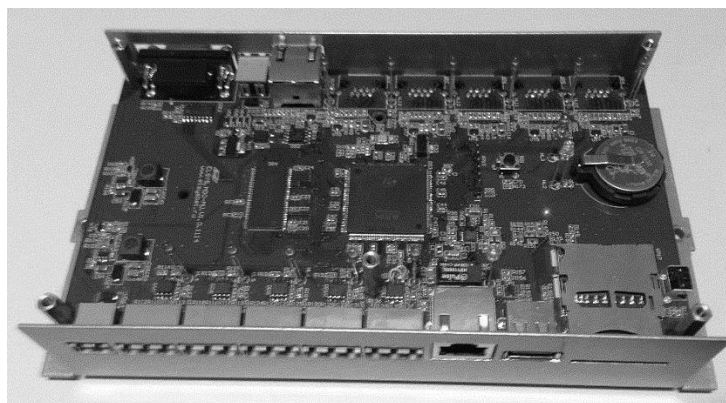


Рис. 7. Контроллер ТИТ
Fig. 7. TIT controller

Блок управления силовыми тиристорами. Обеспечивает управление 4-мя силовыми тиристорами в цепях, где напряжение может достигать 1,2 кВ. Обеспечивает необходимый уровень гальванической развязки с цепями управления и защиту тиристоров от импульсных перенапряжений. Внешний вид блока управления тиристорами со снятой крышкой приведен на рисунке 8.

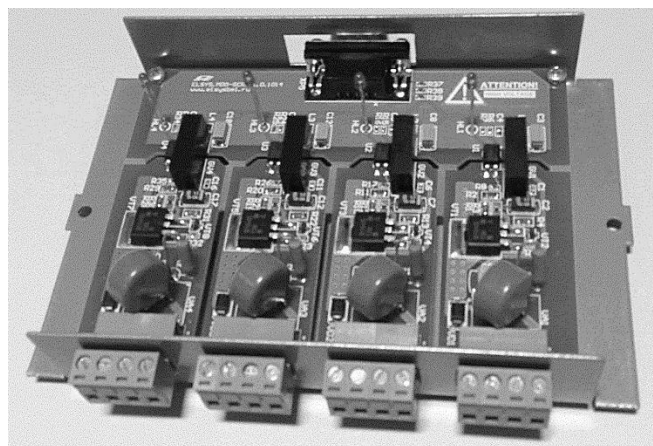


Рис. 8. Блок управления тиристорами
Fig. 8. Thyristor control unit

Блок скоростных многоканальных измерений напряжений и токов (уровень до 1,2 кВ). Обеспечивает 6 каналов высокоскоростных (до 50 кГц) измерений напряжения и 2 канала измерения тока в силовом блоке ТИТ. В качестве аналогового-цифрового преобразователя выбрана микросхема фирмы Analog Devices AD7699. Гальваническая развязка интерфейса выполнена на уровне 2 кВ. Печатная плата блока приведена на рисунке 9а.

Блоки расширения ввода и вывода дискретных сигналов (рис. 9б, 9в). Каждый из разработанных блоков дискретных входов и выходов обеспечивает по 16 дискретных каналов и уровень гальванической развязки не ниже 2 кВ.

Блок аппаратной защиты (рис. 9г). Особенностью разработанного блока является контроль напряжения в 2-х независимых точках, а выходной сигнал блока состоит из 2-х сигналов нормально замкнутого и нормально разомкнутого для повышения отказоустойчивости (как от залипания контактов, так и от обрыва). Допустимый диапазон напряжений входного сигнала составляет от 0 В до 2 кВ.

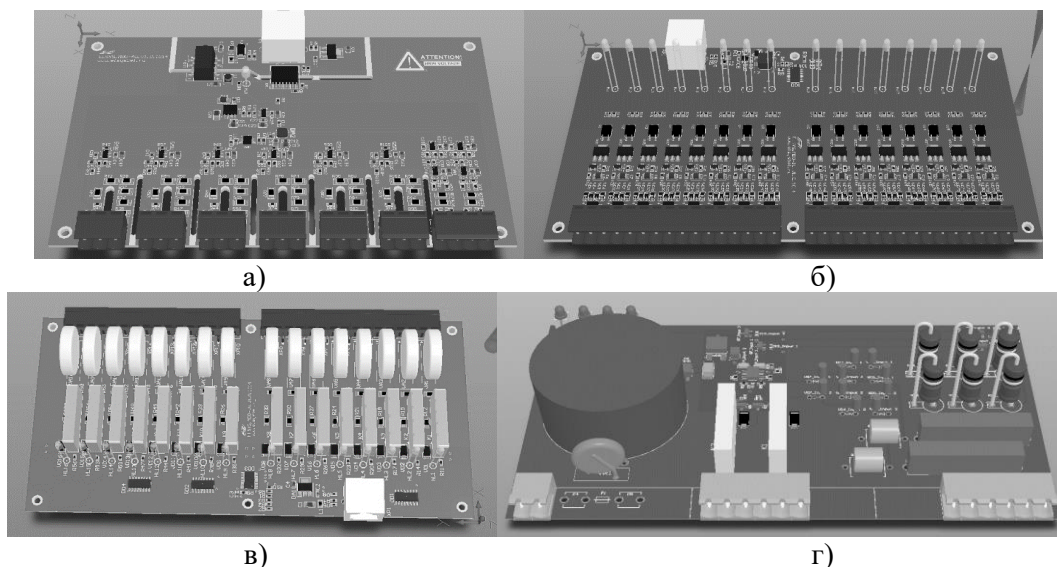


Рис. 9. Блоки: измерений (а), дискретных входов (б) и выходов (в), аппаратной защиты (г)
Fig. 9. Blocks: measurements (a), discrete inputs (b) and outputs (c), hardware protection (d)

Описаны этапы принятия решений по выбору необходимых функциональных возможностей оборудования, по составу оборудования и взаимодействию основных подсистем. Выбранные технические решения обеспечивают возможности исследования зависимостей между режимами обработки, параметрами режимов обработки и свойствами получаемых покрытий. В следующей части статьи будет рассмотрен процесс формирования требований к программному обеспечению, его состав и ключевые особенности, взаимодействие подсистем, а также основные функциональные возможности.

Список литературы

- Асадуллаев Р.Г., Лифиренко М.В., Ломакин В.В., Резниченко Т.А., Яценко В.М. 2017. Информационное обеспечение процесса формирования покрытий методом микродугового оксидирования. Информационные системы и технологии. с. 36-43.
- Герасимов В.А., Руднев П.С. 2008. Источник питания для микродугового оксидирования. Вологодские чтения. 69: 171-174.
- Голубков П.Е. 2015. Автоматизированный лабораторный стенд для получения и исследования МДО-покрытий. Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе.
- Голубков П. Е. 2022. Исследование влияния частоты измерительного сигнала на погрешность косвенного измерения свойств оксидных покрытий. Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.
- Гринченков В.П. 2011. Технологический источник тока для процесса микроплазменного оксидирования. Известия Вузов Севера – Кавказского Региона. Технические Науки. с. 65-68.
- Людin В. Б. 2008. Универсальный технологический источник тока для микродугового оксидирования. Материалы Всероссийской научно-техн. конф. М.: ИЦ МАТИ, с. 141-143.
- Мамаев А.В. 2005. Компьютерная система измерения электрических параметров микроплазменных процессов в растворах. Защита металлов. с. 278–283.
- Павленко А.В. 2011. Источник питания для устройств микродугового оксидирования. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки.
- Печерская Е.А. 2019. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий. Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.
- Печерская Е.А. 2019. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных. Известия вузов. Электроника. 2019. №4.
- Пономарев И.С. 2013. Особенности влияния электрических режимов на процесс микродугового оксидирования. Современные проблемы науки и образования. Вестник ПНИПУ. Машиностроение. материаловедение. с. 99-103.
- Сумина И.В. 2005. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ.
- Фаткуллин, А.Р. 2016. Автоматизация технологического процесса плазменно-электролитического оксидирования на основе косвенного контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам. Вестник УГАТУ. с. 38-44.

- Яценко В.М. 2015. Функциональные возможности электротехнического оборудования для микродугового оксидирования. Научное обозрение. с. 264-274.
- Яценко В.М., Иванов М. Б., Храмов Г. В. Патент РФ № 168062. Технологическая установка микродугового оксидирования.
- Яценко В.М., Подколзин В. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660049. Программа контроллера управления ТИТ для МДО (ELSYS.MDO.MCU.1).

References

- Asadullaev R.G., Lifirenko M.V., Lomakin V.V., Reznichenko T.A., Yatsenko V.M. 2017. Information support of the coating formation process by microarc oxidation. Information systems and technologies. pp. 36-43. (in Russian)
- Gerasimov V.A., Rudnev P.S. 2008. Power supply for microarc oxidation. Vologda readings. 69: 171-174.
- Golubkov P.E. 2015. Automated laboratory stand for obtaining and testing of MDO coatings. Models, systems, networks in economics, technology, nature and society. (in Russian)
- Golubkov P.E. 2022. Investigation of the influence of the frequency of the measuring signal on the error of indirect measurement of the properties of oxide coatings. Measurement. Monitoring. Management. Control. (in Russian)
- Grinchenkov V.P. 2011. Technological current source for the microplasma oxidation process. News Of Universities Of The North Caucasus Region. Technical Sciences. pp. 65-68. (in Russian)
- Ludin V.B. 2008. Universal technological current source for microarc oxidation. Materials of the All-Russian Scientific and Technical conf. M.: IC MATI, pp. 141-143. (in Russian)
- Мамаев А.В. 2005. Computer system for measuring electrical parameters of microplasma processes in solutions. Protection of metals. pp. 278-283. (in Russian)
- Pavlenko A.V. 2011. Power supply for microarc oxidation devices. News of universities. The North Caucasus region. Series: Technical Sciences. (in Russian)
- Pecherskaya E.A. 2019. Intelligent system of controlled synthesis of oxide coatings. Measurement. Monitoring. Management. Control. (in Russian)
- Pecherskaya E.A. 2019. Investigation of the influence of technological parameters of the microarc oxidation process on the properties of oxide materials. Electronics. 2019. №4. (in Russian)
- Ponomarev I.S. 2013. Features of the influence of electrical modes on the process of microarc oxidation. Modern problems of science and education. Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering. materials science. pp. 99-103. (in Russian)
- Suminova I.V. 2005. Microarc oxidation (theory, technology, equipment). M.: ECOMET. (in Russian)
- Fatkullin A.R. 2016. Automation of the technological process of plasma-electrolytic oxidation based on indirect control of the coating thickness by electrical characteristics. Bulletin of UGATU. pp. 38-44. (in Russian)
- Yatsenko V.M. 2015. Functional capabilities of electrical equipment for microarc oxidation. Scientific review. pp. 264-274. (in Russian)
- Yatsenko V.M., Ivanov M. B., Khramov G.V. Patent of the Russian Federation No. 168062. Technological installation of micro-arc oxidation. (in Russian)
- Yatsenko V.M., Podkolzin V.V. Certificate of state registration of the computer program No. 2016660049. TIT Control Controller program for MDO (ELSYS.MDO.MCU.1). (in Russian)

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яценко Владимир Михайлович, директор МИП ООО "ЭЛСИС БелГУ", г. Белгород, Россия

Ломакин Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir M. Yatsenko, Director of SIE LLC "ELSYS BelGU", Belgorod, Russia

Vladimir V. Lomakin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies of the Belgorod National Research University, Belgorod, Russia