

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

На правах рукописи



Егоров Андрей Сергеевич

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ С РЕВЕРСОМ ТОКА

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими про-
цессами и производствами (по отраслям)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Литовка Ю.В.

Тамбов – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 Анализ гальванических процессов, оборудования для их проведения, систем управления гальваническими процессами и постановка задачи работы ..	13
1.1 Анализ электрохимических процессов при нанесении гальванических покрытий.....	13
1.2 Показатели качества гальванических покрытий	16
1.3 Обзор методов улучшения равномерности гальванических покрытий	18
1.4 Технологическое оборудование для нанесения электрохимических покрытий и системы управления гальваническими процессами	21
1.5 Обоснование выбора реверсивного режима для повышения равномерности гальванических покрытий.....	27
1.6 Постановка задачи работы	33
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	34
Глава 2 Математическое моделирование гальванических процессов с реверсом тока.....	36
2.1 Математическое моделирование процесса нанесения гальванического покрытия с реверсом тока.....	36
2.2 Проведение экспериментальных исследований и проверка адекватности математической модели	49
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	63
Глава 3 Оптимизация процессов нанесения гальванических покрытий с реверсом тока.....	64
3.1 Математическая постановка задачи оптимизации гальванических процессов с реверсом тока.....	64
3.2 Теоретическое определение граничной частоты гальванического процесса с применением реверсивного тока.....	69
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	79

Глава 4 Разработка автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока.....	80
4.1 Разработка измерительно-вычислительного комплекса для определения предельной частоты гальванического процесса.....	80
4.2 Разработка автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока	90
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96
Приложение А Программная часть ИВК в режиме измерения.....	106
Приложение Б Программная часть автоматизированной системы управления гальваническим процессом	112
Приложение В Копии свидетельств о регистрации программы для ЭВМ	116
Приложение Г Копия патента на полезную модель	119
Приложение Д Копии актов о реализации результатов исследования.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Металлы являются одними из самых необходимых материалов в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и иных видах жизнедеятельности человека, а самым востребованным материалом на основе металлов по-прежнему остаётся сталь. Годовой объём выпуска стали является одним из основных показателей экономической ситуации в государстве. Так, например, по объёму производства с гигантским отрывом лидирует Китай, где в 2012 году было произведено 709 млн. т стали или 46% всего мирового выпуска. Далее следуют Япония, США, Индия. Россия с производством 71 млн. т стали и долей на мировом рынке в 4,5% занимает пятое место.

Более 80% всех металлических конструкций, а также изготовленных из стали изделий, узлов и агрегатов эксплуатируется вне помещений. Вследствие этого эти изделия подвержены атмосферной коррозии [89], т.е. разрушению (окислению) железа в результате химического или электрохимического воздействия внешней среды, так как сталь представляет собой твёрдый раствор углерода в железе. В результате происходит убыль металла вследствие общей или сплошной коррозии. Так, например, для конструкционных сталей скорость атмосферной коррозии составляет в среднем 200 мкм/год, в результате чего из промышленного оборота в Российской Федерации ежегодно выводится 20-25 миллионов тонн металла [89]. Кроме того, по этой же причине происходит преждевременный износ металлоконструкций, стоимость изготовления и монтажа которых значительно превышает стоимость металла, использованного на их изготовление, сборку и монтаж. Разгерметизации резервуаров, трубопроводов или реакторов вследствие «язвенной» коррозии приводят к экологическим авариям и катастрофам, а также потерям технических жидкостей. Подвержены коррозии и другие металлы. Даже в промышленно развитых странах убытки от коррозии составляют 5-10% от национального дохода [90]. Проведение работ по защите от коррозионного воздействия позволяет снизить неблагоприятные последствия коррозионного повреж-

дения. К таковым относятся и электролитические процессы нанесения металлопокрытий из металлов, которые подвержены коррозии незначительно по сравнению с защищаемым материалом. Раздел прикладной электрохимии, описывающий физические и электрохимические процессы, происходящие при осаждении катионов металлов на каком-либо виде электрода (обычно катоде), а также набор технологических приёмов, режимных параметров и оборудования, применяемого при электрохимическом осаждении каких-либо металлов на заданной подложке называется гальванотехникой.

Гальванические металлопокрытия используются для придания покрываемым изделиям защитно-декоративных свойств, восстановления формы изношенных деталей, повышения сопротивления механическому износу, сообщения антифрикционных свойств, отражательной способности, повышения поверхностной твёрдости, снижения переходного электросопротивления и других.

Вследствие вышеперечисленных причин процесс нанесения защитных и декоративных покрытий гальваническим способом является технологической операцией для большинства машиностроительных производств. Так в Российской Федерации общее число гальванических производств составляет более 7000 с годовым объёмом производства каждого от 10000 до 10000000 м² и которое потребляет не менее 15% никеля, 50% цинка, 70% меди, производимых в нашей стране [40].

В условиях сложной экономической ситуации, в которой оказалась отечественная промышленность, большинство предприятий не в состоянии приобретать новое оборудование. В связи с этим существенно возросло значение повышения производительности уже имеющегося гальванического оборудования, а для повышения конкурентоспособности производимых изделий, требуется уделять значительное внимание их качеству. К основным качественным показателям гальванических покрытий относятся: равномерность распределения толщины покрытия по поверхности детали, микротвёрдость покрытия, износостойкость, прочность сцепления покрытия с металлом основы и другие. Таким образом, требуется по-

лучение покрытия, имеющего высокие показатели по нескольким критериям качества, при этом процесс нанесения гальванического покрытия должен быть высокопроизводительным, и, как правило, с использованием уже имеющегося технологического оборудования.

Однако резервы оборудования, применяемого в настоящее время для нанесения гальванических покрытий, практически исчерпаны как по увеличению производительности, так и по улучшению качественных показателей обрабатываемых изделий. Поэтому положительная динамика в этой области возможна только с оптимизацией и автоматизацией существующих процессов, модернизацией и совершенствованием технологии, а также использованием перспективного оборудования - ванн со многими анодами, источников реверсивного, импульсного и асимметричного переменного тока. В свою очередь такое оборудование невозможно эффективно эксплуатировать без разработки методов, алгоритмов и систем управления ввиду чрезвычайной сложности связи управляющих воздействий с производительностью оборудования и качественными показателями гальванопокрытия [52].

Кроме того, номенклатура выпускаемых изделий требует перестройки (как правило, частой) технологических режимов и поиска оптимальных управлений гальваническими процессами с учетом удовлетворения продукции многим критериям, что невозможно эвристическими методами вследствие высокой сложности и трудоемкости такого поиска [52].

Поиск оптимальных режимов путём проведения экспериментов связан со значительными материальными затратами, что неприемлемо в условиях рыночной экономики.

При этом, несмотря на научную и практическую работу, ведущуюся по вопросам автоматизации гальванических процессов, ситуацию нельзя считать положительной.

Не изучены вопросы оптимизации и управления гальваническими процессами, осуществляемыми с использованием перспективного оборудования - ванн, питаемых реверсивным током [52].

Таким образом, оптимизация и управление процессом нанесения гальванических покрытий, повышающие производительность оборудования и улучшающие качественные показатели гальванопокрытия, является актуальной научной и практической задачей.

Целью настоящей работы является создание автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока для повышения качества никелевого покрытия в соответствии с критерием неравномерности. Научная проблема, соответствующая данной цели, заключается в оптимизации и управлении процессом гальванического никелирования в соответствии с выбранным критерием.

Для достижения указанной цели необходимо:

- построить математические модели гальванических процессов;
- осуществить экспериментальное исследование гальванических процессов для подтверждения адекватности математических моделей;
- поставить и решить задачу оптимизации гальванических процессов и найти оптимальные значения управляющих воздействий;
- разработать автоматизированную систему управления, реализующую алгоритм оптимизации гальванических процессов по выбранному критерию для прогрессивного оборудования нанесения электрохимических покрытий, а именно гальванических ванн, питаемых реверсивным током.

Настоящая диссертационная работа выполнялась в соответствии с ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

Научная новизна работы:

1. Поставлена задача оптимизации процесса нанесения гальванического никелевого покрытия в соответствии с критерием неравномерности, отличающаяся использованием реверсивного тока.

2. Процесс нанесения гальванических покрытий формализован с точки зрения синтеза автоматизированной системы управления процессом, имеющим частотные свойства.

3. Получены аналитические математические модели для определения предельной частоты изменения параметров электрохимической системы в процессе нанесения покрытия, учитывающие изменение полосы пропускания гальванической системы от геометрического фактора технологического объекта управления.

4. Разработан алгоритм функционирования измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) для определения предельной частоты гальванического процесса с реверсом тока, отличающийся методом расчета параметров электрохимической системы на основе реакции системы на воздействие в форме функции Хевисайда.

Практическая ценность работы. Разработана программа решения системы уравнений математической модели процесса никелирования с использованием реверсивного тока, а также программа решения задачи оптимизации гальванических процессов с реверсом тока. Предложена принципиальная схема и разработано устройство реверсирования тока (мостовой инвертор), позволяющее расширить временной диапазон существующих выпрямительных агрегатов в режиме реверсирования тока. Принципиальная схема устройства защищена патентом на полезную модель Российской Федерации №137668. Предложена методика нахождения предельной частоты процесса нанесения гальванического покрытия с использованием реверсивного тока. На базе разработанного мостового инвертора создан измерительно-вычислительный комплекс для практической реализации методики нахождения предельной частоты процесса нанесения гальванического покрытия с использованием реверсивного тока, а также разработана автоматизированная сис-

тема управления процессом нанесения никелевых гальванических покрытий с использованием реверсивного тока.

Разработаны алгоритмы и реализующее их программное обеспечение для функционирования разработанных устройств, защищённое свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ. Получены результаты экспериментальных исследований, доказывающие работоспособность разработанных устройств, программ и адекватность созданной математической модели.

Внедрения. Результаты работы используются в ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов) и ГОУ ВПО ТГТУ (г. Тамбов).

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях: «Математические методы в технике и технологиях» (г. Саратов – 2011, 2012 г., г. Ангарск – 2013 г.), «Совершенствование технологии гальванических покрытий» (г. Киров – 2012 г.), «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (г. Саратов – 2013 г.). По основным положениям, выводам и практическим результатам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации для публикации основных результатов диссертации, 5 докладов на международных конференциях, патент Российской Федерации на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть работы изложена на 121 странице машинописного текста, содержит 23 рисунка и 3 таблицы. Список литературы включает 99 наименований.

В первой главе проведён литературный обзор и анализ существующих методов и устройств процесса нанесения гальванического никелевого покрытия. Рассмотрены существующие методы повышения равномерности гальванических покрытий и их недостатки. Обоснован выбор метода повышения равномерности с использованием реверсивного тока. Сделан обзор и анализ источников по использованию реверсивного режима для улучшения качества никелевых гальваниче-

ских покрытий. На основании обзора сделан вывод о том, что для реверсивного режима нанесения никелевых гальванических покрытий не исследован такой важный параметр, как равномерность получаемого покрытия. В связи с этим, необходимо создание математической модели для процесса нанесения никелевого гальванического покрытия в режиме с реверсированием тока. Также сделан вывод о том, что для данного режима возможности серийного оборудования недостаточны, следовательно, требуется разработать автоматизированную систему управления гальваническим процессом с необходимыми характеристиками. Кроме того, проведение серии экспериментальных исследований для определения ограничений на длительности включения прямого и реверсивного тока требует больших материальных и временных затрат. В связи с этим, необходимо разработать методику определения ограничений на основе анализа параметров электрохимической системы. Тем самым обоснована новизна данной работы. В заключение главы поставлена задача исследования.

Во второй главе проведено математическое моделирование гальванического процесса нанесения никелевого покрытия в режиме с реверсированием тока. При этом прирост толщины покрытия в точке детали с координатами (x, y, z) в течение τ_n j -го «прямого» включения тока рассчитывается по формуле, полученной из закона Фарадея, плотность тока на катоде во время включения прямого тока рассчитывается исходя из закона Ома в дифференциальной форме, а для нахождения распределения потенциала φ_n в ванне используется дифференциальное уравнение Лапласа с краевыми условиями.

Для проверки адекватности составленной модели были проведены эксперименты по нанесению никелевого гальванического покрытия из электролита Уоттса с использованием реверсивного тока на имеющемся оборудовании. Однако в ходе экспериментальных исследований было установлено, что для проведения экспериментов в диапазонах, рассматриваемых в литературных источниках, необходимо оборудование, способное выдавать импульсы длительностью от единиц миллисекунд, что невозможно на имеющемся оборудовании (выпрямительный

агрегат Flex Kraft FLX-01 ver. 02.41 модель 2009 г., “Kraftelektronik AB”, Швеция (с 2011г. “KraftPowercon Sweden AB”)) и на большинстве серийно выпускаемого оборудования. В связи с этим, было разработано устройство реверсирования тока, основой которого является мостовой регулируемый инвертор. Применение данного устройства позволяет использовать уже имеющиеся однополярные выпрямительные агрегаты для реализации режима реверсирования тока и проводить гальванические процессы во всём временном диапазоне. На основе данного устройства была разработана автоматизированная система управления гальваническим процессом с использованием реверсивного тока.

В третьей главе рассматривается оптимизация процесса нанесения никелевого гальванического покрытия в режиме с реверсированием тока. Для оптимизации исследуемого процесса по критерию неравномерности, необходимо задать ограничения на управляющие воздействия, т.е. на длительности прямого и обратного периодов. Для определения нижней границы длительностей прямого и реверсивного тока необходимо определить предельную частоту гальванического процесса. Для этого на основе эквивалентной схемы электрохимической системы аналитически рассчитана передаточная функция $K(\omega)$ для гальванического процесса с использованием реверсивного тока. Построив график зависимости модуля передаточной функции от циклической частоты и найдя значение $\omega_{пр}$, при которой модуль $K(\omega_{пр}) = 0.5$, получим полосу пропускания, верхнее значение которой будет предельной частотой $f_{пр}$ для гальванического процесса в режиме с реверсированием тока.

В четвертой главе рассматриваются алгоритмы, методы и практические аспекты расчёта предложенного метода нахождения предельной частоты гальванического процесса с применением реверсивного тока и описание автоматизированной системы управления этим процессом. Для этого необходимо найти значения следующих величин: $R_{гр}$ – активное сопротивление межфазовой границы электрод-электролит (Фарадеево сопротивление), r_3 – активное сопротивление электролита, C – ёмкость межфазовой границы электрод-электролит. Был разра-

ботан и реализован измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) для реализации методики нахождения предельной частоты процесса нанесения никелевого гальванического покрытия с использованием реверсивного тока по реакции системы на единичное воздействие стабилизированного тока в форме функции Хевисайда. На основании анализа полученных результатов разработана автоматизированная система управления процессом нанесения никелевых гальванических покрытий с использованием реверсивного тока, реализующая алгоритм оптимизации в соответствии с критерием неравномерности.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложения вынесены листинги исходных модулей разработанных программ, акты об использовании результатов исследования, патент РФ на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Глава 1 Анализ гальванических процессов, оборудования для их проведения, систем управления гальваническими процессами и постановка задачи работы

Гальванотехника – это область прикладной электрохимии, охватывающая процессы электролитического осаждения металлов на поверхность металлических и неметаллических изделий. Открытие и техническая разработка гальванотехники принадлежат русскому учёному Б. С. Якоби, о чём он доложил 5 октября 1838 на заседании Петербургской АН. [19]

Она включает в себя гальваностегию – получение на поверхности изделий прочно сцепленных с ней тонких металлических покрытий, и гальванопластику – получение легко отделяющихся, относительно толстых, точных копий с различных предметов, т. н. матриц. Гальваностегия применяется шире, чем гальванопластика; её цель придать готовым изделиям или полуфабрикатам определённые свойства: повышенную коррозионную стойкость (цинкованием, кадмированием, лужением, свинцеванием), износостойкость трущихся поверхностей (хромированием, железнением). Гальваностегия применяется для защитно-декоративной отделки поверхности (достигается никелированием, хромированием, покрытием драгоценными металлами). В данной работе рассматриваются только процессы гальваностегии, поэтому термин «гальванический процесс» будет подразумевать стационарный гальваностегический метод. [19]

1.1 Анализ электрохимических процессов при нанесении гальванических покрытий

Гальванотехника основана на явлении электрокристаллизации – осаждении на катоде положительно заряженных ионов металлов из водных растворов их соединений при пропускании через раствор постоянного электрического тока, то

есть при подключении к полюсам источника тока двух металлических пластинок, погруженных в раствор щелочи или кислоты, в гальванической ячейке наблюдается появление электрического тока. Этот процесс получил название электролиза, а раствор – электролита [19, 68]. Переносчиком электрических зарядов в электролитах являются положительные и отрицательные ионы, возникающие в результате диссоциации. Они относятся к проводникам второго рода. Электроды изготавливаются из материалов, являющихся проводниками электрического тока первого рода, т.е. из веществ, обладающих электронной проводимостью. Прохождение тока через поверхность раздела электрод - электролит как через границу между двумя телами, обладающими разными типами проводимости, сопровождается протеканием электрохимической реакции, связанной на катоде с процессом восстановления, а на аноде - с процессом окисления веществ [22].

Таким образом, если использовать в качестве катода деталь, а в качестве катиона - ион металла, то в процессе протекания электрохимической реакции на поверхности детали будет оседать слой восстанавливающегося металла. Полученное покрытие придает покрываемой детали ряд ценных свойств. К таким свойствам относятся: коррозионная стойкость, твёрдость, износостойкость, внешний вид и другие. В ряде случаев это позволяет заменить дорогостоящие материалы значительно более дешёвыми с гальваническими покрытиями. В качестве металлов покрытия используют цинк, хром, медь, никель, благородные и редкие металлы, кадмий, олово и другие, а также сплавы.

По сравнению с издавна применявшимися методами нанесения покрытий (например, погружением в расплавленный металл) гальваностегический метод имеет ряд преимуществ, особенно в тех случаях, когда можно ограничиться незначительной толщиной покрытия. Химический способ, позволяющий наносить покрытия из металлов или сплавов без применения электрического тока, осуществляется при помощи веществ, способных восстанавливать металлы из растворов солей. Покрытия, получаемые химическим способом, отличаются равномерностью слоя, беспористостью, но проигрывают гальваническому способу как по

производительности, так и по сложности технологического процесса. Так, например, рабочая температура гальванической ванны при химическом никелировании должна быть $85 \div 95$ °С [16].

Количественно гальванотехнические процессы регулируются по законам Фарадея с учётом побочных процессов, которые сводятся чаще всего к выделению на поверхности покрываемых изделий наряду с металлом - водорода; качественно – типом и составом электролита, режимом электролиза, т. е. плотностью тока, а также температурой и интенсивностью перемешивания. [19]

С самого начала развитие гальванотехники было неразрывно связано с использованием постоянного тока. Однако неизбежно низкая плотность тока при таком способе ведения технологического процесса ведёт к низкой производительности. Неизбежной она является вследствие так называемого лимитирующего фактора катодного и анодного процессов. В первом случае с повышением плотности тока резко падает выход металла по току, а так же ухудшаются защитные свойства покрытия. Во втором случае повышение плотности тока вызывает переход растворимых анодов в пассивное состояние и резкое обеднение электролита металлосодержащим компонентом. Следовательно, попытки осуществлять электроосаждение металлов при повышенных плотностях тока ведут к отрицательному результату, а именно, к образованию на катоде недоброкачественного покрытия. Но, начиная с 50-х годов прошлого века, в гальванических процессах начали применять реверсивный (в некоторых источниках реверсированный) ток. Применение такого процесса было обусловлено успешными исследованиями, направленными на решение проблемы интенсификации процессов электролитического осаждения металлов и при этом улучшения качественных показателей гальванических покрытий [13].

Это объясняется следующими явлениями. Исходя из представлений кристаллофизики о явлении кристаллизации как процессе образования центров кристаллизации (зародышей или элементарных кристаллов) и роста уже образовавшихся кристаллических зародышей, при электролитическом осаждении металла

образовавшиеся кристаллы имеют ту или иную степень дисперсности в зависимости от соотношения скоростей образования новых центров кристаллизации и их роста. Это означает, что при более интенсивном процессе образования зародышей (центров кристаллизации) покрытие имеет мелкокристаллическую структуру и, наоборот, если преобладает скорость роста образовавшихся зародышей, то получаются крупные кристаллы и покрытие в целом будет иметь крупнокристаллическую, а, следовательно, неравномерную поверхность [13].

Такие факторы, как повышение температуры ванны, повышение в электролите концентрации соли осаждающегося металла, перемешивание электролита, вызывают снижение катодной поляризации, что приводит к образованию кристаллов меньшей степени дисперсности.

Однако наиболее простым средством предотвращающим рост кристаллов является периодический перерыв процесса осаждения металла с возобновлением его через некоторое время [13].

Ещё большее положительное влияние оказывает на структуру катодного осадка реверсирование тока. Это вызвано тем, что при реверсировании тока за время анодной поляризации происходит либо растворение активных участков кристаллов осаждённого металла, либо поверхность покрытия претерпевает изменения, связанные с её пассивированием, в результате чего создаются условия для возникновения новых центров кристаллизации в катодный период реверсирования тока [13].

1.2 Показатели качества гальванических покрытий

В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам деталей, различают три типа покрытия:

- защитные, применяемые для защиты от коррозии деталей в различных средах;

- защитно-декоративные, применяемые для декоративной отделки деталей с одновременной защитой от коррозии;
- специальные, применяемые для придания поверхности деталей специальных свойств (износостойкости, твердости, электроизоляционных, магнитных свойств и т.д.), восстановления изношенных деталей и т.д. [52].

Требования к гальваническому покрытию регламентируются ГОСТ 9.306-85 следующими терминами: способ получения покрытия, материал покрытия, минимальная толщина покрытия, тип электролита, функциональные или декоративные свойства покрытия, дополнительная обработка. При этом минимальная толщина покрытия колеблется от 0.1 мкм (для благородных металлов) до 300 мкм (для хрома).

Таким образом, гальваническое покрытие имеет количественную характеристику – минимальная толщина покрытия, а так же ряд качественных характеристик, в первую очередь это равномерность гальванического покрытия и микротвёрдость.

Гальванические покрытия должны иметь мелкокристаллическую структуру и равномерную толщину на различных участках покрываемых изделий – выступах, углублениях, граничных переходах. Это требование имеет в гальваностегии особенно важное значение при покрытии изделий сложной конфигурации. В этом случае используют электролиты на основе комплексных соединений или электролиты на основе простых солей с добавками поверхностно-активных веществ [19]. Без добавок поверхностно-активных веществ, которые, как правило, являются экологически опасными (например, фенол), на поверхности покрываемых изделий выделяются изолированные крупные кристаллы, что является производственным браком [13]. Учитывая то, что в подавляющем большинстве случаев детали, на которые наносится гальваническое покрытие, имеют сложную объёмную конфигурацию, это создаёт, пожалуй, основные трудности в получении равномерных гальванических покрытий.

1.3 Обзор методов улучшения равномерности гальванических покрытий

Неоднородность электрического поля в гальванической ванне приводит к тому, что в различных точках поверхности толщина осажденного покрытия будет разной. Это приводит к неравномерности покрытия, что, в свою очередь, ведёт к дополнительному расходу электроэнергии и металла покрытия, а при толщине покрытия на некоторых участках меньше заданной, изделие будет забраковано.

Для оценки равномерности гальванического покрытия используется критерий неравномерности, вычисляемый по следующей формуле [37]:

$$R = S_k^{-1} \int_{S_k} ((\delta(x,y,z) - \delta_{\min}) / \delta_{\min}) dS_k, \quad (1.1)$$

где δ_{\min} – минимальная толщина покрытия, $\delta_{\min} > \delta_{\text{зад}}$, $\delta_{\text{зад}}$ – заданная толщина покрытия, $\delta(x,y,z)$ – толщина покрытия в точке с координатами (x,y,z) , $\delta(x,y,z) > 0$, S_k – площадь поверхности катода.

Для повышения равномерности гальванических покрытий применяются следующие методы:

- 1) электрохимические (изменение плотности тока, применение нетрадиционных источников тока);
- 2) геометрические (использование фигурного анода, биполярного электрода, токонепроводящего перфорированного экрана, многоанодных систем).

Примерами нетрадиционных источников тока являются реверсивный ток, асимметричный переменный ток и импульсный ток. Для многоанодных систем используются: разные потенциалы на анодных секциях, поочередное включение (выключение) анодных секций, изменение расположения анодных секций.

Геометрические способы являются сложными в технологическом плане и связаны с выбором конфигурации и перемещением анодных секций.

Применение импульсных режимов повышает качество покрытия, однако, как показывает работа [13], для таких процессов, как меднение, хромирование,

никелирование, цинкование, серебрение, золочение и других, применение реверсивных токов дает ещё лучшие результаты.

Реверсирование тока заключается в периодической смене полярности электродов, когда покрываемая деталь на время становится анодом. График изменения реверсивного тока показан на рис. 1, где I_k – сила тока прямого направления (ток катодной поляризации), I_a – сила тока обратного направления (ток анодной поляризации), t_k – время осаждения металла (катодный период), t_a – время анодной поляризации (анодный период).

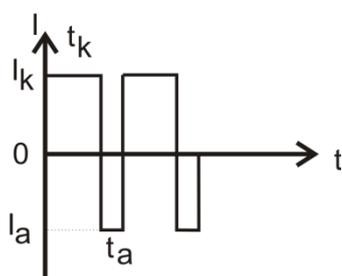


Рис. 1. График изменения реверсивного тока

Как отмечалось выше, реверсивный ток оказывает сильное влияние на структуру гальванических покрытий и их физические свойства. Реверсирование тока уже при сравнительно малой частоте изменения полярности электрода заметно повышает степень дисперсности осадка [14]. Дисперсность осадка, полученного реверсированным током, в сильной степени зависит от относительной продолжительности катодного и анодного периодов поляризации электрода, т.е. от отношения t_k/t_a при постоянном значении суммы t_k+t_a . Каждому периоду времени, определяемому этой суммой, соответствует своё значение t_a для образования покрытия с наиболее совершенной структурой. Это значение таково, что обеспечивается достаточно высокая анодная поляризация электрода. В этом случае катодный процесс осаждения металла протекает в условиях, способствующих образованию новых центров кристаллизации. Особенно это относится к процессам осаждения металлов из растворов простых солей. Покрытия, полученные при периодической смене направления тока, электрокристаллизуются часто светлыми

и даже блестящими. В работах [14] при выборе оптимального режима электроосаждения металла на реверсивном токе руководствуются кривыми «потенциал электрода-время» при заданной плотности тока, а в работе [13] исходя из времени достижения потенциала электрода стационарного значения указывается, что $t_k > t_a$ в $5 \div 10$ раз.

При осаждении металлов реверсированным током влияние дефектов на поверхности основного металла (царапины, поры, пузыри и т.д.) устраняется периодической анодной поляризацией слоёв покрытия. [13]

Выпадение из электролита на катодную поверхность взвешенных частиц вызывает появление пор в покрытии и образование неровностей на поверхности осадка. При осаждении металла с использованием реверсированного тока такие частицы удаляются с поверхности покрытия в период анодной поляризации, особенно если в анодный период происходит растворение покрытия. Если поры в покрытии возникают вследствие структурного несовершенства кристаллизующегося осадка (образование дендритов, губки, порошка и т.д.), то при периодической перемене направления тока они устраняются за счет образования покрытия, более совершенного по структуре. [13]

При осаждении металлов реверсированным током поверхность электрода в анодные периоды пассивируется, поэтому электрокристаллизация слоёв в катодные периоды протекает на заранее пассивированной поверхности электрода [13]. По данным [36, 38], это приводит также к заметному повышению защитных свойств электролитических покрытий.

Результаты ряда исследований [14, 99] свидетельствуют о том, что перемена направления тока при осаждении металлов не оказывает отрицательного влияния на прочность сцепления покрытия с основой. Наоборот, при никелировании прочность сцепления покрытия с железом возрастает [13].

1.4 Технологическое оборудование для нанесения электрохимических покрытий и системы управления гальваническими процессами

Технологическое оборудование для нанесения электрохимических покрытий отличается большим многообразием, что вызвано очень широким диапазоном технических требований, которые не могут быть обеспечены аппаратурой какого-то одного типа [9].

Кроме того, оборудование можно разделить на типовое (выпускаемое серийно), и специальное, выпускаемое под индивидуальный заказ и применяемое при особых условиях производства.

Типовое оборудование в большинстве случаев представляет собой автооператорные механизированные и автоматизированные гальванические линии.

Гальваническая линия представляет из себя набор ванн, в которых осуществляется один из следующих процессов: подготовительный (обезжиривание, травление, активирование, полирование, промывка); собственно нанесение покрытия; заключительный (нейтрализация, пассивирование, осветление, хроматирование, промывка).

Перемещение обрабатываемых деталей от одной ванны к другой осуществляется автооператором (манипулятором) или транспортным роботом.

Различают одно- и многопроцессные гальванические линии. Однопроцессная линия характеризуется набором ванн, требуемых для проведения одного процесса - например, цинкования. Многопроцессная линия включает в себя электрохимические ванны для проведения нескольких процессов (например, цинкования, кадмирования, меднения) и набор подготовительных и заключительных ванн, общих для всех процессов. Однопроцессная линия, как правило, эксплуатируется с использованием одной «жесткой» программы управления автооператорами - циклограммы. При этом время пребывания деталей в каждой ванне, в том числе и электрохимической, фиксировано [52].

Во всей технологической цепочке основной является электрохимическая ванна нанесения покрытия, работа которой и определяет результаты функционирования всей линии. Это утверждение основано на следующих фактах:

- продолжительность процесса нанесения покрытия (0.5 - 4 часа) на порядок больше продолжительности подготовительно-заключительных операций, поэтому производительность гальванической ванны определяет производительность всей линии;
- режимы функционирования гальванической ванны оказывают решающее влияние на качество наносимого покрытия;
- гальваническая ванна характеризуется сложностью протекающих в ней процессов (электрохимические, химические, массо- и теплообменные, гидродинамические и механические);
- сложность и разнообразие аппаратного оформления;
- гальваническая ванна является основным потребителем электроэнергии и тем самым определяет экономичность работы линии в целом [52].

В ванне размещают один или несколько анодов [9, 10, 35], прикрепляемых к изолированным от корпуса ванны анодным штангам, которые, в свою очередь, соединены с положительным полюсом источника постоянного тока (выпрямительного агрегата). Отрицательный полюс выпрямительного агрегата подключен к опоре-ловителю штанг с деталями.

Питание ванн для нанесения электрохимических покрытий осуществляется от выпрямительных агрегатов (ВА). Из современных ВА наиболее широкое применение получили ВА «Flex Kraft» (Kraftelektronik AB, Швеция) и «Пульсар» (Навиком, г. Ярославль). ВА «Flex Kraft» имеет модульную структуру. На выходе одного модуля ВА «Flex Kraft» при входящем напряжении 380 В переменного тока номинальное напряжение составляет 0 – 12 В, номинальный постоянный ток – до 300 А. Для управления ВА «Flex Kraft» можно использовать собственный блок управления на базе 16-битного микроконтроллера, также возможно управление по

интерфейсам RS-232 и RS-485. ВА позволяет программировать импульсные и реверсивные режимы нанесения покрытия с периодом от 1 с.

ВА «Пульсар Про» предназначен для питания гальванических ванн постоянным током силой от 1 до 50 А с выходным напряжением от 0,2 до 24 В. Шаг установки тока составляет 1 А, а напряжения – 0,1 В. Возможно использование импульсного и реверсивного режима с шагом по длительности равным 1 с. Управление ВА «Пульсар Про» производится с помощью программирования с использованием пульта управления на ВА, либо с использованием выносного пульта управления по интерфейсу RS-485 по экранированной витой паре с длиной линии до 1000 м.

Использование только технологических приёмов улучшения равномерности осаждаемых гальванических покрытий не всегда даёт удовлетворительные результаты. Поэтому идёт разработка и внедрение систем проектирования и управления гальваническими процессами. Как правило, работа данных систем основана на регулировании в режиме реального времени таких технологических параметров процесса как напряжения на электродах, концентрации компонентов электролита, плотности тока, режимов подачи тока, температуры электролита и т.д. Также разрабатываются системы оптимального управления, основанные на предварительном расчете оптимальных значений для определённых технологических параметров процесса.

В ряде работ по оптимальному управлению гальваническим процессом оптимизация критерия неравномерности осуществляется путём разбиения анода на несколько плоских секций, на которые подается определённое напряжение и осуществляется управление гальваническим процессом. В основном в данных работах используется неподвижный многосекционный анод. В работе [5] улучшение неравномерности гальванических покрытий достигается за счёт локального регулирования толщины покрытия на отдельных участках катода. Анод состоит из отдельных секций, регулирующих толщину покрытия на противостоящих участках катода. Измерение толщины осаждённого покрытия на участке катода произво-

дится в режиме реального времени с помощью поляризованного лазерного луча, освещающего точку измерения. После достижения заданной толщины покрытия на участке катода происходит отключение противостоящей анодной секции. В работе [64] предложен способ достижения равномерности, основанный на программном управлении включением и выключением секций анода. Порядок включения и выключения секций рассчитывается с помощью математической модели.

В работе [1] предложен способ достижения оптимальной равномерности покрытия за счёт регулирования уровня электролита в зависимости от измеренной высоты катода. Во время регулирования уровня электролита также происходит включение или выключение анодных секций. За счёт указанных действий происходит изменение геометрии электролизера и повышается равномерность осаждаемых покрытий.

Основным недостатком предложенных технических решений является предположение о влиянии определённой секции анода только на противостоящий участок катода. Толщина покрытия в каждой точке катода непосредственно зависит от распределения электрического тока на профиле катода [43], которое, в свою очередь, зависит от множества различных факторов, в том числе от расположения всех электродов в гальванической ванне и напряжений на них. Все эти факторы действуют взаимосвязано, поэтому каждая из секций в той или иной степени влияет на осаждаемое покрытие во всех точках катода, что подтверждается экспериментальными исследованиями [37, 43]. В работе [6] недостатком является суждение о толщине покрытия на участке катода по толщине только в одной его точке, не учитывая, что около края катода толщина покрытия будет заметно меняться вследствие краевого эффекта.

В ряде работ, основанных на использовании многосекционного анода, предлагается проектирование конфигурации многосекционного анода относительно покрываемой детали. В работе [2] перед погружением детали в ванну для электролитической обработки осуществляется определение профиля детали при помощи ультразвуковых датчиков и линеек бесконтактных измерителей. Получен-

ная информация о расстояниях от анодных секций до противоположных участков детали поступает в блок определения оптимальной конфигурации анода. Поиск оптимальной конфигурации анодных секций осуществляется в соответствии с критерием равномерности распределения плотности тока на катоде и соответственно толщине покрытия, причём плотность тока рассчитывается по линейной зависимости от напряжения в ванне обратно пропорционально межэлектродному расстоянию. В работе [4] данное техническое решение усовершенствовано и определение профиля покрываемой детали осуществляется на этапе, предшествующем электролитической обработке, что повышает производительность гальванической линии.

Идея поиска оптимальной конфигурации анодных секций непосредственно в процессе нанесения покрытия предложена в работе [3], где критерием поиска является равномерность плотности тока вблизи поверхности катода. Определение значений плотности тока осуществляется в результате непосредственного сканирования катода когерентным лазерным лучом и анализа полученной интерференционной картины. Таким образом, рассматривается система управления, функционирующая в режиме реального времени.

Общим недостатком методов управления гальваническими процессами с использованием многосекционного анода является техническая сложность реализации многоанодных систем.

Среди трудов, посвящённых оптимальному управлению параметрами процесса электроосаждения металлов с целью достижения их наивысшего качества, следует выделить работы, выполненные учёными кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета. В работе [52] разработаны математические модели, с помощью которых можно описать большинство гальванических процессов, а также предложена интегрированная система автоматизированного проектирования и управления гальваническими процессами. Методика поиска напряжений на электродах для стационарных процессов, оптимальных с точки зрения равномерности

получаемого покрытия, изложена в работах [30, 31, 48, 51, 57]. Другие решения предполагают проектирование оптимальной конфигурации электролизера, включающей в себя геометрическое расположение плоских анодов в гальванической ванне [55]. Нестационарность процесса электроосаждения металлов, связанная с изменяющейся во времени толщиной покрытия, учитывается в работах [53, 72], посвященных реверсу тока – периодическому изменению полярности источника питания.

Математические модели, используемые в данных работах, включают как уравнение, описывающее распределение электромагнитного поля в электролизере, так и зависимости, характеризующие распределение электромагнитного поля на границах с электродами и изолятором, а, следовательно, такие математические модели можно использовать для объектов произвольного вида. Следует также отметить, что поиск оптимального геометрического расположения анодных секций в гальванической ванне связано с технической сложностью реализации такой системы.

Исходя из анализа вышеприведённых работ по управлению гальваническими процессами, можно сделать следующие выводы:

- значительная часть работ по управлению гальваническими процессами основана на регулировании технологических параметров процесса по схеме с обратной связью. Использование таких систем далеко не всегда даёт оптимальное качество покрытия;
- многие из перечисленных работ основаны на оптимальном проектировании конфигурации многосекционного анода. Реализация таких конструкций связана с высокой технической сложностью;
- в работах, посвященных использованию реверса тока для улучшения равномерности покрытий, ограничения на управляющие воздействия не определялись для используемых электрохимических систем, а были взяты исходя из экспериментальных исследований других авторов;

- отсутствует оборудование и методика определения ограничений на управляющие воздействия для гальванических процессов с реверсом тока.

В связи с этим, вопросы оптимизации и управления гальваническими процессами с реверсом тока в настоящее время не получили необходимой теоретической и экспериментальной проработки и всё ещё открыты для исследования.

1.5 Обоснование выбора реверсивного режима для повышения равномерности гальванических покрытий

Наиболее успешно электроосаждение с использованием реверсивных токов применяется для таких металлов как медь, никель, цинк, железо, а так же благородных металлов групп золота, платины, серебра и их сплавов. Поэтому в данной работе проблемы управления гальваническим процессом с применением реверсивного тока будут рассмотрены на примере процесса никелирования, как типичного гальванического процесса с применением реверсивного тока[43].

Никелем покрывают изделия из стали и цветных металлов (медь и её сплавы) для защиты от коррозии, декоративной отделки поверхности, повышения сопротивления механическому износу и для специальных целей [43, 89]. Покрытия широко применяют для наружных частей транспортных средств, различных аппаратов, приборов, хирургических инструментов, предметов домашнего обихода и т.д. Никелевые покрытия имеют высокую антикоррозионную стойкость в атмосфере, в растворах щелочей и в некоторых органических кислотах, что, в значительной степени, обусловлено сильно выраженной способностью никеля к пассивированию в этих средах.

Никель более благородный металл, чем железо, поэтому защита от коррозии никелевым покрытием возможна только при отсутствии в нём пор. Получить такое покрытие при малой толщине слоя затруднительно, вследствие кристаллической неоднородности поверхности основного металла и наличия в ней различных дефектов механической обработки: риски, поры, царапины, которые не всегда

удается закрыть даже при никелировании с выравнивающими добавками. Поэтому в таких случаях покрытия наносят в два-три слоя, либо сначала изделие покрывают толстым слоем меди, а на него наносят слой никеля меньшей толщины.

Для никелирования применяют сернокислые, хлористые, борфтористоводородные, сульфаминовые электролиты. На практике наибольшее распространение получили сернокислые электролиты. Процесс электроосаждения никеля на катоде при комнатной температуре сопровождается высокой катодной поляризацией. Однако, несмотря на это, рассеивающая способность никелевых электролитов невелика. Это объясняется тем, что при тех плотностях тока, при которых обычно производят никелирование (более 50 A/m^2), катодные потенциалы мало изменяются при повышении плотности тока. Кроме того, при повышении плотности тока до некоторого допустимого предела выход металла по току возрастает, что также неблагоприятно для рассеивающей способности электролита.

Осадки никеля, полученные при высокой температуре, отличаются по структуре от образующихся в том же электролите при комнатной температуре, они становятся крупнозернистыми.

Мелкозернистые твердые полублестящие осадки никеля на катоде можно получать из растворов простых солей никеля без поверхностно-активных и каких-либо других веществ. Такой характер осадков при никелировании можно объяснить образованием коллоидных растворов основных солей никеля в околочатодном пространстве [66, 73] или образованием гелеобразной плёнки на катоде [42].

Катодный выход никеля по току в большой степени зависит от концентрации водородных ионов в растворе. Чем ниже рН раствора, тем меньше выход металла по току, особенно при низкой температуре. При никелировании в холодном ($18 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$) растворе значение рН поддерживают от 4,5 до 5,5, выход по току при этом составляет 90 – 96% в рабочем интервале плотностей тока. С увеличением температуры до $60 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ катодная поляризация заметно снижается, что позволяет вести электролиз при низких значениях рН (1 – 2) и высоких плотностях тока с достаточно большим выходом по току (80 – 90%). В этом случае осадки получа-

ются менее пористыми, более пластичными и коррозионностойкими, чем полученные из многокомпонентного электролита с повышенным значением рН при комнатной температуре.

Превышение допустимого предела рН, который зависит от температуры и плотности тока, может вызвать образование гидроокиси вблизи катода, что ухудшает качество осадка. Поэтому кислотность никелевых электролитов устанавливается в зависимости от выбранного режима электролиза и поддерживается при этом режиме по возможности постоянной. Для этой цели в сернокислый никелевый электролит, работающий при температуре 40 – 50 °С, добавляют слабодиссоциированные кислоты или растворы солей, сообщающие ему буферные свойства. Наиболее широко используется в качестве буферной добавки к сернокислым никелевым электролитам борная кислота.

Для устранения пассивирования никелевых анодов к электролиту добавляют хлористые соли никеля, натрия или калия, в присутствии которых анодная поляризация значительно снижается и скорость анодного растворения никеля возрастает. Активирующее действие хлористых солей на растворение никелевых анодов объясняется специфической адсорбцией хлор-ионов, в результате чего с поверхности никеля удаляются кислород, гидроксильные ионы и другие пассивирующие её чужеродные частицы.

Основными качественными показателями гальванических покрытий являются: равномерность распределения толщины покрытия по поверхности детали, микротвёрдость покрытия, износостойкость, прочность сцепления покрытия с металлом основы и другие.

Микротвёрдость гальванически осажденных никелевых покрытий зависит от состава электролита и может колебаться от 200-300 кг/мм² до 700-800 кг/мм² за счет введения добавки фосфора в состав покрытия. При осаждении никельфосфорного покрытия химическим путем его микротвёрдость также высока. После термообработки никелевых покрытий, содержащих фосфор, микротвёрдость их

возрастает до 900-1000 кг/мм² и выше, приближаясь к твёрдости блестящего хромового покрытия.[91]

Никель, как и сталь, обладает магнитными свойствами. Никелевые покрытия вследствие их насыщения водородом в процессе осаждения имеют пониженную пластичность, но после отжига при 900 °С пластические свойства значительно улучшаются.

Использование реверсивного тока для улучшения качества получаемых никелевых гальванических покрытий из электролита Уоттса исследовалось в работах [13, 41, 92 – 98].

В работе [41] исследовалось влияние реверсивного импульсного тока на структуру и морфологию поверхности осадков никеля в электролите Уоттса без органических добавок. Электролит содержал 300 г/л NiSO₄, 35 г/л NiCl₂·6H₂O, 40 г/л H₃BO₃ (рН 4,4, температура 50 °С). Никель осаждали на вращающемся дисковом электроде при скорости вращения 1200 об/мин. Плотность тока была постоянной и равна 11,4 А/дм². Частоту импульсов изменяли в широком диапазоне от 10⁻² до 10³ Гц, а скважность варьировали от 70 до 100%. В результате исследования установлено, что для осаждения твёрдых гладких и блестящих покрытий следует выбирать такие значения периода включения прямого и обратного тока, при которых частота импульсов будет от 10⁻² до 10⁻¹ Гц, а скважность – от 80 до 95%, т.е. общая длительность включения прямого и обратного тока будет от 10 до 100 секунд, при этом длительность прямого будет от 80 до 95% от общей.

В работе [94] изучалось влияние реверсивного тока на внешний вид получаемых никелевых гальванических покрытий. В исследовании применялся электролит Уоттса. Показано, что применение режима осаждения с использованием реверсивного тока с длительностью прямого тока не более 2 секунд, длительностью обратного – от 4 до 50% от длительности прямого, позволяет получать гладкие, светлые, блестящие никелевые гальванические покрытия.

В работе [13] обобщены результаты исследований [12, 17, 18, 20, 26, 34, 67, 71, 76]. Сделан вывод о том, что использование реверсивного тока при нанесении

никелевых гальванических покрытий из сернокислых электролитов способствует получению покрытий с малыми внутренними напряжениями, гладких, светлых и менее пористых, чем при использовании только прямого тока.

Согласно приведённым исследованиям, применение реверсивного тока позволяет получать гладкие, светлые (иногда блестящие) покрытия с меньшими внутренними напряжениями.

Однако в данных работах не исследовался такой важный качественный показатель покрытия, как равномерность. Использование реверсивного тока позволяет повысить равномерность гальванического покрытия за счёт периодической деполяризации катода в анодный период, а также за счёт периодической анодной обработки осажденных слоёв металла. Скорость осаждения металла за время катодного периода на участках детали, расположенных ближе к аноду, будет больше и на них толщина покрытия будет больше. Однако за анодный период большее растворение покрытия будет также на ближайших к аноду участках, так как все выступы растворяются в первую очередь, а также в связи с тем, что кривая анодной поляризации обычно более крутая, чем кривая катодной поляризации [13, 43, 45, 63, 70, 89]. Таким образом, периодическое включение реверсивного тока выравнивает неравномерное осаждение покрытия за время включения тока прямого направления.

Следовательно, используя реверсивный ток для улучшения равномерности покрытия, можно получить также улучшение других качественных характеристик. На основании этого, для повышения равномерности никелевых гальванических покрытий был выбран метод с использованием реверсивного тока.

Из приведенных выше работ можно сделать вывод о том, что нет единого мнения, какими должны быть длительности включения прямого и реверсивного тока при осаждении никелевых гальванических покрытий. Кроме того, традиционный подход к определению ограничений на длительности включения прямого и реверсивного тока заключается в проведении серии экспериментов по нанесению покрытия с определенным шагом изменения длительностей. Длительности, при

которых покрытие становится рыхлым, либо покрытие не наносится, принимаются как граничные. Такой подход требует существенных временных и материальных затрат. Также можно сделать вывод о том, что для нанесения никелевых гальванических покрытий с использованием реверсивного тока необходимо оборудование, способное выдавать импульсы прямого и реверсивного токов длительностью от единиц миллисекунд. Кроме того, такое оборудование должно быть быстродействующим для того, чтобы время переключения с прямого на реверсивный ток не оказывало влияния на сам гальванический процесс.

Широко используемые выпрямительные агрегаты не соответствуют предъявленным требованиям. Например, один из наиболее распространённых в промышленности выпрямительный агрегат «Flex Kraft» позволяет установить длительность прямого и обратного импульса от 1 секунды и более. Выпрямительный агрегат «Пульсар Про» способен выдавать импульсы прямого и реверсивного тока также от 1 секунды. Выпрямительные агрегаты серии «ТЕР», «ТВР» позволяют установить время включения тока прямой полярности от 2 секунд, а тока обратной полярности – от 0,2 секунд. Выпрямители серии «В-ТПЕ», «В-ТПВ» на базе микропроцессорных контроллеров способны выдавать импульсы тока прямой и обратной полярности длительностью от 0,1 секунды. Выпрямительный агрегат «QUASAR 500» фирмы CRSPower позволяет установить длительность прямого и обратного тока от 1 до 200 миллисекунд, т.е. отсутствует диапазон от 200 миллисекунд до 1 секунды.

Следовательно, в настоящее время оборудование с необходимыми характеристиками серийно не выпускается, а индивидуальный заказ для предприятий с небольшими объёмами производства или для исследовательских целей бюджетных учреждений является чрезмерно затратным. Необходимо разработать автоматизированную систему управления гальваническим процессом, позволяющую задавать значения прямого и реверсивного токов длительностью от 1 миллисекунды.

1.6 Постановка задачи работы

Постановка задачи данной работы звучит следующим образом. Для детали заданной формы из поступающей на обработку партии найти вектор управляющих воздействий $\bar{U} = \{\tau_{\text{п}}, \tau_{\text{об}}, N\}$, доставляющий минимум критерию неравномерности R , вычисляемый по формуле (1.1) и выполнении ограничения $\delta_{\text{min}} \geq \delta_{\text{зад}}$, где $\tau_{\text{п}}$ – длительность включения прямого тока, $\tau_{\text{об}}$ – длительность включения реверсивного тока, N – общее количество периодов включения прямого и реверсивного тока. Для достижения поставленной цели необходимо:

- построить математическую модель гальванического процесса с реверсом тока;
- осуществить экспериментальное исследование гальванического процесса для подтверждения адекватности математической модели;
- разработать методику, позволяющую находить ограничения на управляющие воздействия $\tau_{\text{п}}, \tau_{\text{об}}$;
- поставить и решить задачу оптимизации гальванических процессов с реверсом тока и найти оптимальные управления;
- разработать автоматизированную систему управления, реализующую алгоритм оптимизации гальванического процесса по выбранному критерию для прогрессивного оборудования нанесения электрохимических покрытий, а именно гальванических ванн, питаемых реверсивным током.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Проанализированы электрохимические процессы осаждения металлических покрытий. Сделан вывод, что нанесение покрытий электрохимическим методом является более предпочтительным, чем использование химических, диффузионных и других методов.

2. Рассмотрены существующие методы повышения равномерности гальванических покрытий. На основании данного анализа выбран метод повышения равномерности гальванических покрытий с использованием реверсивного тока.

3. Проанализированы основные работы, посвященные исследованию процесса нанесения никелевых покрытий с использованием реверсивного тока. Выявлено, что для данного режима не исследована зависимость равномерности покрытия от параметров реверсивного тока. Необходимо создание математической модели зависимости неравномерности гальванического покрытия от параметров реверсивного тока.

4. Исследованы характеристики широко используемых в промышленности выпрямительных агрегатов. Сделан вывод, что для процесса никелирования с использованием реверса тока необходимо создание автоматизированной системы управления, позволяющей устанавливать длительности прямого и реверсивного тока от единиц миллисекунд.

5. Поиск ограничений на управляющие воздействия с использованием серии экспериментальных исследований требует существенных материальных и временных затрат. В связи с этим, сделан вывод о том, что требуется разработать методику нахождения ограничений на управляющие воздействия без проведения большого количества экспериментальных исследований.

6. Поставлена задача разработки автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока. Данная задача включает в себя задачу разработки методики определения ограничений для управляющих воздействий и поиска оптимальных значений вектора управляющих воздействий для детали за-

данной формы с точки зрения равномерности распределения гальванических покрытий.

Глава 2 Математическое моделирование гальванических процессов с реверсом тока

2.1 Математическое моделирование процесса нанесения гальванического покрытия с реверсом тока

Для нахождения зависимости критерия неравномерности (1.1) от параметров реверсивного тока используем аналитическую модель стационарного гальванического процесса, протекающего при реверсивном токе в одноанодной ванне, рассматриваемой как объект с распределёнными координатами.

Для построения уравнений математической модели для указанного гальванического процесса примем следующие основные допущения [52].

1. В объёме электролита отсутствует градиент концентрации и температуры по линейным координатам. Электропроводность конкретного электролита χ не зависит от координат (x,y,z) . Допущение основано на том факте, что в промышленных гальванических ваннах гидродинамический режим близок к полному перемешиванию из-за барботажа электролита сжатым воздухом и выделяющимся на катоде водородом [52].

2. В диапазонах допустимых изменений концентрации компонентов и температуры электролита электропроводность χ , плотность ρ и магнитная проницаемость μ_n конкретного электролита не зависят от концентрации и температуры. Основанием для данного допущения являются обусловленные технологическими причинами малые величины диапазонов допустимых изменений концентрации и температуры электролита [52].

3. Для стационарного электрического поля влияние магнитной составляющей на движение ионов в электролите не учитывается [52].

4. Традиционное допущение о нулевом потенциале катода и положительном (относительно катода) потенциале анода [52].

В соответствии с формулой (1.1), для вычисления значения критерия неравномерности необходимо найти распределение толщины нанесённого покрытия по поверхности детали. Для этого воспользуемся законом Фарадея. Прирост толщины покрытия в точке катода с координатами (x, y, z) за время τ_n j -го включения прямого тока рассчитывается по формуле [52, 53, 72]:

$$\delta_j^+(x, y, z) = \frac{\mathcal{E}}{\rho} \eta_k i_k(x, y, z) \tau_n, \quad (2.1)$$

где \mathcal{E} – электрохимический эквивалент вещества; η_k – катодный выход по току; ρ – плотность металла покрытия; $i_k(x, y, z)$ – катодная плотность тока в точке катода с координатами (x, y, z) .

Аналогично, запишем формулу для расчета уменьшения толщины покрытия в точке на катоде с координатами (x, y, z) за время $\tau_{об}$ включения реверсивного тока [52, 53, 72]:

$$\delta_j^-(x, y, z) = -\frac{\mathcal{E}}{\rho} \eta_a i_a(x, y, z) \tau_{об}, \quad (2.2)$$

где η_a – анодный выход по току; $i_a(x, y, z)$ – анодная плотность тока в точке катода с координатами (x, y, z) .

Для нахождения распределения по поверхности детали катодной и анодной плотностей тока $i_k(x, y, z)$, $i_a(x, y, z)$ используется закон Ома в дифференциальной форме [22]:

$$i_k(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_n(x, y, z) \Big|_{S_k}, \quad (2.3)$$

$$i_a(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_{об}(x, y, z) \Big|_{S_k}, \quad (2.4)$$

где χ – удельная проводимость электролита; $\varphi_n(x, y, z)$ – потенциал электрического поля в точке детали с координатами (x, y, z) в период включения прямого тока; $\varphi_{об}(x, y, z)$ – потенциал электрического поля в точке детали с координатами (x, y, z) в период включения реверсивного тока.

Для нахождения $\varphi_n(x, y, z)$ воспользуемся уравнением из [22, 37, 87]:

$$\frac{\partial^2 \varphi_{\text{п}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{п}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{п}}}{\partial z^2} = 0. \quad (2.5)$$

Аналогично можно найти $\varphi_{\text{об}}(x, y, z)$:

$$\frac{\partial^2 \varphi_{\text{об}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{об}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{об}}}{\partial z^2} = 0. \quad (2.6)$$

В гальванической ванне во время периода включения прямого тока область распространения электрического поля, наводимого в электролите при прохождении тока, имеет следующие границы и краевые условия на них [52, 58, 72]:

- Воздух, футерованные токонепроводящие стенки и дно гальванической ванны ток не проводят, т.к. являются изоляторами. На этих границах нормальная производная потенциала будет равна нулю:

$$\left. \frac{\partial \varphi_{\text{п}}}{\partial n} \right|_{S_{\text{и}}} = 0, \quad (2.7)$$

где $S_{\text{и}}$ - площадь поверхности изолятора; n - нормаль к поверхности изолятора.

- Граница электролит-анод:

$$\varphi_{\text{п}} + F_1(i_{\text{а}}) \Big|_{S_{\text{а}}} = U_{\text{п}}, \quad (2.8)$$

где $F_1(i_{\text{а}})$ – функция анодной поляризации; $S_{\text{а}}$ – площадь поверхности анода; $U_{\text{п}}$ – напряжение между анодом и катодом во время включения прямого тока.

- Граница электролит-катод:

$$\varphi_{\text{п}} - F_2(i_{\text{к}}) \Big|_{S_{\text{к}}} = 0, \quad (2.9)$$

где $F_2(i_{\text{к}})$ – функция катодной поляризации; $S_{\text{к}}$ – площадь поверхности катода.

Запишем аналогичные краевые условия для периода включения реверсивного тока [52, 58, 72]:

- Футерованные токонепроводящие стенки ванны и границы электролит-воздух:

$$\left. \frac{\partial \varphi_{об}}{\partial n} \right|_{S_n} = 0; \quad (2.10)$$

- Граница электролит-анод:

$$\varphi_{об} + F_1(i_a) \Big|_{S_k} = U_{об}, \quad (2.8)$$

где $U_{об}$ – напряжение между анодом и катодом во время включения реверсивного тока;

- Граница электролит-катод:

$$\varphi_{об} - F_2(i_k) \Big|_{S_a} = 0. \quad (2.9)$$

Функции F_1 , F_2 в общем случае нелинейные и определяются обработкой экспериментальных данных. Для многих электролитов уже построены графики функций F_1 , F_2 и могут быть найдены в справочниках.[52, 72]

Изменение толщины покрытия за время полного j -го периода реверсивного тока равно:

$$\delta_j(x, y, z) = \delta_j^+(x, y, z) + \delta_j^-(x, y, z). \quad (2.10)$$

Таким образом, математическая модель процесса электрохимического нанесения гальванического покрытия с использованием реверсивного тока содержит уравнения, описывающие осаждение покрытия за время включения прямого тока и его растворение за время включения реверсивного тока. Система уравнений, соответствующая данной математической модели, будет включать следующие уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\mathbf{R} = \frac{1}{S_K} \int_{S_K} \frac{\delta(x, y, z) - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} dS_K, \\
\delta_{\min} = \min_{S_K} (\delta(x, y, z)), \\
\delta(x, y, z) = \sum_{j=1}^N (\delta_j^+(x, y, z) + \delta_j^-(x, y, z)), \\
\delta_j^+(x, y, z) = \frac{\partial}{\rho} \eta_K i_K(x, y, z) \tau_{\Pi}, \\
i_K(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_{\Pi}(x, y, z) \Big|_{S_K}, \\
\frac{\partial^2 \varphi_{\Pi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\Pi}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\Pi}}{\partial z^2} = 0, \\
\frac{\partial \varphi_{\Pi}}{\partial n} \Big|_{S_{\Pi}} = 0, \\
\varphi_{\Pi} + F_1(i_a) \Big|_{S_a} = U_{\Pi}, \\
\varphi_{\Pi} - F_2(i_K) \Big|_{S_K} = 0, \\
\delta_j^-(x, y, z) = -\frac{\partial}{\rho} \eta_a i_a(x, y, z) \tau_{\text{об}}, \\
i_a(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_{\text{об}}(x, y, z) \Big|_{S_K}, \\
\frac{\partial^2 \varphi_{\text{об}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{об}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{\text{об}}}{\partial z^2} = 0, \\
\frac{\partial \varphi_{\text{об}}}{\partial n} \Big|_{S_{\Pi}} = 0, \\
\varphi_{\text{об}} + F_1(i_a) \Big|_{S_K} = U_{\text{об}}, \\
\varphi_{\text{об}} - F_2(i_K) \Big|_{S_a} = 0.
\end{array} \right. \quad (2.11)$$

Систему уравнений (2.11) нельзя решать аналитически. Для решения используются численные методы решения уравнений эллиптического типа. Универсальным методом приближенного решения дифференциальных уравнений является метод конечных разностей (метод сеток) [21, 29, 47, 86, 87].

Суть метода конечных разностей состоит в следующем. Производится замена непрерывного аргумента на дискретный. При этом область определения дискретного аргумента будет множеством точек, называемым сеткой. Аналогично, функции непрерывного аргумента заменяются на функции дискретного аргумента с областью определения в узлах сетки. Для замены производных в дифференциальных уравнениях используются разностные отношения, записываемые в соответствии с определением производной.

Для численного решения уравнения Лапласа с краевыми условиями применим метод расщепления [65]. Для этого разобьём пространство гальванической ванны сеткой в прямоугольных координатах таким образом, чтобы по координатам x и z сетка была равномерной, а по координате y – неравномерной (рис. 2.1).

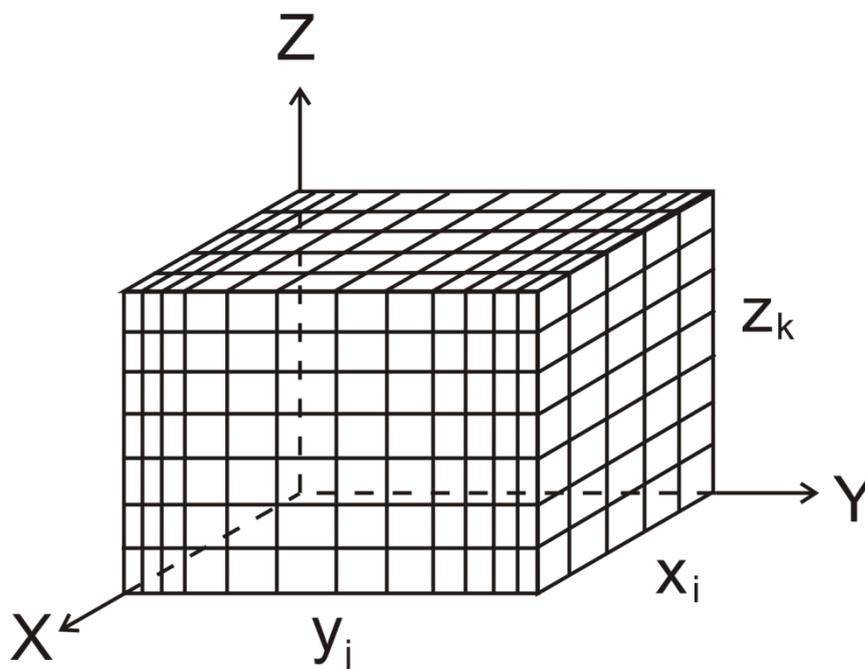


Рис. 2.1. Разбиение пространства гальванической ванны сеткой в прямоугольных координатах

Использование неравномерной сетки необходимо в связи с расчетом с более мелким шагом растворения покрытия в окрестностях катода. При указанном разбиении точки в пространстве гальванической ванны будут определяться следующим образом:

$$x_i = ih_x, i = 0, 1, \dots, n_1, \quad (2.12)$$

$$y_0 = 0, y_j = \sum_{p=1}^j h_y(p), j = 1, 2, \dots, n_2, \quad (2.13)$$

$$z_k = kh_z, k = 0, 1, \dots, n_3, \quad (2.14)$$

где n_1, n_2, n_3 – количество интервалов разбиения отрезков по координатам x, y, z соответственно; h_x, h_z – шаг сетки соответственно по координатам x и z ; $h_y(p)$ – шаг неравномерной сетки по координате y (зависит от координаты).

В результате, пространство гальванической ванны будет рассечено плоскостями, параллельными плоскостям XOY (рис. 2.2) и YOZ (рис. 2.3).

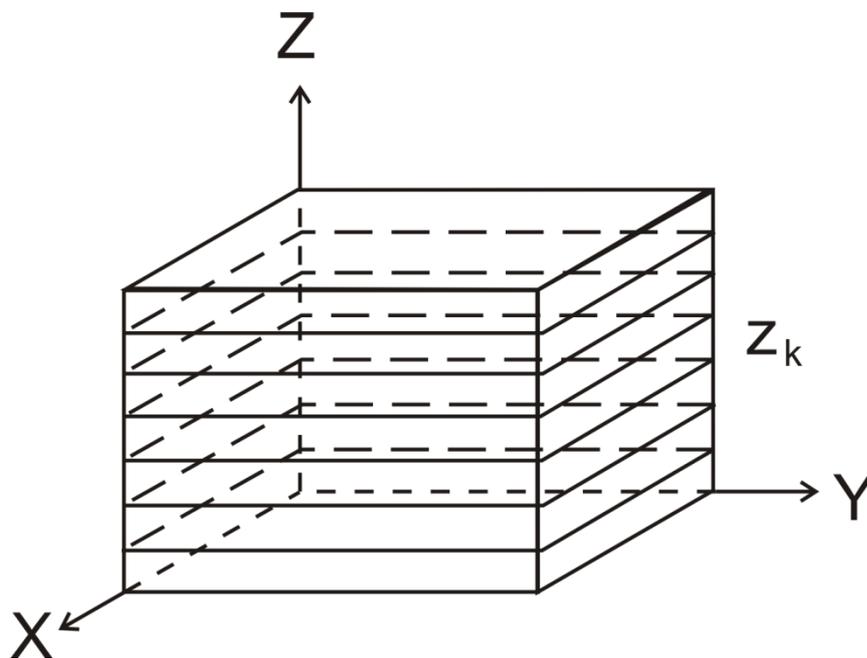


Рис. 2.2. Разбиение пространства гальванической ванны горизонтальными плоскостями

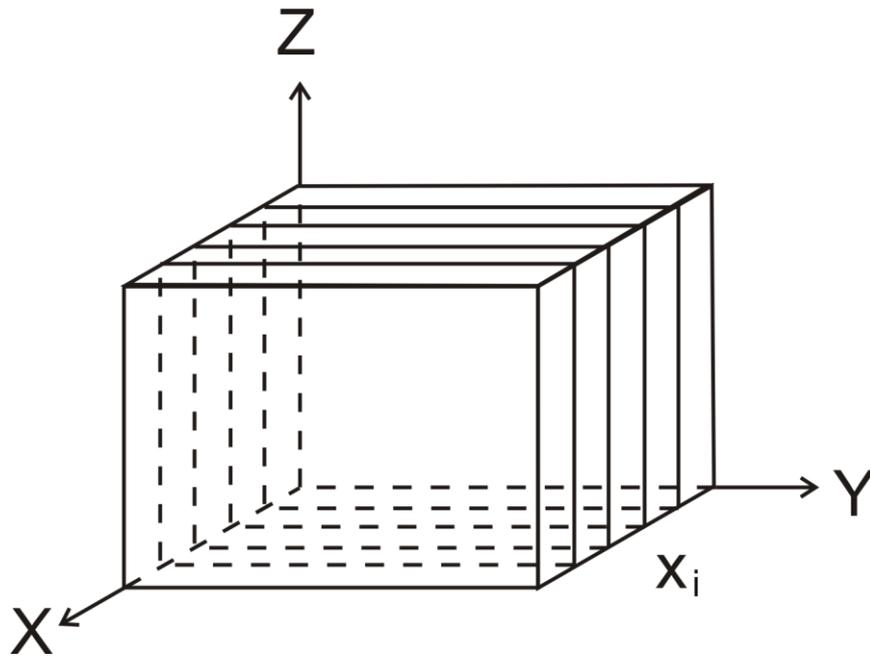


Рис. 2.3. Разбиение пространства гальванической ванны вертикальными плоскостями

В каждой горизонтальной плоскости, параллельной плоскости XOY задача (2.5) с краевыми условиями (2.7)-(2.9) заменяется следующей двумерной задачей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \\ \varphi + F_1(i_a(x, y, z))|_{S_a} = U_a, \\ \varphi - F_2(i_k(x, y, z))|_{S_k} = 0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{S_i} = 0. \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Значение потенциала в узлах сетки с координатами (x,y,z), полученное как решение задачи (2.15), обозначим $\varphi^h(x,y,z)$.

В каждой вертикальной плоскости, параллельной плоскости YOZ, задача (2.5) с краевыми условиями (2.7)-(2.9) заменяется следующей двумерной задачей:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \\ \varphi + F_1(i_a(x, y, z))|_{S_a} = U_a, \\ \varphi - F_2(i_k(x, y, z))|_{S_k} = 0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{S_n} = 0. \end{cases} \quad (2.16)$$

Значение потенциала в узлах сетки с координатами (x, y, z) , полученное как решение задачи (2.16), обозначим $\varphi^v(x, y, z)$.

Решение задачи (2.5) с краевыми условиями (2.7)-(2.9) будем вычислять как среднее арифметическое значений $\varphi^h(x, y, z)$ и $\varphi^v(x, y, z)$:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{\varphi^h(x, y, z) + \varphi^v(x, y, z)}{2}.$$

Для решения задач (2.15), (2.16) применяется ряд методов: метод Ньютона, метод функций Грина, метод конечных элементов, метод конформных отображений, метод конечных разностей и др. Использование данных методов затрудняется тем, что они работают только с линейными краевыми условиями третьего рода. Наиболее подходящими для решения задач (2.15), (2.16) из указанных методов являются методы конечных элементов и конечных разностей. В связи с тем, что уравнение поля задано в дифференциальной форме, задачи (2.15), (2.16) целесообразно решать методом конечных разностей [15, 77, 78, 82, 83, 88].

Для решения задач (2.15), (2.16) в данной работе используется метод верхней релаксации с прогонкой по строке [23, 24, 39, 74, 79 – 81].

Рассмотрим алгоритм решения задачи (2.15) (задача (2.16) решается аналогично) [59]. На построенной сетке производится замена дифференциального уравнения на разностную систему алгебраических уравнений. Ограничения для аргументов системы уравнений (2.15) представляют собой прямоугольную область D :

$$D = \left\{ \begin{array}{l} x_0 \leq x \leq x_{n1} \\ y_0 \leq y \leq y_{n2} \end{array} \right\},$$

значения x_i, y_j которой определяются из соотношений (2.12), (2.13).

Функция $\varphi(x,y)$ непрерывного аргумента заменяется на построенной сетке сеточной функцией $\varphi(x_i,y_j)$, обозначенной $\varphi_{i,j}$.

Поскольку в системе уравнений (2.15) имеются производные второго порядка, для замены их разностным уравнением необходимо использовать пятиточечный шаблон (рис. 2.4).

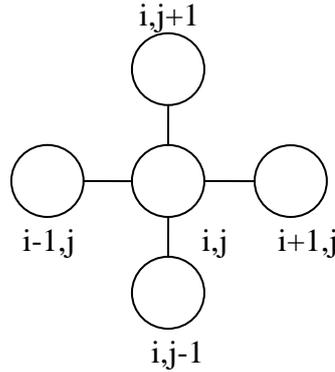


Рис. 2.4. Схема пятиточечного шаблона

Тогда система (2.15) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{\varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j+1}}{h_y^2(j)} = 0, \\ \frac{\varphi_{2,j} - \varphi_{1,j}}{h_x} = 0, \\ \frac{\varphi_{n_1,j} - \varphi_{n_1-1,j}}{h_x} = 0, \\ \frac{\varphi_{i,1} + \varphi_{i,2}}{2} + F_1\left(\frac{\varphi_{i,2} - \varphi_{i,1}}{h_y(1)}\right) = U_a, \\ \frac{\varphi_{i,n_2} + \varphi_{i,n_2-1}}{2} - F_2\left(\frac{\varphi_{i,n_2} - \varphi_{i,n_2-1}}{h_y(n_2)}\right) = 0. \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Систему (2.17) нельзя решать как систему алгебраических уравнений, так как краевые условия содержат нелинейные функциональные зависимости F_1 и F_2 .

Решения системы уравнений (2.17) необходимо начать с задания начального приближения функции распределения катодной плотности тока:

$$i_k^0(j) = \frac{\Phi_{j,n_2} - \Phi_{j,n_2-1}}{h_y(n_2)}, j = 1, \dots, n_1$$

и точности выполнения краевого условия ε_1 . Перед началом процедуры прогонки задаётся начальное приближение функции $\Phi_{i,j}^0$ во всех узлах сетки и величина ε_2 критерия окончания итерационного процесса для метода прогонки.

С помощью метода прогонки для всех внутренних строк $j=2, \dots, n_2 - 1$ решается уравнение:

$$\Phi_{i-1,j}^{(k+0.5)} - 2\Phi_{i,j}^{(k+0.5)} \left(1 + \frac{h_x^2}{h_y^2(j)} \right) + \Phi_{i+1,j}^{(k+0.5)} = \frac{h_x^2}{h_y^2(j)} (\Phi_{i,j+1}^{(k+0.5)} + \Phi_{i,j+1}^{(k)}),$$

где k – номер итерации, а промежуточная $(k + 0,5)$ -ая итерация используется для повышения точности результата [52, 72].

Далее вычисляются коэффициенты прогонки P_i и $Q_{i,j}$ следующим образом.

$$P_1=1, Q_{1,j}=0.$$

Для всех $j=2, i=2, \dots, n_1$:

$$P_i = \frac{1}{2 + 2 \frac{h_x^2}{h_y^2(2)} - \gamma_i \frac{h_x^2}{h_y^2(2)} - P_{i-1}},$$

$$Q_{i,2} = \frac{h_x^2}{h_y^2(2)} ((\Phi_{i,3}^{(k)} - \gamma_{1,i}) + Q_{i-1,2}) P_i,$$

где

$$\gamma_i = \begin{cases} \frac{h_x + 2F_1 \left(\frac{\Phi_{i,2}^{(k)} - \Phi_{i,1}^{(k)}}{h_y(1)} \right)}{2F_1 \left(\frac{\Phi_{i,2}^{(k)} - \Phi_{i,1}^{(k)}}{h_y(1)} \right) - h_x}, & \text{если } i \text{ – ая точка приходится на анод,} \\ 1, & \text{если } i \text{ – ая точка приходится на изолятор.} \end{cases}$$

$$\gamma_{1,i} = \begin{cases} \frac{2h_x U_a}{2F_1 \left(\frac{\varphi_{i,2}^{(k)} - \varphi_{i,1}^{(k)}}{h_y(1)} \right) - h_x}, & \text{если } i \text{ – ая точка приходится на анод,} \\ \frac{h_x U_a}{F_1 \left(\frac{\varphi_{i,2}^{(k)} - \varphi_{i,1}^{(k)}}{h_y(1)} \right)}, & \text{если } i \text{ – ая точка приходится на изолятор.} \end{cases}$$

Для $j=3, \dots, n_2-1, i=2, \dots, n_1$:

$$P_i = \frac{1}{2 + 2 \frac{h_x^2}{h_y^2(j)} - P_{i-1}},$$

$$Q_{i,j} = P_i \left(Q_{i-1,j} + \frac{h_x^2}{h_y^2(j)} (\varphi_{i,j+1}^{(k)} + \varphi_{i,j}^{(k)}) \right).$$

Для $j=n_2, i=2, \dots, n_1$:

$$P_i = \frac{1}{2 + 2 \frac{h_x^2}{h_y^2(n_2)} - \gamma_{2,i} \frac{h_x^2}{h_y^2(n_2)} - P_{i-1}},$$

$$Q_{i,n_2} = P_i \left(\frac{h_x^2}{h_y^2(n_2)} (\varphi_{i,n_2-1}^{(k)} + Q_{i-1,n_2}) \right),$$

где

$$\gamma_{2,i} = \begin{cases} \frac{h_x + 2F_2 \left(\frac{\varphi_{i,n_2-1}^{(k)} - \varphi_{i,n_2}^{(k)}}{h_y(n_2)} \right)}{2F_2 \left(\frac{\varphi_{i,n_2-1}^{(k)} - \varphi_{i,n_2}^{(k)}}{h_y(n_2)} \right) - h_x}, & \text{если } i \text{ – ая точка приходится на катод,} \\ 1, & \text{если } i \text{ – ая точка приходится на изолятор.} \end{cases}$$

Значения функции для $i=n_1-1, \dots, 1$ вычисляются по формулам обратной прогонки:

$$\varphi_{n_1,j}^{(k+0.5)} = \frac{Q_{n_1,j}}{1 + P_{n_1}},$$

$$\varphi_{i,j}^{(k+0.5)} = P_i \varphi_{i+1,j}^{(k+0.5)} + Q_{i,j}.$$

Значения функции $\varphi_{i,j}^{(k+1)}$ вычисляются по формуле верхней релаксации:

$$\varphi_{i,j}^{(k+1)} = \varphi_{i,j}^{(k)} + PP(\varphi_{i,j}^{(k+0.5)} - \varphi_{i,j}^{(k)}),$$

где PP – релаксационный параметр [52, 72]. Его значение взято равным 1.5.

Найдем наибольшее из значений расстояний между функциями $\varphi^{(k+1)}$ и $\varphi^{(k)}$ найдем по формуле:

$$\Delta_j^{(k+1)} = \max_{2 \leq i \leq n_1} |\varphi_{i,j}^{(k+1)} - \varphi_{i,j}^{(k)}|.$$

Признаком завершения итерационного процесса будет выполнение следующего условия:

$$\max_{2 \leq j \leq n_2} (\Delta_j^{(k+1)}) \leq \varepsilon_2 \max_{2 \leq j \leq n_2} (\Delta_j^{(k+1)}). \quad (2.18)$$

Если условие (2.18) выполняется, то $(k+1)$ -е приближение считается решением разностного уравнения (2.17) для произвольно заданного начального приближения функции распределения плотности тока на катоде $i_k^0(j), j=1, \dots, n_1$. По рассчитанным значениям φ_{i,n_1} и φ_{i,n_1-1} вычисляется распределение плотности тока на катоде $i_k^1(j), j=1, \dots, n_1$ для первой итерации.

Расстояние между функциями плотности тока на катоде на текущей и предыдущей итерации вычисляется по формуле:

$$\Delta_k = \max_{1 \leq j \leq n_1} |i_k^1(j) - i_k^0(j)|. \quad (2.19)$$

Признаком завершения вычислений для метода прогонки будет выполнение следующего условия:

$$\Delta_k \leq \varepsilon_1. \quad (2.20)$$

При выполнении краевого условия (2.20) решение краевой задачи считается найденным с заданной точностью ε_1 выполнения нелинейного краевого условия. В противном случае осуществляется переприсваивание $i_k^0 = i_k^1$ и повторяется процедура прогонки [52, 72].

С помощью языка программирования Delphi 2007 была разработана программа решения системы уравнений математической модели (2.11). Главным бло-

ком программы является процедура решения дифференциального уравнения Лапласа на основе описанного выше метода верхней релаксации с прогонкой по строке.

Для проверки адекватности математической модели (2.11) и правильности методики её решения необходимо провести экспериментальные исследования и сравнить их результаты с рассчитанными с помощью математической модели при тех же параметрах системы.

2.2 Проведение экспериментальных исследований и проверка адекватности математической модели

В экспериментальном исследовании изучалось воздействие времени полного периода осаждения покрытия и его катодной составляющей на равномерность распределения никелевых гальванических покрытий.

Исходя из [41], для получения твёрдых никелевых гальванических покрытий из электролита Уоттса с использованием реверса тока необходимо, чтобы полный период осаждения находился в границах от 10 до 100 [с], при этом длительность включения прямого тока должна составлять от 80 до 95%. Данные границы изменения варьируемых параметров согласуются с возможностями широко используемых выпрямительных агрегатов и были использованы для первой части экспериментальных исследований.

Простейшим способом планирования экспериментов является использование сеточного метода. Его суть состоит в том, что для каждого параметра отрезки допустимых значений разбиваются с определённым шагом, зависящим от количества разбиений отрезка. Недостатком данного метода является то, что получаемая сетка будет оптимальной только при одном параметре. При увеличении числа параметров для получения адекватной оценки их влияния на исследуемый критерий может потребоваться проведение большой серии экспериментов [84, 85]. Использование произвольного выбора исследователем пробных узлов в многомерных

областях часто приводит к негативным результатам из-за отсутствия у человека многомерной геометрической интуиции.

Для решения задачи планирования экспериментальных исследований используется методика, описанная в [72, 84, 85]. Эта методика используется для получения плана экспериментального исследования в виде поля с равномерной плотностью распределения точек по всем параметрам. Подобное распределение узлов внутри многомерной области позволяет максимально повысить ценность каждого узла и информационную насыщенность планируемой серии экспериментов в целом.

Равномерно распределенной в произвольном n -мерном параллелепипеде Π со сторонами, параллельными координатным граням, считается последовательность $S_N(\Pi) = P_1, \dots, P_i, \dots$ ($1 \leq i \leq N$), для которой выполняется условие

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_N(\Pi)}{N} = V_\Pi \quad (V_\Pi - \text{объем параллелепипеда } \Pi).$$

Наилучшими характеристиками равномерности среди равномерно распределенных последовательностей обладают ЛПт-последовательности.[85] Последовательность точек P_1, \dots, P_i, \dots n -мерного куба называется ЛПт-последовательностью, если любой её двоичный участок, содержащий не менее $2^{\tau+1}$ точек, представляет собой Пт-сетку. Пт-сеткой называется

сетка, состоящая из $N=2^v$ точек n -мерного куба, если любому двоичному параллелепипеду Π_k с объёмом $V_{\Pi_k} = \frac{2^\tau}{N}$ принадлежат 2^τ точек сетки ($v > \tau$).[84, 85] Хорошим распределением в объёме n -мерной области обладают последовательности, составленные не менее чем из 14-15 точек.[84]

Метод составления равномерно распределенных последовательностей, описанный в [84], был применен для составления плана экспериментальных исследований. Каждая отдельно взятая точка последовательности – это набор из значений двух параметров – длительности полного периода импульса T , измеряемого в секундах, и его катодной составляющей η_k , указанной в процентах. Значения параметров для каждого эксперимента указаны в табл. 3.1.

Таблица 2.1 – План экспериментальных исследований

№ опыта	T, с	η_k , %	τ_p , с	$\tau_{об}$, с
1	10	90	9	1
2	16	94	15	1
3	21	89	19	2
4	27	85	23	4
5	33	91	30	3
6	38	83	32	6
7	44	86	37	7
8	49	88	43	6
9	55	88	48	7
10	61	87	52	9
11	66	82	54	12
12	72	92	66	6
13	78	84	65	13
14	89	93	83	6

В экспериментах использовался электролит Уоттса, имеющий следующий состав: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 280...300 г/л, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 50...70 г/л, H_3BO_3 – 30...40 г/л. Использование именно этого электролита обусловлено тем, что это наиболее распространённый в промышленности электролит никелирования.

В качестве анода использовался никелевый электрод с сечением в виде квадрата площадью 0,1 дм². Катоды представляли собой стальные пластины в форме квадрата площадью 0,1 дм². Детали полностью погружались в полипропиленовую ванну, заполненную приготовленным электролитом. Размеры ванны – 15 × 10 × 7 см. Расстояние между анодом и катодом составляло 4,5 см.

Детали обезжиривались моющим средством в холодной воде. Затем промывались в холодной воде в непроточной ванне. Далее происходило травление в течение 10 минут в 30% растворе соляной кислоты. Затем следовала промывка детали в холодной воде и горячая промывка в течение двух минут в дистиллированной воде непосредственно перед нанесением покрытия.

Питание гальванической ванны осуществлялось от высокоточного программируемого выпрямительного агрегата Flex Kraft FLX-01. Катодная и анодная плотности тока были равны 5 А/дм^2 . Температура электролита поддерживалась равной 52°С . Электролит перемешивался сжатым воздухом с помощью барботёра. Время нанесения покрытия составляло 50 минут.

Измерение толщины нанесённых никелевых гальванических покрытий производилось с помощью толщиномера «Константа К5». Поверхность детали разбивалась равномерной сеткой с шагом в 2 мм. В узлах полученной сетки проводились по три измерения. Толщину покрытия в узле получали как среднее арифметическое трёх измерений. Полученные значения толщины покрытия заносились в программу Microsoft Excel.

Для сглаживания результатов экспериментов, значения толщины покрытия в узлах сетки обрабатывались методом скользящего среднего по трём точкам. Далее по формуле (1.1) вычислялся критерий неравномерности R. Найденные значения критерия неравномерности приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты экспериментов

№ опыта	$\tau_{\text{п}}, \text{с}$	$\tau_{\text{об}}, \text{с}$	R
1	9	1	0,272
2	15	1	0,208
3	19	2	0,257
4	23	4	0,248
5	30	3	0,236
6	32	6	0,269
7	37	7	0,265

Таблица 2.2 – Продолжение

8	43	6	0,282
9	48	7	0,291
10	52	9	0,251
11	54	12	0,224
12	66	6	0,227
13	65	13	0,225
14	83	6	0,203

В качестве примера на рис. 2.5 показано распределение никелевого гальванического покрытия по поверхности стальной детали в форме квадрата 30x30 мм, полученного в эксперименте №14, в котором достигнута наименьшая неравномерность покрытия, равная 0,203. Минимальная толщина покрытия равна 25 мкм.

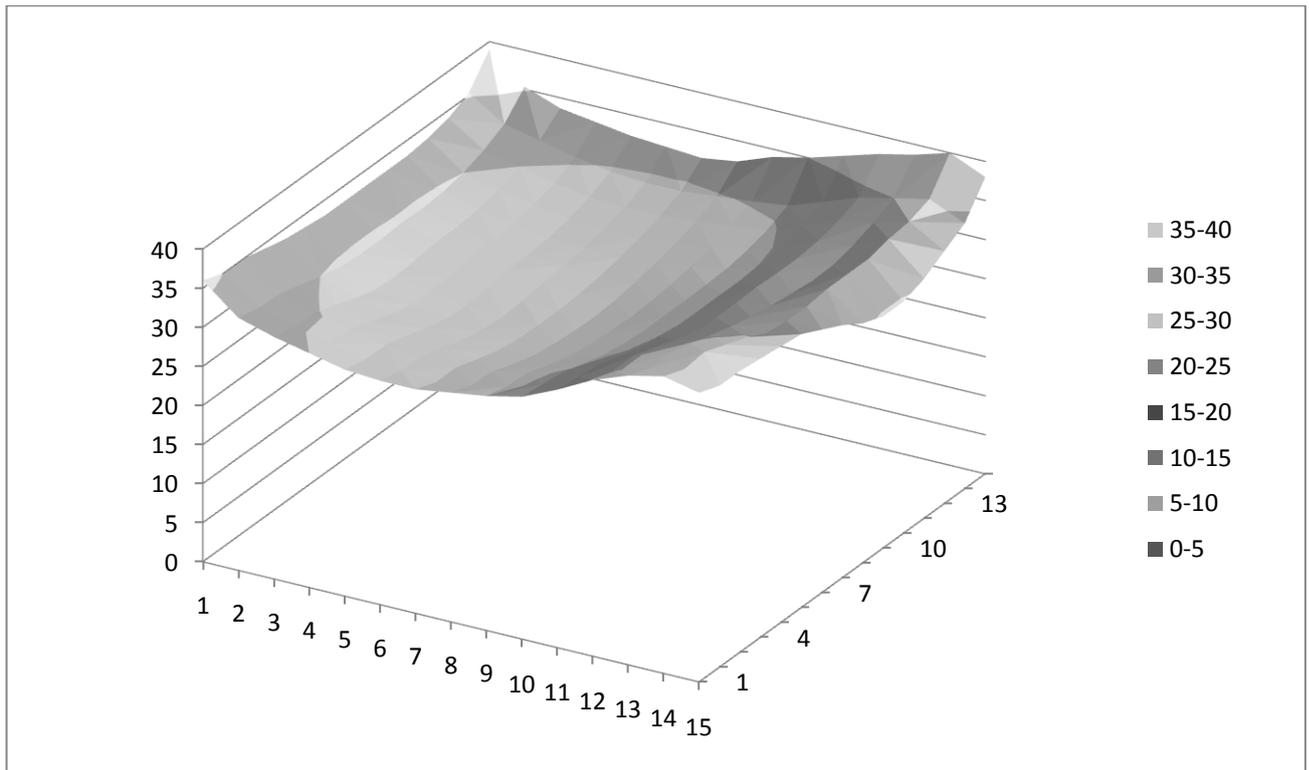


Рис. 2.5. Распределение никелевого покрытия на экспериментальном образце №14

Полученные покрытия имели светлый цвет. Поверхность была матовой.

Для оценки улучшения равномерности покрытия был проведен эксперимент по нанесению никелевого гальванического покрытия из электролита Уоттса с использованием только постоянного тока плотностью 5 А/дм^2 . Время нанесения покрытия составило 50 минут. Распределение покрытия на экспериментальном образце показано на рис. 2.6. Критерий неравномерности, рассчитанный по формуле (1.1), составил $R=0,248$. Минимальная толщина покрытия равна 26 мкм. Улучшение неравномерности составило 18%.

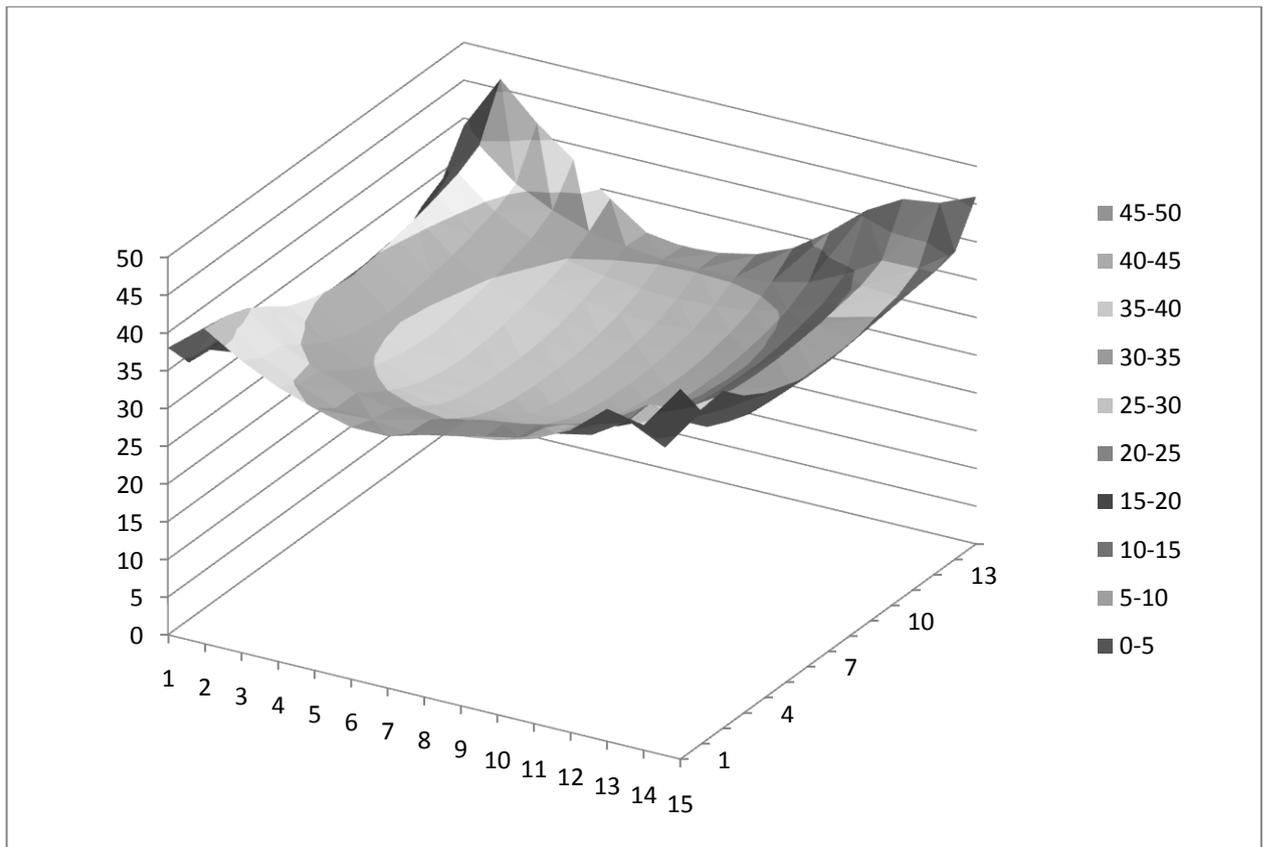


Рис. 2.6. Распределение никелевого покрытия при осаждении постоянным током

Согласно исследованиям [13, 94], для получения светлых твёрдых полублестящих и блестящих никелевых гальванических покрытий с использованием реверсивного тока длительность прямого импульса должна быть не более 2 [с], при этом длительность обратного импульса – от 4 до 50% от длительности прямого. Однако в данных исследованиях не была исследована равномерность полученных

покрытий при таких малых значениях длительности прямого и обратного импульса вследствие ограниченных возможностей серийного оборудования.

Как было указано в главе 1, широко используемые в промышленности и научных исследованиях выпрямительные агрегаты не соответствуют предъявленным требованиям.

Заказ предприятию-изготовителю выпрямительного агрегата, способного выдавать импульсы прямого и обратного тока от единиц миллисекунд, при плотности тока не менее 5 А/дм^2 , является чрезмерно затратным для предприятий с небольшими объёмами производства или для исследовательских целей. Следовательно, необходимо создать устройство, которое позволит улучшить характеристики существующих выпрямительных агрегатов.

Для улучшения характеристик выпрямительных агрегатов нами было разработано устройство – мостовой инвертор [54, 61]. Схема мостового инвертора представлена на рис. 2.7.

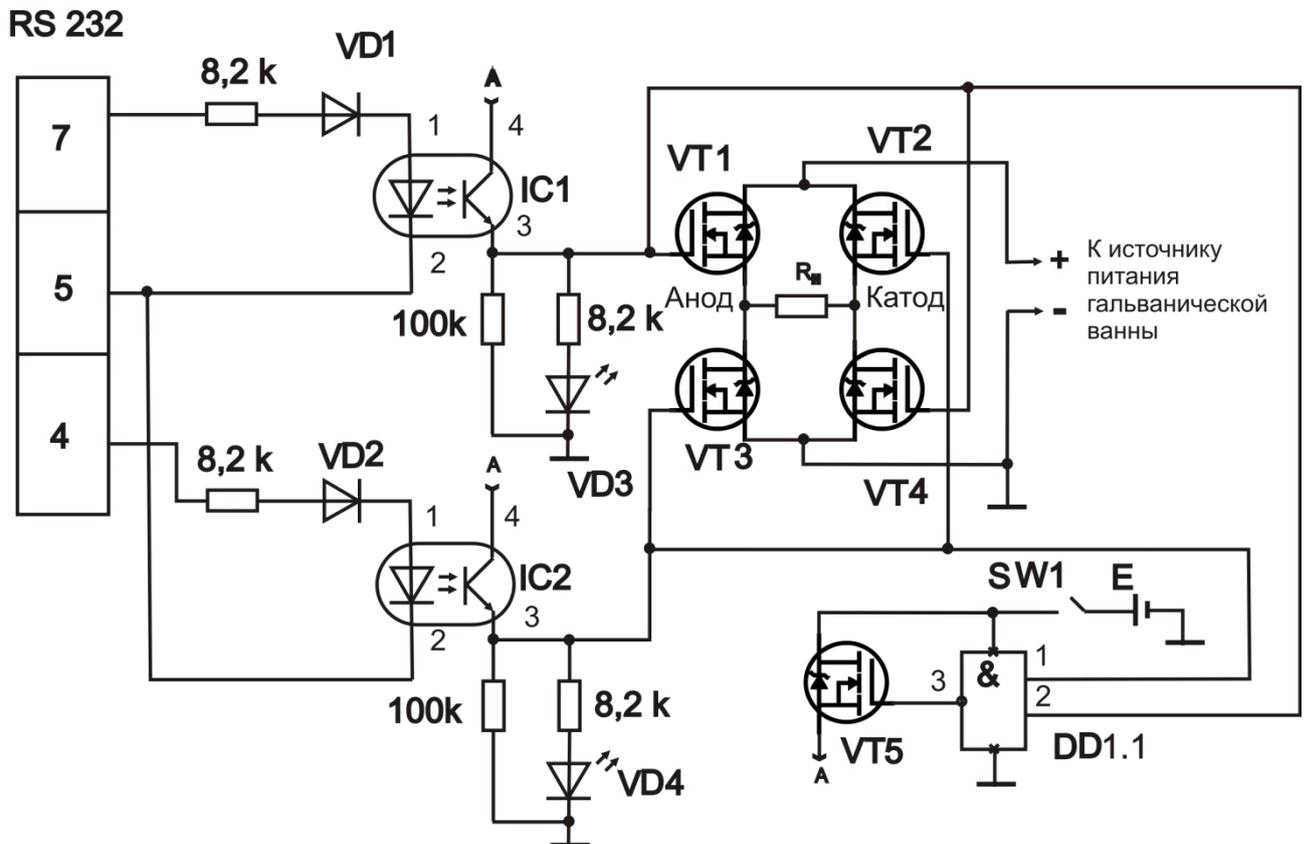


Рис. 2.7. Принципиальная электрическая схема мостового инвертора

Устройство работает следующим образом. Анод и катод гальванической ванны, обозначенные на схеме R_n , подключаются к диагонали моста, состоящего из MOSFET-транзисторов VT1-VT4. Выпрямительный агрегат (источник питания нагрузки R_n) подключается ко второй диагонали моста с соблюдением полярности, указанной на рис. 2.7. Транзисторы VT1-VT4 управляются компьютером (один из COM-портов) через оптоэлектронные ключи управления IC1 и IC2, что обеспечивает гальваническую развязку между компьютером и выпрямительным агрегатом.

Пусть режим работы R_n , при котором потенциал напряжения на аноде выше, чем на катоде, будет прямым, тогда режим работы, при котором потенциал напряжения на катоде будет выше, чем на аноде, будет реверсивным.

Для реализации прямого режима устройство управления через ключ управления IC1 открывает MOSFET-транзисторы VT1 и VT4 и через ключ управления IC2 закрывает MOSFET-транзисторы VT2 и VT3. В этом случае положительный потенциал выпрямительного агрегата подаётся на анод через открытый VT1, а отрицательный – на катод через открытый VT4. Таким образом, потенциал на аноде будет выше, чем на катоде, следовательно, устройство R_n будет работать в прямом режиме.

Для реализации реверсивного режима устройство управления через ключ управления IC1 закрывает MOSFET-транзисторы VT1 и VT4 и через ключ управления IC2 открывает MOSFET-транзисторы VT2 и VT3. В этом случае положительный потенциал выпрямительного агрегата подаётся на катод через открытый VT2, а отрицательный – на анод через открытый VT3. Таким образом, потенциал на катоде будет выше, чем на аноде, следовательно, устройство R_n будет работать в реверсивном режиме.

Из описания алгоритма работы мостового инвертора видно, что ключи IC1 и IC2 должны работать в оппозитном режиме. Для его надёжной реализации питание IC1 и IC2 осуществляется от источника питания E через элементы VT5 и

DD1.1. Для отключения устройства предназначен выключатель SW1, при этом на ключи управления IC1 и IC2 напряжение питания не поступает. В этом случае, вследствие высокого сопротивления закрытых транзисторов VT1-VT4, через R_n будет проходить ток утечки порядка микроампер. Светодиоды VD3 и VD4 предназначены для визуального контроля работы устройства.

Большой ассортимент мощных MOSFET- транзисторов и их низкая стоимость позволяют создавать варианты аппаратной части системы в зависимости от необходимых токовых режимов. Например, MOSFET-транзистор IRF1324S-7PPbF (International Rectifier, США) обеспечивает постоянный ток стока 303А при температуре корпуса 100 °С и максимальную рассеиваемую мощность 300 Вт, при этом цена у производителя \$2.46. В изготовленном устройстве в качестве VT1-VT5 применялись широко распространённые IRF3710 (ток стока 57А), IC1-IC2-PC817, DD1.1- CD 4011BP. Розничная стоимость комплектующих составила 194 руб.

Так как MOSFET-транзистор является прибором, управляемым напряжением, то амплитуда напряжения на аноде и катоде и длительность заданного режима зависит от амплитуды напряжения и длительности импульса, формируемого устройством управления и передаваемого через ключи управления IC1 и IC2 на затворы MOSFET- транзисторов VT1-VT4. Это легко реализует применение цифровых устройств управления, таких как ПЭВМ, что позволяет более точно формировать длительности режима, а применение микроконтроллеров (например, микроконтроллерных плат Arduino) позволяет при необходимости осуществлять сложные алгоритмы управления амплитудой и полярностью напряжения на R_n (в том числе несимметричные). Устройство подключается к персональному компьютеру по интерфейсу RS-232, либо подключается по интерфейсу USB через конвертер USB-COM. Для управления системой создана программа (среда разработки Delphi 2007).

В программе задаются порт управления устройством, длительности прямого и обратного импульса, а также общее время нанесения покрытия. Также програм-

ма имеет кнопки запуска и остановки процесса нанесения покрытия. Работа программы проверялась под управлением операционной системы Windows XP/ 7/ 8.

Для проведения экспериментальных исследований при малой длительности импульса тока использовался тот же электролит, что и в первой части опытов. Плотность тока и условия нанесения покрытия так же были идентичными.

Найденные значения критерия неравномерности приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Эксперименты при малой длительности импульса

№ опыта	$\tau_{п}, с$	$\tau_{об}, с$	R
1	2	0,2	0,218
2	0,4	0,04	0,204
3	0,04	0,004	0,201

В результате использования малых длительностей прямого и обратного тока были получены светлые полублестящие покрытия. На рис. 2.8 показано распределение покрытия на образце с наименьшей неравномерностью покрытия. Минимальная толщина покрытия составила 27 мкм.

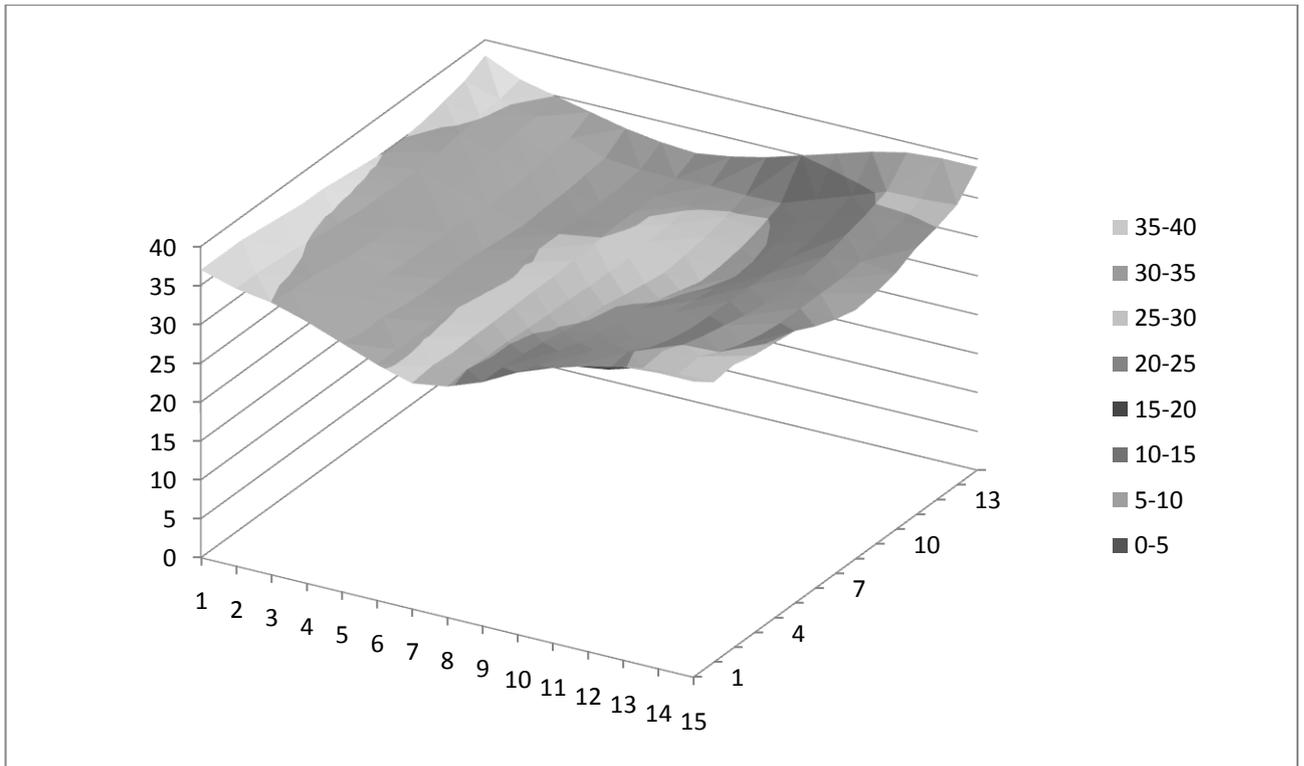


Рис. 2.8. Распределение покрытия при малых длительностях импульсов

Адекватность математической модели была проверена путём сравнения распределения никелевых гальванических покрытий по поверхности пластин размером 30x30 мм, полученных в результате экспериментальных исследований и вычисленных посредством математической модели при тех же параметрах системы. Для проведения вычислительного эксперимента были заданы следующие значения параметров процесса: напряжение прямого тока $U_k = 1,1$ В; напряжение реверсивного тока $U_a = 1,0$ В; время нанесения покрытия $T_{\text{общ}} = 50$ минут; удельная проводимость электролита $\chi = 0,2 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$. Катодный и анодный выходы по току взяты равными $\eta_k = \eta_a = 0,95$ [89].

При расчётах были использованы графики катодной и анодной поляризации, приведенные в [68]. На рис. 2.9 представлен график катодной поляризации.

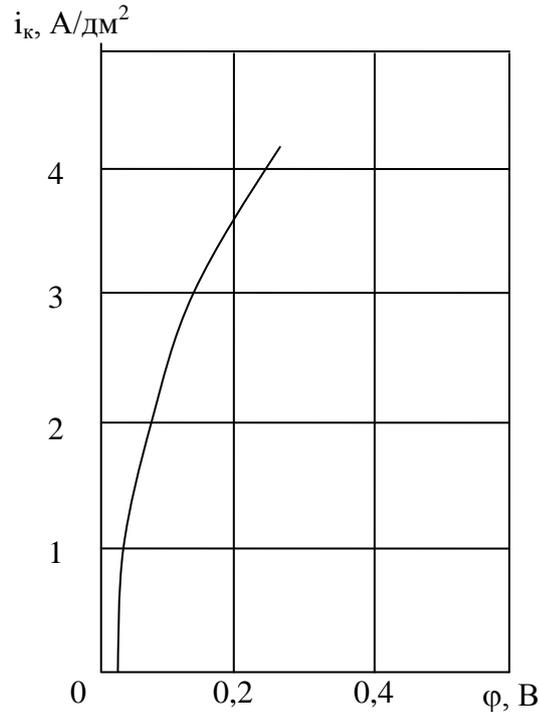


Рис. 2.9. Кривая катодной поляризации никеля в электролите Уоттса

В расчётах использовали нелинейную функцию катодной поляризации, полученную аппроксимацией табличных данных из [68] в системе компьютерной алгебры Mathcad 15:

$$F_2(i_k) = 8,32 \cdot 10^{-3} e^{0,847i_k} + 0,042. \quad (2.21)$$

Погрешность аппроксимации вычислялась по формуле

$$\Delta_2 = \frac{1}{n_2} \sqrt{\sum_{j=1}^{n_2} \left(\frac{F_{2,j}^T - F_{2,j}^P}{F_{2,j}^T} \right)^2} \cdot 100\%, \text{ где } n_2 - \text{ количество точек табличных данных, } F_{2,j}^T -$$

j -ое табличное значение функции катодной поляризации, $F_{2,j}^P$ - j -ое расчетное значение функции катодной поляризации. Погрешность аппроксимации составила 0,6%.

График функции анодной поляризации представлен на рис. 2.10.

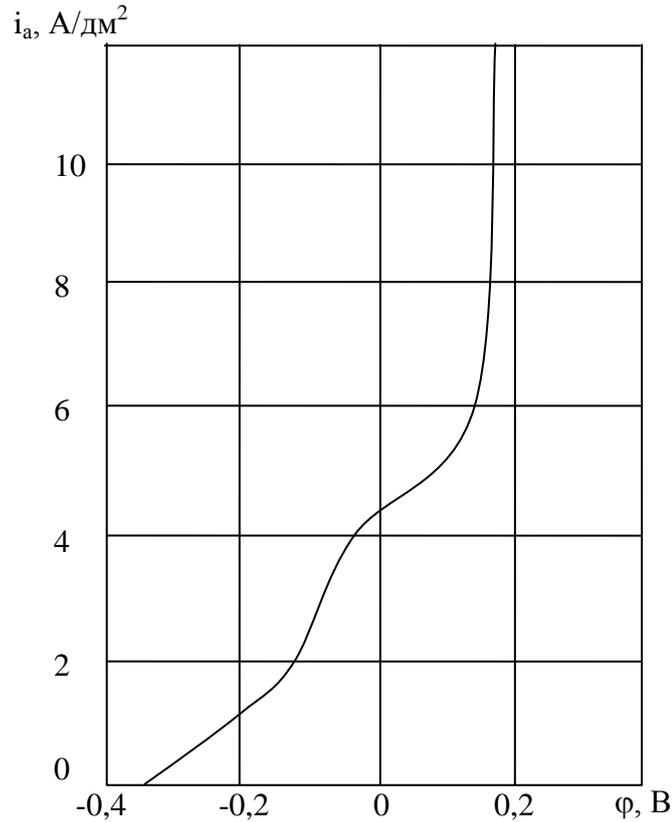


Рис. 2.10. Кривая анодной поляризации никеля в электролите Уоттса

Аналитически функция анодной поляризации была найдена аппроксимацией табличных данных из [68] с помощью Mathcad 15 в следующем виде:

$$F_1(i_a) = 1,736 \cdot e^{i_a - 16} + 0,055 \ln(i_a + 1) - \frac{0,37}{i_a + 1}. \quad (2.22)$$

Погрешность аппроксимации вычислялась по формуле

$$\Delta_1 = \frac{1}{n_1} \sqrt{\sum_{j=1}^{n_1} \left(\frac{F_{1,j}^T - F_{1,j}^P}{F_{1,j}^T} \right)^2} \cdot 100\%, \text{ где } n_1 - \text{ количество точек табличных данных, } F_{1,j}^T -$$

j -ое табличное значение функции анодной поляризации, $F_{1,j}^P$ - j -ое расчетное значение функции анодной поляризации. Погрешность аппроксимации составила 22%.

Значения длительностей включения прямого и реверсивного тока выбирались из табл. (2.2), (2.3). Величина шага сетки при исследовании распределения покрытия на катоде была принята равной 2 мм.

При сравнении результатов расчётов и экспериментальных исследований средняя относительная погрешность рассчитывалась по формуле:

$$\Delta = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{15} \left(\frac{\delta_{\text{э}}(i, j) - \delta_{\text{р}}(i, j)}{\delta_{\text{э}}(i, j)} \right)^2} \cdot 100\%, \quad (2.23)$$

где i, j – координаты точки исследования на пластине-катоде; n – общее количество точек; $\delta_{\text{э}}(i, j)$, $\delta_{\text{р}}(i, j)$ – экспериментальное и расчетное значения толщины покрытия в точке катода с координатами i, j .

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчётов по формуле (2.23) показало, что величина средней относительной погрешности не превышает 21,3%. Поскольку погрешность прибора неразрушающего контроля «Константа К5», с использованием которого производилось измерение толщины покрытия, составляет $10\% \pm 1$ мкм, математическую модель можно считать адекватной.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Построена математическая модель процесса нанесения гальванического покрытия с использованием реверсивного тока. Для решения системы уравнений, описывающей математическую модель, разработана программа, реализующая метод верхней релаксации с прогонкой по строке.

2. Проведены экспериментальные исследования при длительностях включения прямого и реверсивного тока более 1 секунды. В результате получены матовые светлые никелевые гальванические покрытия. Наибольшая равномерность среди осажденных покрытий на 18% больше, чем при использовании только прямого тока.

3. Для проведения экспериментальных исследований при длительностях прямого и реверсивного тока менее 1 секунды было разработано устройство (мостовой инвертор), позволяющее использовать существующие выпрямительные агрегаты в режиме реверсирования тока с длительностью включения прямого и обратного тока от 1 мс.

4. Благодаря использованию мостового инвертора, проведены экспериментальные исследования при длительностях прямого и обратного тока менее 1 секунды. Получены полублестящие светлые никелевые гальванические покрытия. Равномерность покрытий улучшена на 19% по сравнению с использованием только прямого тока.

5. Проведена проверка адекватности математической модели. На основании сопоставления погрешности прибора неразрушающего контроля и средней относительной погрешности математической модели сделан вывод о том, что модель является адекватной.

Глава 3 Оптимизация процессов нанесения гальванических покрытий с реверсом тока

Анализ теоретических основ гальваностегии и опубликованных работ [13, 49, 52, 56, 62, 72], а также результаты проведённых экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что характер зависимости равномерности распределения гальванического покрытия от длительности прямого $\tau_{\text{п}}$ и обратного $\tau_{\text{об}}$ периодов реверсивного тока является экстремальным. Следовательно, это позволяет провести поиск оптимальных значений $\tau_{\text{п}}$ и $\tau_{\text{об}}$ при которых критерий неравномерности гальванического покрытия будет минимален.

Для осуществления такого поиска необходима математическая постановка задачи, основанная на физико-химических закономерностях гальванического процесса и устанавливающая связь составляющих критерия неравномерности покрытия и управляющих воздействий.

3.1 Математическая постановка задачи оптимизации гальванических процессов с реверсом тока

Рассмотрим математическую постановку задачи оптимизации гальванических процессов с реверсом тока для выявления связи между управляющими воздействиями $\tau_{\text{п}}$ и $\tau_{\text{об}}$ и критерием неравномерности покрытия.

Запишем математическую постановку задачи оптимизации гальванических процессов с реверсом тока.

Расчёт распределения толщины покрытия $\delta(x, y, z)$ по поверхности катода с площадью $S_{\text{к}}$ в этом случае будет производиться в соответствии с законом Фарадея по следующим уравнениям:

$$\delta(x, y, z) = \sum_{j=1}^N (\delta_j^+(x, y, z) + \delta_j^-(x, y, z)), \quad (5.1)$$

$$\delta_j^+(x, y, z) = \frac{\Theta}{\rho} \eta_{\text{к}} i_{\text{к}}(x, y, z) \tau_{\text{п}},$$

$$\delta_j^-(x, y, z) = -\frac{\mathcal{E}}{\rho} \eta_a i_a(x, y, z) \tau_{об},$$

где $\delta_j^+(x, y, z)$ – прирост толщины покрытия в точке детали с координатами (x, y, z) в течение j -го «прямого» включения тока за прямой период $\tau_{п}$, а $\delta_j^-(x, y, z)$ – уменьшение толщины покрытия за счет электрохимического растворения в точке детали (x, y, z) в течение j -го «реверсивного» включения тока за обратный период $\tau_{об}$, \mathcal{E} – электрохимический эквивалент, ρ – плотность металла покрытия, $\eta_{к}$ – катодный выход по току, η_a – анодный выход по току, $i_{к}(x, y, z)$ – катодная плотность тока в точке покрытия детали с координатами (x, y, z) , $i_a(x, y, z)$ – анодная плотность тока в точке в точке покрытия детали с координатами (x, y, z) .

Расчёт плотности тока $i_{к}$, i_a на поверхности детали-катода $S_{к}$ производится по закону Ома в дифференциальной форме:

$$i_{к}(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_{п}(x, y, z) \Big|_{S_{к}},$$

$$i_a(x, y, z) = -\chi \text{grad} \varphi_{об}(x, y, z) \Big|_{S_{к}},$$

где χ – удельная проводимость электролита.

Распределение потенциала в гальванической ванне рассчитывается по уравнению Лапласа, одинаковому для периодов включения прямого и реверсивного тока:

$$\frac{\partial^2 \varphi_{п}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{п}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{п}}{\partial z^2} = 0, \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial z^2} = 0. \quad (5.3)$$

Уравнение (5.2) имеет следующие граничные условия:

$$\frac{\partial \varphi_{п}}{\partial n} \Big|_{S_{п}} = 0,$$

$$\varphi_{п} + F_1(i_a) \Big|_{S_a} = U_{п},$$

$$\varphi_{п} - F_2(i_{к}) \Big|_{S_{к}} = 0.$$

Уравнение (5.3) имеет аналогичные граничные условия:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varphi_{об}}{\partial n} \Big|_{S_n} &= 0, \\ \varphi_{об} + F_1(i_a) \Big|_{S_k} &= U_{об}, \\ \varphi_{об} - F_2(i_k) \Big|_{S_a} &= 0.\end{aligned}$$

В качестве целевой функции используется критерий равномерности R , вычисляемый по следующей формуле:

$$\begin{aligned}R &= \frac{1}{S_k} \int_{S_k} \frac{\delta(x, y, z) - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} dS_k, \\ \delta_{\min} &= \min_{S_k}(\delta(x, y, z)),\end{aligned}$$

где δ_{\min} – минимально допустимая по техническим условиям для конкретного технологического процесса толщина наносимого покрытия.

Задача оптимизации гальванического процесса с реверсом тока заключается в том, что необходимо найти вектор управляющих воздействий $\bar{U} = \{\tau_n, \tau_{об}, N\}$, доставляющий минимум критерию неравномерности R при выполнении уравнений связи в виде математической модели и выполнении ограничения $\delta_{\min} \geq \delta_{зад}$. Для выполнения последнего условия необходимо найти общее время нанесения покрытия $T_{общ}$, которое рассчитывается по формуле:

$$T_{общ} = N(\tau_n + \tau_{об}). \quad (5.4)$$

Итоговая толщина покрытия в каждой точке детали зависит от общего количества N периодов включения прямого и реверсивного тока. Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо определить значение N .

Перепишем выражение (5.1) в следующем виде:

$$\delta(x, y, z) = (\delta_j^+(x, y, z) + \delta_j^-(x, y, z)) \cdot N.$$

Тогда значение N^* , при котором будет выполнено условие $\delta_{\min} = \delta_{зад}$, будет вычислено следующим образом:

$$N^* = \left\lceil \frac{\delta_{зад}}{\min_{(x, y, z)} (\delta^+(x, y, z) + \delta^-(x, y, z))} \right\rceil.$$

Подставив найденное значение N^* в формулу (5.4), будет найдено общее время нанесения покрытия, при котором выполняется условие $\delta_{\min} = \delta_{\text{зад}}$.

Кроме того, для решения поставленной задачи, как видно из (5.4), требуется выяснить следующий вопрос: существуют ли ограничения для величин $\tau_{\text{п}}$ и $\tau_{\text{об}}$? Основываясь на том положении, что рассматриваемый в данной работе процесс нанесения гальванического покрытия использует такие общепринятые определения как «время прямого периода» и «время обратного периода» можно утверждать, что такой процесс является частотным и, следовательно, как всякий технический процесс имеет спектр частот. В свою очередь, это предполагает, что должна быть граничная частота, которая ведёт к ограничению величин $\tau_{\text{п}}$ и $\tau_{\text{об}}$, так как они по определению обратно пропорциональны частоте.

В главе 2 было показано, что исследователи [13, 41, 94] предлагают устанавливать разные ограничения на длительности прямого и реверсивного тока для получения твёрдых осадков в режиме с реверсированием тока. Перечисленные работы основываются только на экспериментальных исследованиях конкретного гальванического процесса с определённой концентрацией компонентов электролита. Анализ работ, посвященных изучению гальванических процессов с реверсом тока, показал, что, аналитические математические модели для определения предельной частоты для физической реализации электрохимической системы процесса нанесения покрытия отсутствуют.

Для решения этой задачи сделаны следующие утверждения и действия:

- верхняя граница длительностей прямого и обратного периодов задаётся на основании того, что за все время нанесения покрытия должен быть совершён по крайней мере один полный период процесса:

$$\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{об}} \leq T_{\text{общ}}. \quad (3.1)$$

- для определения нижней границы длительностей прямого и реверсивного тока была разработана методика определения предельной частоты гальванического процесса в режиме с реверсом тока.

На рис. 3.1 показан анализ гальванического процесса с реверсом тока как объекта управления. Гальваническая ванна является технологическим объектом управления (ТОУ). Температура электролита в гальванической ванне поддерживается постоянной с помощью регулятора температуры. Концентрация компонентов электролита, согласно принятому допущению при описании математической модели, не изменяется во время нанесения покрытия. Единственным возмущающим воздействием данной системы является воздействие $F_{н.ф.}$ от поступления на обработку партии деталей новой формы. Форма детали может быть задана различными способами с использованием методов аналитической геометрии; алгебрологических, канонических, рецепторных или каркасных моделей. Например, при использовании каркасной модели форма задаётся в виде совокупности координат узлов объёмной сетки на поверхности детали $\{x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots x_m, y_m, z_m\}$, где m – число узлов. Для детали новой формы необходимо найти новые значения вектора управляющих воздействий \bar{U} , который содержит следующие компоненты: длительность включения прямого тока, длительность включения реверсивного тока, количество общих периодов включения прямого и реверсивного тока. Толщина покрытия в точках (x, y, z) катода является выходной величиной.

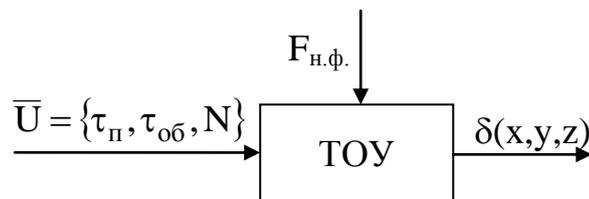


Рис. 3.1. Анализ гальванического процесса с реверсом тока как объекта управления

3.2 Теоретическое определение граничной частоты гальванического процесса с применением реверсивного тока

Для определения нижней границы длительностей прямого и реверсивного тока рассмотрим эквивалентную схему электрохимической системы [27], показанную на рис. 3.2.

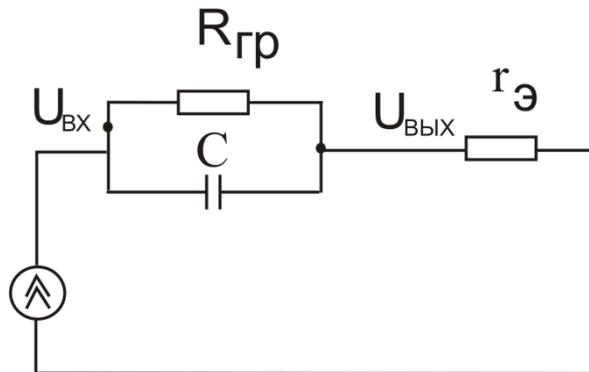


Рис. 3.2. Эквивалентная схема электрохимической системы

На рис.3.2: $R_{гр}$ – активное сопротивление межфазовой границы электрод-электролит (Фарадеево сопротивление); $r_э$ – активное сопротивление электролита; C – ёмкость межфазовой границы электрод-электролит; $U_{вх}$ – входное напряжение (напряжение источника питания гальванической ванны); $U_{вых}$ – выходное напряжение (падение напряжения на электролите). Ёмкость C по определению имеет комплексное сопротивление Z_C .

Для нахождения предельной частоты гальванического процесса необходимо найти полосу пропускания эквивалентной схемы электрохимической системы.

Полосой пропускания цепи называют интервал частот, в пределах которого квадрат модуля передаточной функции (т.е. коэффициент передачи энергии) изменяется не более чем в 2 раза.[25]

Для нахождения полосы пропускания цепи используем соотношение:

$$K(\omega) = U_{вых} / U_{вх}, \quad (3.2)$$

где $K(\omega)$ – передаточная функция, ω – циклическая частота процесса.

Применим к схеме на рис. 3.1 метод комплексных сопротивлений. В этом случае выходное напряжение рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{вых}} = i_{\text{ст}} r_3, \quad (3.3)$$

где $i_{\text{ст}}$ – стабилизированный ток питания гальванической ванны.

С учётом того, что:

$$\frac{1}{R_{\text{гп}}} + \frac{1}{Z_C} = \frac{Z_C + R_{\text{гп}}}{R_{\text{гп}} \cdot Z_C}$$

получаем:

$$i_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{вх}}}{\frac{R_{\text{гп}} \cdot Z_C}{Z_C + R_{\text{гп}}} + r_3},$$

где Z_C – комплексное сопротивление ёмкости C .

Следовательно, входное напряжение можно вычислить по формуле:

$$U_{\text{вх}} = i_{\text{ст}} \left(\frac{R_{\text{гп}} Z_C}{R_{\text{гп}} + Z_C} + r_3 \right). \quad (3.4)$$

Подставив (3.3), (3.4) в (3.2) получим:

$$K(\omega) = \frac{r_3}{\frac{R_{\text{гп}} Z_C}{R_{\text{гп}} + Z_C} + r_3}. \quad (3.5)$$

Комплексное сопротивление Z_C рассчитывается по формуле:

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C}, \quad (3.6)$$

где i – мнимая единица.

Подставим выражение (3.6) в (3.5):

$$K(\omega) = \frac{r_3 (1 + R_{\text{гп}} i\omega C)}{r_3 (1 + R_{\text{гп}} i\omega C) + R_{\text{гп}}}. \quad (3.7)$$

Выделив в выражении (3.7) действительную и мнимую части, получим:

$$K(\omega) = \frac{r_3 (R_{\text{гп}} + r_3 + R_{\text{гп}}^2 r_3 (\omega C)^2)}{(R_{\text{гп}} + r_3)^2 + (R_{\text{гп}} r_3 \omega C)^2} + i \frac{R_{\text{гп}}^2 r_3 \omega C}{(R_{\text{гп}} + r_3)^2 + (R_{\text{гп}} r_3 \omega C)^2}. \quad (3.8)$$

Из выражения (3.8) можно найти модуль передаточной функции, равный:

$$|K(\omega)| = \sqrt{\left(\frac{r_3(R_{rp} + r_3 + R_{rp}^2 r_3 (\omega C)^2)}{(R_{rp} + r_3)^2 + (R_{rp} r_3 \omega C)^2}\right)^2 + \left(\frac{R_{rp}^2 r_3 \omega C}{(R_{rp} + r_3)^2 + (R_{rp} r_3 \omega C)^2}\right)^2}. \quad (3.9)$$

Таким образом, получено аналитическое выражение зависимости модуля передаточной функции эквивалентной схемы электрохимической системы от параметров этой системы. Зная значения параметров, входящих в правую часть выражения (3.9) можно найти значение модуля передаточной функции. А приравняв значение модуля передаточной функции к 0,5, можно вычислить предельную циклическую частоту $\omega_{пр}$ исследуемого гальванического процесса. С учётом того, что $\omega_{пр} = 2\pi f_{пр}$, можно найти предельную частоту процесса $f_{пр}$ и соответствующие ей предельные для исследуемого процесса длительности $\tau_n, \tau_{об}$.

Из выражения (3.9) следует, что необходимо найти значения величин R_{rp}, r_3, C . Трудность заключается в том, что эти величины невозможно определить прямыми измерениями, однако в любом случае межфазовая граница может быть сведена к эквиваленту параллельной RC-цепи. При этом в момент отключения тока питания гальванической ванны напряжение на электролите, являющимся активным сопротивлением, исчезает практически мгновенно, в то время, как напряжение на RC-цепи в этот момент времени останется прежним и только потом начнёт снижаться из-за разряда ёмкости C [27].

Для решения этой задачи, в соответствии с данными, приведенными в работе [27], при подаче ступенчатого воздействия (функции Хевисайда) в режиме стабилизированного тока с использованием разработанного мостового инвертора, в данном случае выполняющего роль высокоскоростного твердотельного реле, снимается характеристика зависимости реакции электрохимической системы во времени от воздействия заднего фронта ступенчатого воздействия (функции Хевисайда), показанная на рис.3.3. Решение о том, что будет исследована реакция электрохимической системы при воздействии именно заднего фронта функции Хевисайда было принято по следующим соображениям:

1. В качестве источника питания гальванической ванны используется электронный стабилизатор тока, поэтому при использовании переднего фронта ступенчатого воздействия неизбежны помехи из-за выхода стабилизатора на рабочий режим.

2. Согласно данным в работе [27], поведение комплексных электрохимических сопротивлений эквивалентно и при включении и при выключении тока.

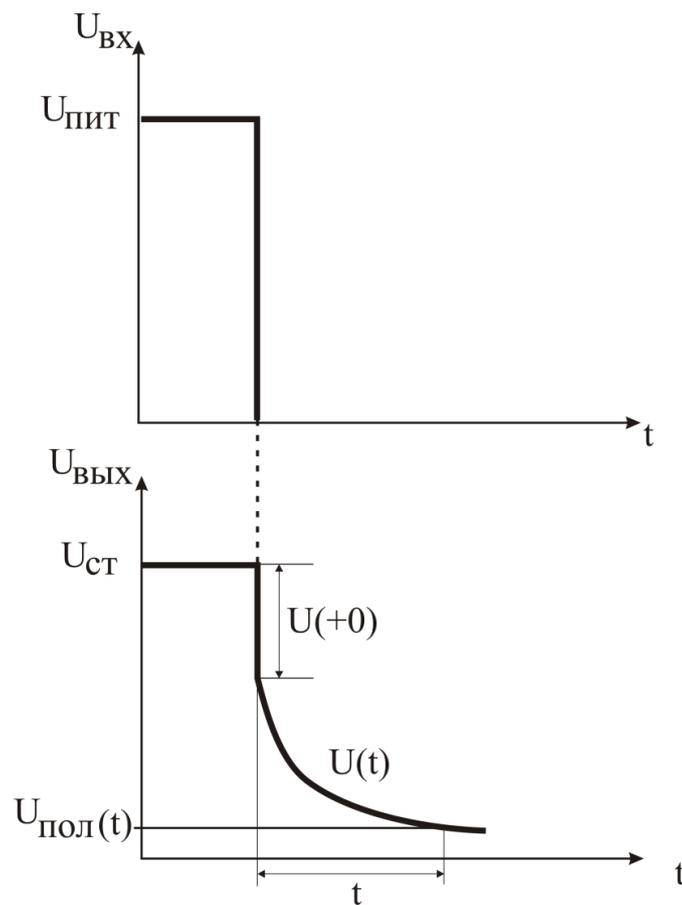


Рис. 3.3. Теоретический график реакции гальванической системы на единичное воздействие

После выключения тока, ёмкость C разряжается на сопротивление $R_{гр}$ от напряжения $(U_{СТ}-U(+0))$ до напряжения поляризации $U_{ПОЛ}(t)$ за время t , где $U_{СТ}$ – напряжение на выходе в момент его отключения, а $U(+0)$ - падение напряжения на активном сопротивлении электролита.

Разрядный ток в этом случае равен [27]:

$$i_c = C \frac{dU_{\text{пол}}(t)}{dt} = -\frac{U_{\text{пол}}(t)}{R_{\text{гр}}}. \quad (3.10)$$

Преобразуем уравнение (3.10) к виду:

$$-\frac{dU_{\text{пол}}}{U_{\text{пол}}} = \frac{dt}{R_{\text{гр}}C}. \quad (3.11)$$

Так как в (3.11) произведение $R_{\text{гр}}C$ является постоянным, получаем:

$$t = R_{\text{гр}}C \ln \frac{U_{\text{ст}}}{U_{\text{пол}}(t)} = R_{\text{гр}}C \ln \frac{U(+0)}{U_{\text{пол}}(t)}. \quad (3.12)$$

Из формулы (3.12) можно найти значение $R_{\text{гр}}C$:

$$R_{\text{гр}}C = \frac{t}{\ln \frac{U(+0)}{U_{\text{пол}}(t)}}. \quad (3.13)$$

Согласно [27], активное сопротивление электролита равно:

$$r_3 = \frac{U(+0)}{i_{\text{ст}}}. \quad (3.14)$$

Активное сопротивление межфазовой границы электрод-электролит равно:

$$R_{\text{гр}} = \frac{U_{\text{ст}}}{i_{\text{ст}}} - r_3. \quad (3.15)$$

Подставив (3.15) в (3.13) найдем ёмкость межфазовой границы электрод-электролит:

$$C = \frac{t}{R_{\text{гр}} \ln \frac{U(+0)}{U_{\text{пол}}(t)}}. \quad (3.16)$$

Таким образом, найдены значения параметров в выражении (3.9), следовательно, может быть найдена предельная частота процесса $f_{\text{пр}}$.

Тогда ограничение на значения длительности прямого и реверсивного тока составит:

$$\frac{1}{f_{\text{пр}}} \leq \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{обр}} \leq T_{\text{общ}}. \quad (3.17)$$

Таким образом, необходимо найти такие значения τ_n , $\tau_{обр}$, при которых $R \rightarrow \min$, при ограничениях (3.17). Значение R является решением системы уравнений (2.11).

Для используемой в работе электрохимической системы, параметры которой указаны в гл.2, были найдены следующие предельные длительности прямого и реверсивного тока: $\tau_n = 4 \cdot 10^{-3}$ с, $\tau_{обр} = 9 \cdot 10^{-4}$ с.

Рассмотрим возможные методы решения задачи оптимизации и выберем из них наилучший.

Методы нулевого порядка используют только значения функции и не требуют вычисления её производных [8, 11, 33, 44, 47]. При использовании методов нулевого порядка от целевой функции не требуется дифференцируемости и, более того, она может быть не задана в аналитическом виде.

Метод равномерного поиска является простейшим из методов оптимизации нулевого порядка и состоит в следующем. Отрезок $[a; b]$ области определения функции $f(x)$ разбивается на конечное число n равных частей точками деления $x_i = a + i(b - a)/n$, $i=0, \dots, n$. Вычислив значения $f(x)$ в точках x_i , путём сравнения найдём точку x_m , $0 \leq m \leq n$, для которой $f(x_m) = \min_{0 \leq i \leq n} f(x_i)$.

Погрешность определения точки минимума функции $f(x)$ методом равномерного поиска не превосходит величины $\varepsilon_n = \frac{b-a}{n}$. Пусть реализация метода равномерного поиска потребовала N вычислений функции $f(x)$. Это означает, что отрезок $[a; b]$ был разбит на $n = N - 1$ частей и достигнутая точность определения точки минимума составила $\varepsilon_n = \varepsilon_{N-1}$. Поэтому точность решения $\varepsilon(N)$, которую обеспечивает метод равномерного поиска в результате N вычислений $f(x)$, будет

$$\varepsilon(N) = \frac{b-a}{N-1}. \quad (3.18)$$

Методами оптимизации нулевого порядка также являются методы исключения отрезков (метод дихотомии, метод золотого сечения и т.д.). Данные методы применяются для унимодальных функций. Функция $f(x)$ называется унимодаль-

ной на отрезке $[a; b]$, если она непрерывна на $[a; b]$ и существуют числа α и β , $a \leq \alpha \leq \beta \leq b$, такие, что

- 1) если $a < \alpha$, то на отрезке $[a; \alpha]$ функция $f(x)$ монотонно убывает;
- 2) если $\beta < b$, то на отрезке $[\beta; b]$ функция $f(x)$ монотонно возрастает;
- 3) при $x \in [\alpha; \beta]$ $f(x) = \min_{[a; b]} f(x)$.

Применительно к нашей задаче данные методы не подходят в силу того, что для функции R не выполняется приведенное выше условие унимодальности.

Методы Хука-Дживса, Нелдера-Мида являются методами безусловной оптимизации и не подходят для решения исходной задачи. Кроме того, метод Нелдера-Мида находит локальный минимум, а выбор нового начального симплекса увеличит временные затраты. Метод градиентного спуска и другие методы оптимизации первого порядка неприменимы в связи с невозможностью дифференцирования целевой функции R .

Стохастические методы оптимизации (метод Монте-Карло, метод имитации отжига, эволюционные алгоритмы и др.) требуют для своего выполнения большого числа итераций. Кроме того, в силу вероятностной природы данных методов оптимизации возможен случай, когда метод будет находить только локальный экстремум. Поэтому при использовании данных методов необходимо совершать несколько проходов оптимизации и следить за тем, к какому значению сходятся результаты. Учитывая вышесказанное и принимая во внимание тот факт, что для вычисления целевой функции R применяются численные методы, требующие значительных вычислительных ресурсов, применение стохастических методов существенно замедлит процесс поиска оптимальных значений.

Метод равномерного поиска позволяет преодолеть такие проблемы целевой функции, как наличие оврагов и локальных экстремумов. Но с точки зрения объёма вычислений – это самый затратный метод.

Таким образом, будем решать задачу оптимизации методом равномерного поиска. Для этого разобьём временной интервал, задающий ограничения на длительность включения прямого и реверсивного тока на два:

- 1) $\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{об}} \in \left[\frac{1}{f_{\text{ип}}}; 1 \right];$
- 2) $\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{об}} \in [1; T_{\text{общ}}].$

Первый отрезок разобьём на K_1 равных частей. Значение K_1 выбирается исходя из точности нахождения оптимального решения (3.18). В точках деления отрезка вычисляются значения критерия неравномерности и путём сравнения находят значения $\tau_{\text{п}}^m, \tau_{\text{об}}^m$, для которых:

$$R(\tau_{\text{п}}^m, \tau_{\text{об}}^m) = \min_{1 \leq i \leq K_1} R(\tau_{\text{п}}^i, \tau_{\text{об}}^i). \quad (3.19)$$

Второй отрезок также разделим равномерно на K_2 частей, причем $K_1=K_2$. Аналогично, найдем значения $\tau_{\text{п}}^k, \tau_{\text{об}}^k$, для которых:

$$R(\tau_{\text{п}}^k, \tau_{\text{об}}^k) = \min_{1 \leq i \leq K_2} R(\tau_{\text{п}}^i, \tau_{\text{об}}^i). \quad (3.20)$$

Оптимальное значение неравномерности будет найдено путём сравнения значений из (3.19), (3.20):

$$R_{\text{min}} = R(\tau_{\text{п}}^*, \tau_{\text{об}}^*) = \min_{i \in \{m, k\}} R(\tau_{\text{п}}^i, \tau_{\text{об}}^i).$$

На языке программирования Delphi 2007 была написана программа, реализующая указанный алгоритм оптимизации гальванического процесса. Входными данными для программы являются предельная частота процесса, рассчитываемая по изложенной методике, количество точек разбиения отрезка ограничения, зависящее от точности расчёта, а также минимальная заданная толщина покрытия. Происходит расчёт времени, необходимого для нанесения покрытия заданной толщины и определяется верхняя граница длительности одного периода. По математической модели рассчитывается равномерность получаемого в итоге покрытия. По завершении перебора программа выдаёт оптимальные значения длительностей включения прямого и обратного тока, общее время нанесения покрытия, оптимальное значение критерия равномерности. На рис. 3.4 представлен интерфейс программы расчёта оптимальных параметров процесса.

Работа программы проверялась в системах Windows XP/Vista/7. Был осуществлён поиск оптимальных значений длительностей включения прямого и обратного тока для процесса нанесения никелевого гальванического покрытия на стальную пластину из электролита Уоттса в режиме с реверсированием тока. Размеры пластины-катода и никелевого анода приняты равными 30x30 мм. Для проведения расчётов были заданы: напряжение прямого тока $U_k = 1,1$ В; напряжение реверсивного тока $U_a = 1,0$ В; удельная проводимость электролита $\chi = 0,2 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$. Катодный и анодный выходы по току взяты равными $\eta_k = \eta_a = 0,95$. Для расчёта анодной и катодной поляризации применялись функции, полученные в главе 2. Время расчёта оптимальных параметров составило 3440 секунд.

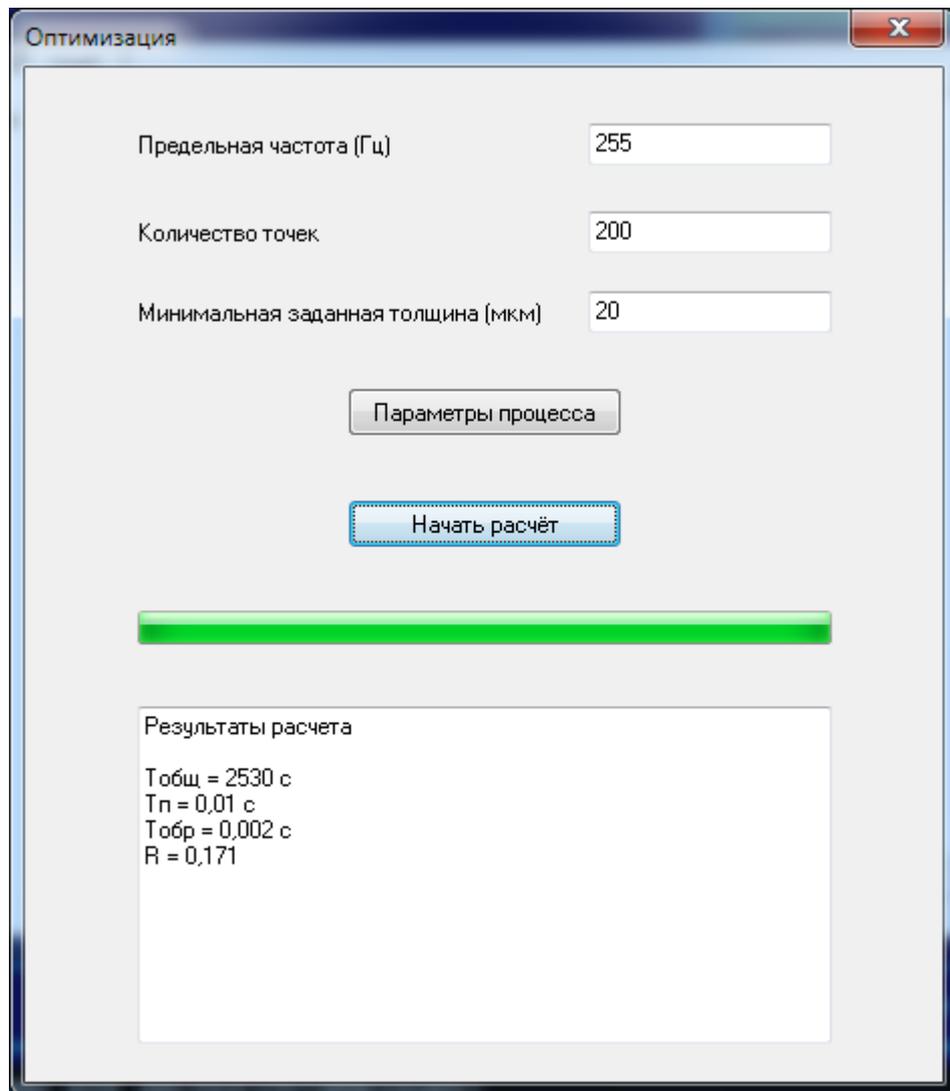


Рис. 3.4. Интерфейс программы расчёта оптимальных управлений

В результате расчёта были получены следующие оптимальные значения длительностей включения прямого и реверсивного тока: $\tau_{\text{п}} = 10$ мс, $\tau_{\text{об}} = 2$ мс. Критерий равномерности составил: $R = 0,171$.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Поставлена задача оптимизации гальванического процесса с реверсом тока в соответствии с критерием неравномерности нанесённого покрытия. Показано, что ограничения на значения управляющих воздействий в разных исследованиях задаются по-разному. В связи с этим необходимо разработать методику нахождения предельной частоты исследуемого процесса.

2. Для нахождения предельной частоты процесса исходная электрохимическая система заменена на эквивалентную схему. Используя зависимость между значением модуля передаточной функции и пропускной способностью системы, найдена аналитическая зависимость предельной частоты процесса от параметров электрохимической системы.

3. В результате проведения анализа возможных методов решения задачи оптимизации, был выбран прямой метод равномерного поиска, достоинствами которого являются отсутствие требования дифференцируемости целевой функции и поиск глобального экстремума целевой функции.

Глава 4 Разработка автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока

4.1 Разработка измерительно-вычислительного комплекса для определения предельной частоты гальванического процесса

Как следует из главы 3, для определения предельной частоты гальванического процесса с реверсом тока необходимо определить ряд значений параметров электрохимической системы. Эти значения определяются с помощью анализа реакции электрохимической системы на единичное воздействие в форме функции Хевисайда. Проблема заключается в том, что для практической реализации описанного метода необходимо высокоскоростное измерительное оборудование с функцией записи данных, синхронизированных по времени, так как время падения напряжения на электролите $U(+0)$ очень мало. Кроме того, необходимо устройство для коммутации подаваемого тока с плотностью не менее 5 А/дм^2 и с крутизной фронта отключения по крайней мере сопоставимого с крутизной падения напряжения $U(+0)$.

Для получения экспериментальных данных был использован разработанный управляемый мостовой инвертор в качестве коммутатора тока в режиме аналога твёрдотельного реле. В этом случае управляющее напряжение с компьютера подаётся только на одно плечо мостового инвертора, коммутирующее прямой импульс тока. На рис. 4.1 показана схема измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), выполняющего измерения и расчет значений параметров для вычисления предельной частоты гальванического процесса с реверсом тока.

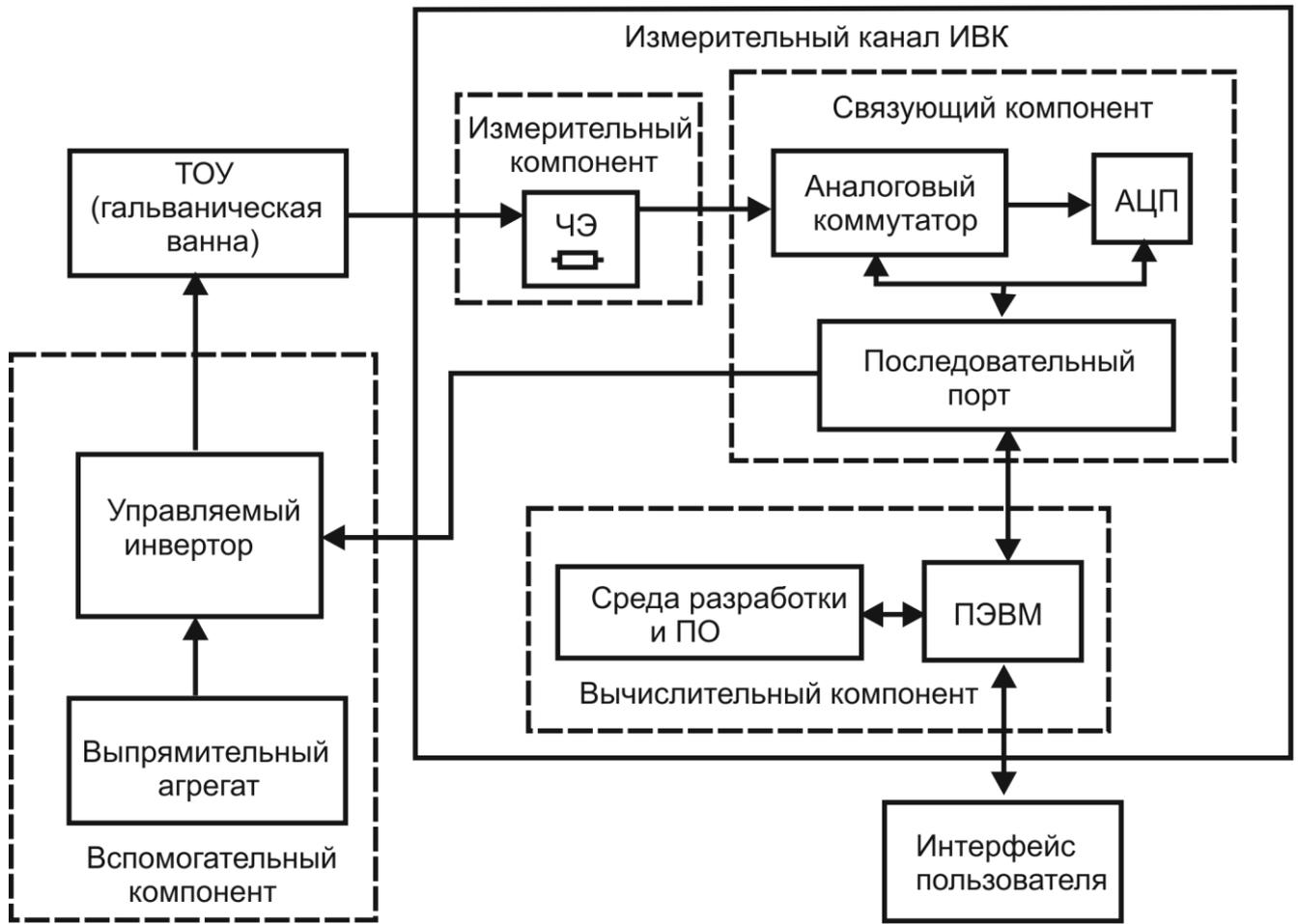


Рис. 4.1. Структурная схема ИВК:

ТОУ – технологический объект управления; ЧЭ – чувствительный элемент; ИВК – измерительно-вычислительный комплекс; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПО – программное обеспечение; ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина.

В качестве измерительного и связующего компонента применялся разработанный двухканальный виртуальный вольтметр с функцией синхронизированной записи данных на базе 12-ти разрядного аналого-цифрового преобразователя ADS7818 с частотой преобразования 500 кГц и разработанное для него консольное приложение на языке Visual C++ для повышения быстродействия программной части измерительной системы. Принципиальная схема двухканального вольтметра показана на рис. 4.2.

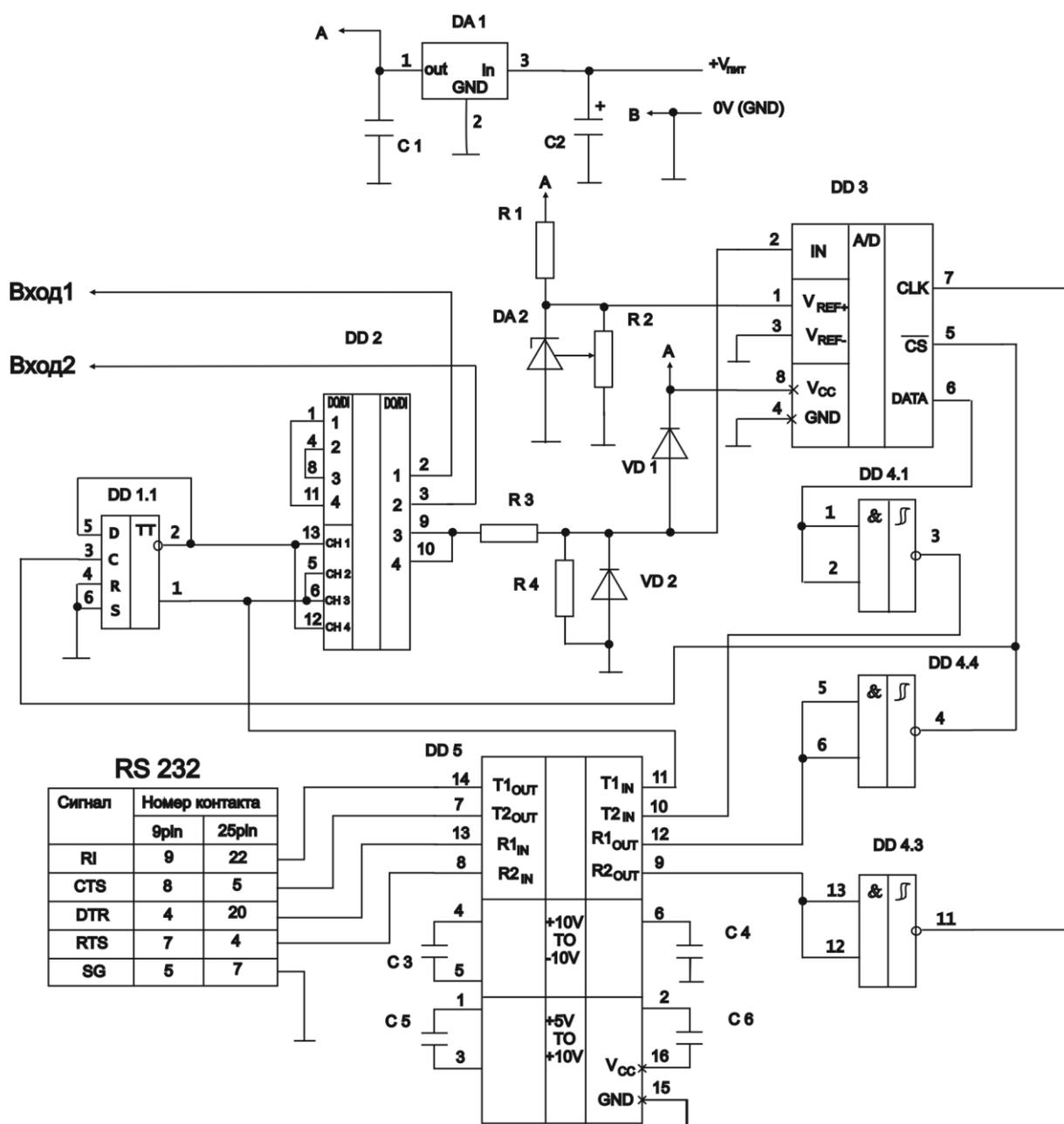


Рис. 4.2. Принципиальная схема двухканального вольтметра

Устройство работает следующим образом.

Соответствующая измеряемая величина подключена к входам аналогового коммутатора (выводы 2 и 3 DD2- микросхема К561КТ3). Программно проверяется состояние триггера DD1.1 (микросхема К561ТМ2) и при необходимости производится его установка в состояние логической “1” на выводе 1, что соответствует измерению на «входе 2». Далее измеряемое напряжение поступает через соответствующий канал DD2 и делитель напряжения на резисторах R3 и R4 на вход АЦП

DD3 (в данном случае используется 12- разрядный АЦП с последовательным интерфейсом ADS7818P Burr-Brown Texas Instruments). Микросхема DA2 (LM136-2.5V фирмы National Semiconductor) является источником опорного напряжения АЦП. Затем, в соответствии с протоколом связи АЦП, производится измерение, преобразование и передача данных в ПЭВМ. Для преобразования значений напряжения стандарта TTL, в котором работает АЦП, к значениям протокола RS232 (и наоборот) в данной схеме используются ИМС DD4 и DD5. DD4 (микросхема КР1561ТЛ1) представляет собой набор триггеров Шмитта с инверсией, а DD5 является универсальным асинхронным приемопередатчиком для сопряжения с асинхронными каналами последовательных данных с встроенным удвоителем и инвертором напряжения (микросхема ST232 фирмы STMicroelectronics). Затем, по спаду положительного импульса на выводе 3 DD1.1 на выводе 1 DD1.1 устанавливается значение логического "0", а на выводе 2 DD1.1 логической "1", что соответствует режиму измерения напряжения на «входе 1» и вновь выполняется процесс измерения. Затем в ПЭВМ производится вычисление значений измеряемых напряжений. Стабилизация напряжений питания устройства +5 В осуществляется микросхемой DA1(микросхема LM78L05 фирмы National Semiconductor). Питание устройства осуществляется от источника постоянного напряжения $6,7 \div 30$ В (стабилизированного или не стабилизированного) и током нагрузки не менее 15 мА.

Блок-схема работы двухканального виртуального вольтметра показана на рис 4.3.

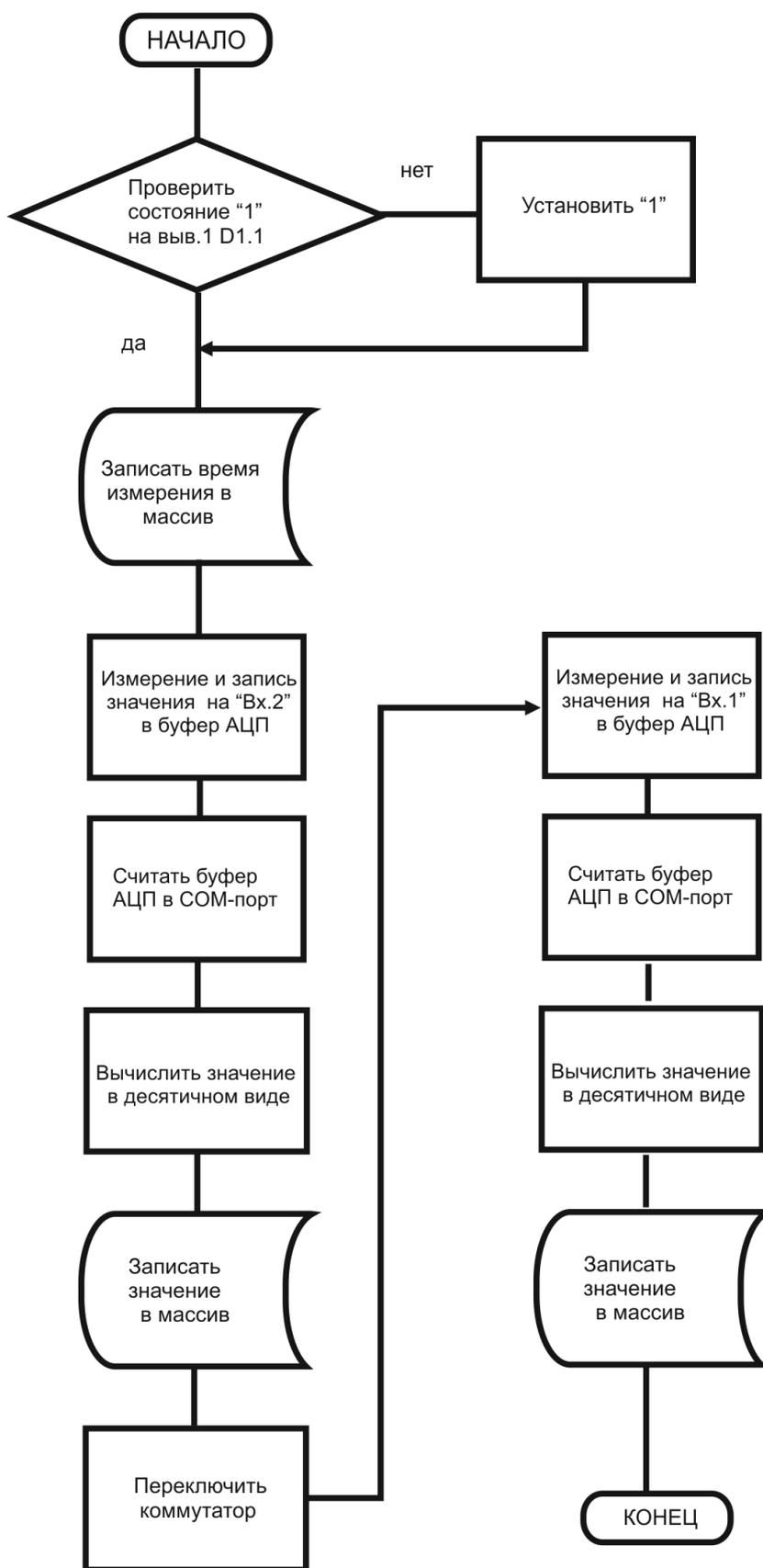


Рис. 4.3. Блок-схема работы двухканального виртуального вольтметра

Схема работает следующим образом. Перед началом измерения проверяется номер подключённого канала и при необходимости проводится переключение на необходимый канал. Далее производится запись времени измерения и производится измерение, вычисление и запись значения напряжения по подключенному каналу. Затем переключается аналоговый коммутатор, и производятся аналогичные действия по измерению напряжения по второму каналу. Особенность алгоритма заключается в том, что для взаимодействия аналого-цифрового преобразователя вольтметра и персонального компьютера применяются регистры состояния модема последовательного порта ПЭВМ, что позволило повысить скорость измерения.

С целью повышения быстродействия системы запись значений времени измерения и напряжения производится в оперативную память компьютера. Стандартный таймер ОС Windows имеет шаг $1 \cdot 10^{-3}$ [с], что недостаточно для проведения измерений. В связи с этим, для измерения времени используется таймер высокого разрешения на основе функции `QueryPerfomanceCounter()`. Частота данного таймера не меняется во время работы системы и зависит от частоты центрального процессора [28, 46, 69, 75]. Для используемого в данной работе ПК частота таймера составила 1948730 [Гц]. Таким образом, шаг измерения времени был ограничен частотой дискретизации АЦП и составил $2 \cdot 10^{-6}$ [с].

Блок-схема работы ИВК показана на рис. 4.4.

Как видно из блок-схемы, для работы ИВК необходимо наличие у ПК двух СОМ-портов: первый используется для управления мостовым инвертором, второй – для виртуального двухканального вольтметра. Число измерений до отключения мостового инвертора задаётся таким образом, чтобы стабилизатор тока перед отключением успел выйти на режим. Число измерений зависит от типа используемого стабилизатора и частоты измерений. В данной работе число измерений до выхода стабилизатора на режим равно 7. При помощи вспомогательной программы было определено время выполнения команд `QueryPerfomanceCounter()`, а также одного измерения.

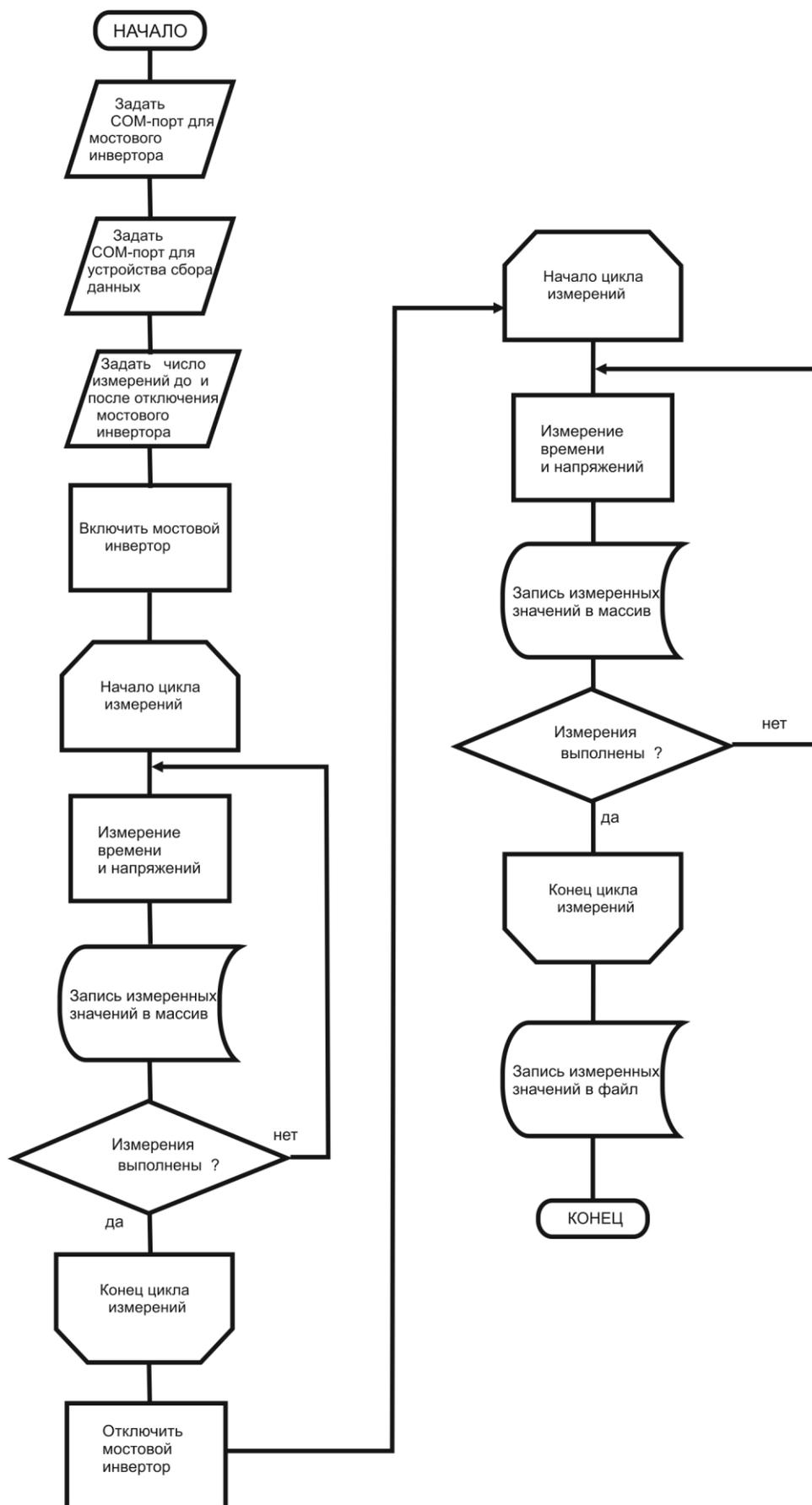


Рис. 4.4. Блок-схема работы ИВК

Зная это значение времени, а также частоту таймера высокого разрешения было найдено количество измерений после отключения мостового инвертора, а именно 500. Далее происходит включение мостового инвертора и начинается цикл измерений входного и выходного напряжений согласно рис. 3.1. После выполнения измерений напряжений при включенном источнике стабилизированного питания гальванической ванны происходит отключение мостового инвертора. Затем осуществляется цикл измерений выходного напряжения, соответствующего периоду t на рис. 3.2. После завершения измерений происходит запись измеренных значений времени и входного (выходного) напряжений в файл.

Данные эксперимента – время и синхронизированные по времени значения $U_{\text{пит}}$ и $U_{\text{ст}}$ – сохраняются в виде табличного файла данных, который затем обрабатывается в программе, имеющей свидетельство о регистрации и написанной в среде пакета Mathcad. В результате, для использовавшейся в данной работе электрохимической системы был получен график, показанный на рис. 4.5 и его фрагмент в более крупном масштабе на рис. 4.6.

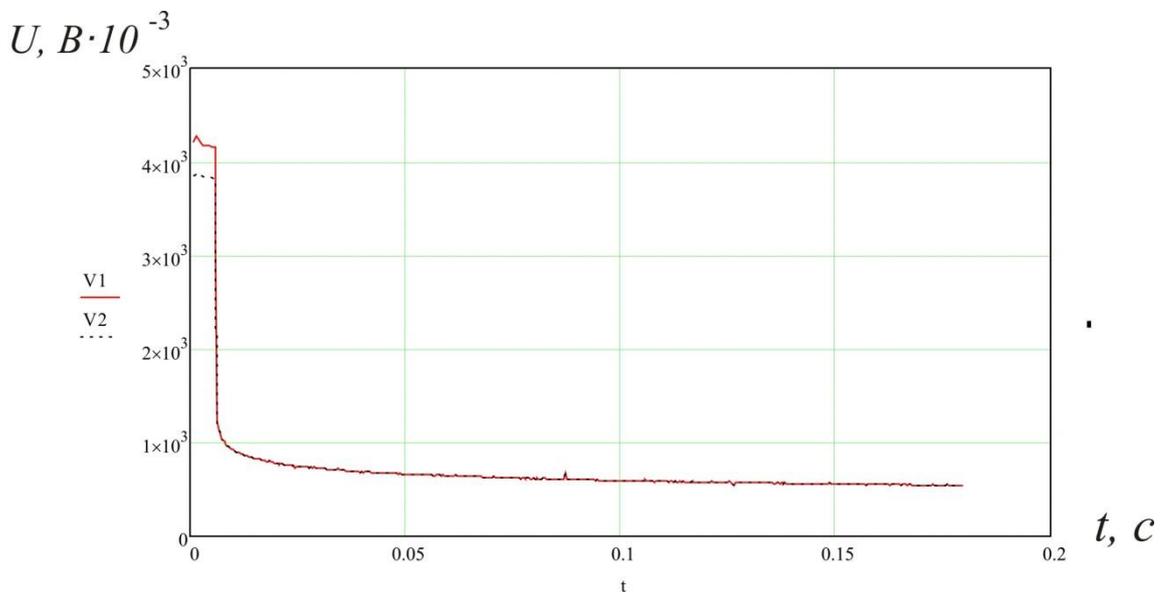


Рис. 4.5. График зависимости напряжений от времени

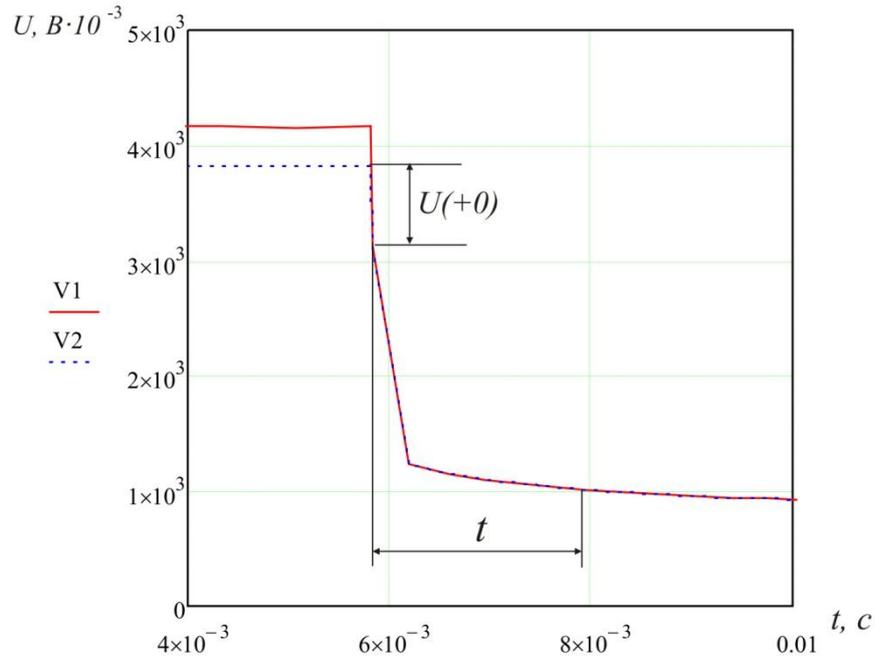


Рис. 4.6. График зависимости напряжений от времени
в увеличенном масштабе

Для получения значений $R_{гр}$, $r_э$, C и нахождения предельной частоты $f_{пр}$ разработана следующая методика:

1. Из экспериментальных данных найти падение напряжения на $R_{доп}$ как разность напряжений $U_{пит} - U_{ст}$ (на графиках рис. 4.5, 4.6 это, соответственно, V_1 и V_2).

2. Найти $i_{ст} = \frac{U_{пит} - U_{ст}}{R_{доп}}$.

3. Найти $r_э = \frac{U(+0)}{i_{ст}}$.

4. Найти $R_{гр} = \frac{U_{ст}}{i_{ст}} - r_э$.

5. Найти $C = \frac{t}{R_{гр} \cdot \ln \frac{U(+0)}{U_{пол}(t)}}$.

6. Подставить значения $R_{гр}$, $r_э$, C в (3.9) и с учётом того, что $\omega = 2\pi \cdot f$ построить график зависимости модуля передаточной функции от частоты.

Для исследуемой в данной работе электрохимической системы значения параметров составили: $R_{rp}=9,178$ Ом, $r_3=2,012$ Ом, $C=204 \cdot 10^{-6}$ Ф.

График зависимости модуля передаточной функции от частоты реверсивного тока показан на рис. 4.7.

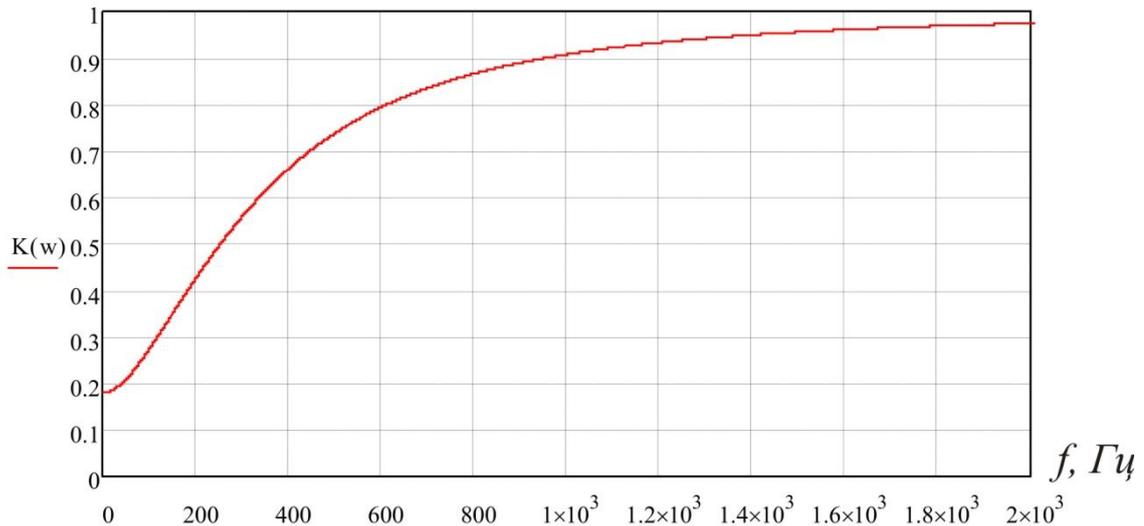


Рис. 4.7. График зависимости модуля передаточной функции гальванической системы от частоты реверсивного тока

7. По значению модуля передаточной функции равного 0,5 на графике находим начальное приближение предельной частоты процесса. Для нахождения её точного значения в разработанной программе применяется функция `root()` пакета Mathcad. Для исследуемой электрохимической системы значение предельной частоты процесса составило $f_{пр}=255$ Гц.

Использование разработанного ИВК позволяет существенно увеличить скорость нахождения предельной частоты процесса, а также расширить область допустимых значений для управляющих воздействий.

Из анализа работ [13, 41, 92 – 98] следует, что минимальные длительности прямого и реверсивного тока при нанесении никелевых гальванических покрытий из электролита Уоттса составляют 0,01 и 0,002 [с] соответственно. Тогда предельная частота равна 83 Гц. Таким образом, область допустимых значений для управляющих воздействий с помощью ИВК была расширена в 3 раза.

Для определения предельной частоты без использования ИВК необходимо провести серию экспериментальных исследований по нанесению гальванического покрытия на деталь до тех пор, пока получаемое покрытие не станет рыхлым или перестанет осаждаться. В случае исследуемой в данной работе электрохимической системы было бы необходимо провести последовательность экспериментов при 10, 100, 200, 300 Гц, а затем 250 Гц. При значении частоты 300 Гц покрытие получилось бы рыхлым, а, используя метод половинного деления и разделив отрезок от 200 до 300 Гц на два, получилось бы значение 250 Гц, которое стало бы предельным для данной электрохимической системы. Таким образом, потребовалось бы проведение 5 экспериментов по нанесению гальванического покрытия на деталь. Время нанесения покрытия составляет 50 минут без учёта подготовительных операций. Тогда время поиска предельной частоты составит 250 минут. При использовании ИВК скорость нахождения предельной частоты процесса ограничена скоростью действий оператора. При нахождении предельной частоты процесса никелирования с реверсом тока для электрохимической системы, параметры которой были описаны в главе 2, с использованием разработанного ИВК было затрачено время равное 5 минутам с учётом затрат времени на действия оператора. Таким образом, время поиска ограничений для управляющих воздействий уменьшилось в 50 раз.

4.2 Разработка автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока

В данной работе результаты обработки экспериментальных исследований и предположение о наличии предельной частоты гальванического процесса при использовании реверсивного тока полностью согласуются с выводами в работах [52, 72] о том, что геометрические факторы гальванической системы (конфигурация анода, катода, геометрические размеры гальванической ванны и т.п.) оказывают существенное влияние на характеристики получаемого гальванического покры-

тия. Такой вывод можно сделать на основании того, что указанные факторы по своей природе являются составными элементами, создающими ёмкость межфазовой границы электрод-электролит, которая, как показано в гл.3, влияет на предельную частоту исследуемого процесса, и, следовательно, на неравномерность получаемого гальванического покрытия.

Как было показано в гл.1, номенклатура покрываемых деталей-катодов весьма обширна, поэтому каждый раз при изменении детали-анода предельная частота гальванического процесса с использованием реверсивного тока для одного и того же технологического оборудования будет меняться, поэтому должно будет меняться и время прямого и обратного периодов, а для их нахождения необходимо вновь определять ограничения для управляющих воздействий.

Подобные операции, проводимые в «ручном режиме», могут негативно сказаться на производительности труда, поэтому для наиболее эффективной реализации предложенных процессов необходима автоматизированная система нанесения гальванических покрытий, позволяющая как проводить диагностические исследования, так и технологические операции.

Созданные в процессе исследовательской работы функциональные узлы, такие как мостовой инвертор, двухканальный виртуальный вольтметр, а также программное обеспечение позволяют создать автоматизированную систему управления гальваническим процессом нанесения покрытий с реверсом тока. Структурная схема такой системы представлена на рис. 4.8.

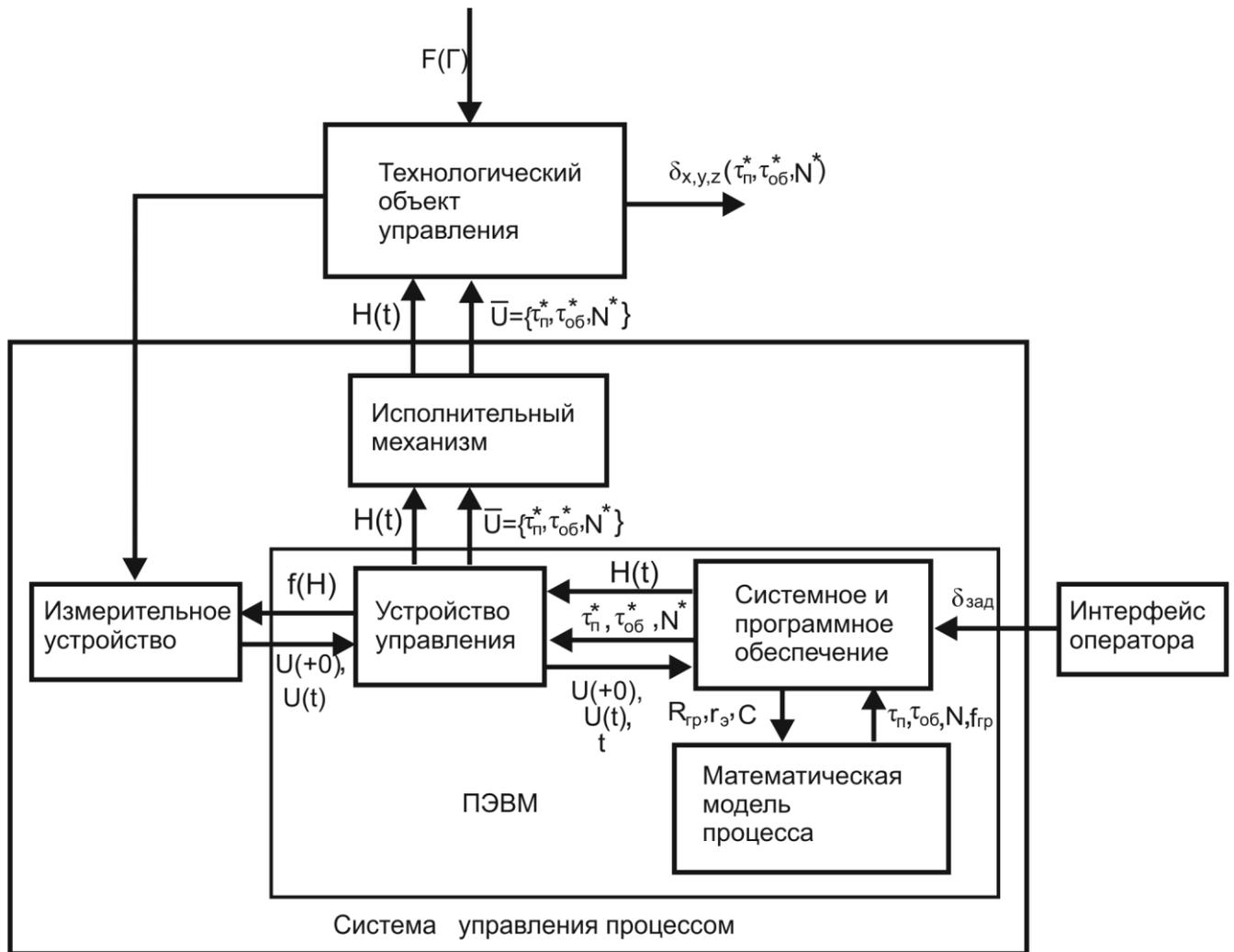


Рис. 4.8. Структурная схема автоматизированной системы управления гальваническим процессом

Система работает следующим образом. В гальваническую ванну (технологический объект управления), наполненную электролитом, помещают анод и деталь-катод. Анод подключают к положительному выходу мостового инвертора, а катод – к отрицательному. Измерительное устройство (двухканальный вольтметр) подключается согласно схеме на рис 4.1. Как видно из схемы системы, для её работы необходимо наличие двух СОМ-портов. Через первый СОМ-порт измерительное устройство соединяется с ПЭВМ, с помощью второго осуществляется управление исполнительным механизмом (мостовым инвертором). Первым этапом работы системы является определение предельной частоты гальванического процесса согласно изложенной ранее методике. Для получения необходимых для

расчёта значений параметров электрохимической системы используется разработанная диагностическая программа. Полученные данные, записанные в файл, указываются оператором системы в разработанной программе в пакете Mathcad. Результатом работы системы на первом шаге является значение предельной частоты гальванического процесса $f_{пр}$. На втором этапе производится поиск оптимальных значений управляющих воздействий для получения наиболее равномерного гальванического покрытия при условии $\delta_{min} \geq \delta_{зад}$. Поиск оптимальных длительностей включения прямого и реверсивного тока $\tau_{п}^*$, $\tau_{об}^*$ происходит по алгоритму, описанному в главе 3. Из условия получения минимальной толщины покрытия не меньше заданной будет найдено также общее количество периодов включения прямого и реверсивного тока N^* . Третий этап работы системы заключается в том, что найденные значения $\tau_{п}^*$, $\tau_{об}^*$, N^* оператор системы заносит в управляющую программу и запускает процесс нанесения покрытия. По окончании данного этапа программа завершит работу мостового инвертора, а процесс нанесения гальванического покрытия будет завершён.

Использование разработанной автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока для нанесения никелевых покрытий дало увеличение равномерности на 18,9% по сравнению с применением только прямого тока.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Для нанесения гальванических покрытий в режиме с реверсированием тока и длительностью импульса от 1 мс разработана автоматизированная система управления гальваническим процессом, которая позволяет использовать имеющиеся выпрямительные агрегаты с недостаточными временными характеристиками.

2. Разработан ИВК, позволяющий на основании анализа реакции электрохимической системы на единичное воздействие стабилизированного тока в форме функции Хевисайда определить предельную частоту гальванического процесса с реверсом тока и задать ограничения на управляющие воздействия.

3. Использование разработанной автоматизированной системы управления гальваническим процессом с реверсом тока позволило отказаться от экспериментального метода нахождения ограничений на управляющие воздействия, что увеличило скорость их нахождения в 50 раз и расширило область допустимых значений в 3 раза. Увеличение равномерности никелевых покрытий составило 18,9% по сравнению с использованием прямого тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты работы:

1. Поставлена и решена задача оптимизации процесса нанесения гальванического никелевого покрытия для повышения качества гальванического покрытия в соответствии с критерием неравномерности, что позволило уменьшить неравномерность получаемых покрытий на 18,9%.
2. Процесс нанесения гальванических покрытий формализован с точки зрения оптимизации и управления объектом, имеющим частотные свойства, что дало возможность получения аналитических математических моделей для нахождения предельной частоты импульсов прямого и реверсивного тока.
3. Получена аналитическая математическая модель и разработана методика для определения предельной частоты гальванического процесса с реверсом тока, что позволяет отказаться от экспериментальных методов её нахождения.
4. Разработан алгоритм функционирования измерительно-вычислительного комплекса для определения предельной частоты гальванического процесса с использованием реверсивного тока, что позволило снизить время, затрачиваемое на поиск ограничений для управляющих воздействий в 47,3 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.с. 1033581 СССР, МКИ С 25 D 21/12. Устройство для электролитического нанесения покрытий / А.Н. Алексеев [и др.] (СССР). - № 3423760/22-02; заявл. 14.04.82; опубл. 07.08.83, Бюл. № 29. – 3 с.
2. А.с. 1048005 СССР, МКИ³ С 25 D 21/12. Способ автоматического управления процессами электроосаждения / А.Н. Алексеев [и др.] (СССР). - № 3423910/22-02; заявл. 14.04.82; опубл. 15.10.83, Бюл. № 38. – 4 с.: ил.
3. А.с. 1344822 СССР, МКИ⁴ С 25 D 21/12. Устройство для нанесения гальванических покрытий / А.А. Капустин, Н.Д. Кошевой (СССР). - № 4080447/31-02; заявл. 20.06.86; опубл. 15.10.87, Бюл. № 38. – 4 с.: ил.
4. А.с. 1434004 СССР, МКИ⁴ С 25 D 21/12. Установка для нанесения гальванических покрытий / А.Н. Алексеев [и др.] (СССР). - № 4233524/23-02; заявл. 22.04.87; опубл. 30.10.88, Бюл. № 40. – 6 с.: ил.
5. А.с. 1463810 СССР, МКИ⁴ С 25 D 21/12. Устройство для нанесения гальванических покрытий / Н.Д. Кошевой [и др.] (СССР). - № 4316493/31-02; заявл. 31.08.87; опубл. 30.03.83, Бюл. № 9. – 5 с.: ил.
6. А.с. 1548275 СССР, МКИ⁴ С 25 D 21/12. Устройство для нанесения гальванических покрытий / А.Л. Хворостенко, С.А. Стукалов (СССР). - № 4472302/23-02; заявл. 20.06.88; опубл. 07.03.90, Бюл. № 9. – 4 с.: ил.
7. Ажогин, Ф.Ф. Гальванотехника. Справочник / Ф.Ф. Ажогин, М.А. Беленький, И.Е. Галль и др. – М.: Metallurgy, 1987. – 736 с.
8. Акулич, И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: Учебное пособие / И.Л. Акулич. – СПб.: Издательство Лань, 2011. – 352 с.
9. Александров, В.М. Оборудование цехов электрохимических покрытий: Справочник / В.М. Александров, Б.В. Антонов, Б.И. Гендлер и др. – Л: Машиностроение, 1987. – 309 с.
10. Алексеев, А.Н. Повышение эффективности технологических операций и функционирования оборудования гальванохимической обработки в условиях ав-

томатизированного гальванического производства / А.Н. Алексеев. – М. – Пенза: Новые промышленные технологии, 1997. – 189 с.

11. Ашманов, С.А. Теория оптимизации в задачах и упражнениях: Учебное пособие / С.А. Ашманов, А.В. Тимохов. – СПб.: Издательство Лань, 2012. – 448 с.

12. Бахвалов, Г.Т. Никелирование при периодическом изменении направления тока. ИТЭИН АН СССР, 1955.

13. Бахвалов, Г.Т. Новая технология электроосаждения металлов / Г.Т. Бахвалов. – М.: Металлургия, 1966. – 152 с.

14. Бахвалов, Г.Т. Электроосаждение металлов при периодическом изменении направления тока: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, МИЦМиЗ им. М.И. Калинина, 1954.

15. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Наука, 1987. – 630 с.

16. Бахчисарайцыян, Н.Г. Практикум по прикладной электрохимии: учебное пособие для вузов / Н.Г. Бахчисарайцыян, Ю.В. Борисоглебский, Г.К. Буркат. – Л.: Химия, 1990. – 304 с.

17. Бахчисарьянц, Н.Г. Исследование электролитического никелирования прерывистым током и током переменного направления / Н.Г. Бахчисарьянц, Н.Т. Кудрявцев, Г.А. Кокорев // Труды МХТИ им. Менделеева. – Вып. 32, 1961.

18. Бибииков, Н.Н. Осаждение металлов в нецианистых электролитах на токе переменной полярности, ИТЭИН АН СССР, 1957.

19. Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. Т. 10 / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969 – 1978.

20. Воздвиженский, Г.С. К вопросу о механизме образования блестящих никелевых осадков при реверсировании тока / Г.С. Воздвиженский, Р.С. Сайфуллин // Труды Казанского химико-технологич. ин-та. – Вып. 22, 1958. – С. 17–23.

21. Волков, Е.А. Численные методы: Учебное пособие / Е.А. Волков. – СПб.: Издательство Лань, 2008. – 256 с.

22. Гнусин, Н.П. Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах / Н.П. Гнусин, Н.П. Поддубный, А.И. Маслий. – Новосибирск: Наука, 1972. – 276 с.
23. Годунов, С.К. Введение в теорию разностных схем / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М.: Физматгиз, 1962. – 340 с.
24. Годунов, С.К. Разностные схемы. Введение в теорию / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М.: Наука, 1977. – 439 с.
25. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
26. Горбунова, К.М. Некоторые свойства тонких слоёв металлов, определяемые условиями поверхностного взаимодействия со средой при электрокристаллизации / К.М. Горбунова // Тезисы докладов совещания «Структура и свойства поверхности металлов», ИФХ АН СССР, 1960.
27. Городынский, А.В. Вольтамперометрия. Кинетика стационарного электролиза / А.В. Городынский. – Киев: «Наукова думка», 1988. – 176 с.
28. Давыдов, В.Г. Visual C++. Разработка Windows-приложений с помощью MFC и API-функций / В.Г. Давыдов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 576 с.
29. Демидович, Б.П. Основы вычислительной математики: Учебное пособие / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – СПб.: Издательство Лань, 2011. – 672 с.
30. Дьяков, И.А. Автоматизация управления технологическими параметрами электрохимических процессов: дисс. ... канд. техн. наук. – Тамбов: ТГТУ, 1995. – 150 с.
31. Дьяков, И.А. Управление выпрямительными агрегатами электрохимических ванн / И.А. Дьяков // Тез. докл. конференции «Ресурсосберегающие технологии в гальванотехнике». – Севастополь, 1992. – С. 34.
32. Егоров, А.С. Компьютеризированная система электроосаждения металлов с использованием реверсивного тока / А.С. Егоров, Ю.В. Литовка // Проблемы управления, обработки и передачи информации: Сборник трудов III международной научной конференции. – 2013. – Т. 1. – С. 246–248.

33. Есипов, Б.А. Методы исследования операций: Учебное пособие / Б.А. Есипов. – СПб.: Издательство Лань, 2010. – 256 с.

34. Жинович, Н.И. Никелирование при периодическом изменении направления тока / Н.И. Жинович, М.М. Менкина, К.Ф. Рубенчик // Сб. научных трудов Белорусского политехнич. ин-та. – № 55, 1956. – С. 103–108.

35. Зубченко, В.Л. Гибкие автоматизированные гальванические линии: Справочник / В.Л. Зубченко, В.И. Захаров, В.М. Рогов и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.

36. Каданер, Л.И. Новейшие достижения гальваностегии / Л.И. Каданер. – Харьков: Изд-во Харьк. ГУ, 1951. – 182 с.

37. Каданер, Л.И. Равномерность гальванических покрытий / Л.И. Каданер. – Харьков: Изд-во Харьк. ГУ, 1960. – 414 с.

38. Каданер, Л.И. Труды совещания по электрохимии / Л.И. Каданер. – Изд-во АН СССР, 1953. – 421 с.

39. Каханер, Д. Численные методы и математическое обеспечение / Д. Каханер, К. Моулера, С. Нэш. – М.: Мир, 1998. – 575 с.

40. Колесников, В.А. Экология и ресурсосбережение в электрохимических производствах. Механические и физико-химические методы очистки промывных и сточных вод: учебное пособие / В.А. Колесников, В.И. Ильин. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. – 220 с.

41. Коллиа, С. Электроосаждение блестящих никелевых покрытий с использованием реверсивного импульсного тока / С. Коллиа, Ф. Котзиа, Н. Спиреллис // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1992. – № 5–6. – С. 23–26.

42. Кудрявцев, Н.Т. Блестящее никелирование / Н.Т. Кудрявцев, В.В. Федуркин. – М.: Росгизместпром, 1951. – 87 с.

43. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – М.: Химия, 1979. – 352 с.

44. Кузнецов, А.В. Высшая математика. Математическое программирование / А.В. Кузнецов, В.А. Сакович, Н.И. Холод. – СПб.: Издательство Лань, 2010. – 352 с.
45. Лайнер, В.И. Современная гальванотехника / В.И. Лайнер. – М.: Металлургия, 1967. – 284 с.
46. Лейнекер, Р. Энциклопедия Visual C++ / Р. Лейнекер. – СПб.: Издательство «Питер», 1999. – 1152 с.
47. Лесин, В.В. Основы методов оптимизации: Учебное пособие / В.В. Лесин, Ю.П. Лисовец. – СПб.: Издательство Лань, 2011. – 352 с.
48. Литовка, Ю.В. Алгоритм оптимального управления процессом гальванопокрытия по векторному критерию / Ю.В. Литовка, И.А. Дьяков // Тез. докл. IX Всероссийской конф. «Математические методы в химии и химической технологии». – Тверь, 1995. – С. 63 – 64с.
49. Литовка, Ю.В. Исследование зависимости неравномерности и микротвердости никелевого гальванического покрытия от параметров реверсивного тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Совершенствование технологии гальванических покрытий: Тезисы докладов XV международного совещания 2–4 октября 2012 г. – Киров: Вятский государственный университет, 2012. – С. 68-69.
50. Литовка, Ю.В. Компьютеризированная система электроосаждения металлов с использованием реверсивного тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 2. – С. 39–42.
51. Литовка, Ю.В. Метод расчета потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне / Ю.В. Литовка, И.А. Дьяков // Теор. основы хим. технол. – 1997. – Т. 31, № 2. – С. 218 – 221 с.
52. Литовка, Ю.В. Моделирование и оптимальное управление технологическими процессами гальванотехники: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Тамбов, 1995. – 341 с.
53. Литовка, Ю.В. Моделирование и оптимизация процесса нанесения гальванических покрытий в условиях реверсирования тока / Ю.В. Литовка, А.В. Ро-

маненко, А.В. Афанасьев // Теор. основы хим. технол. – 1998. – Т. 32, № 3. – С. 301 – 304.

54. Литовка, Ю.В. Мостовой регулируемый инвертор: патент на полезную модель / Ю.В. Литовка, С.А. Егоров, А.С. Егоров, № 137668.

55. Литовка, Ю.В. Оптимизация гальванической ванны с подвижными анодами / Ю.В. Литовка, В.А. Тарураев // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Автоматика. Управление. – 1997. – Т. 1, вып. 2. – С. 41 – 48.

56. Литовка, Ю.В. Оптимизация неравномерности никелевого гальванического покрытия с использованием реверса тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Математические методы в технике и технологиях: Сборник трудов XXV Международной научной конференции 29–31 мая 2012 г. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2012. – С. 120–122.

57. Литовка, Ю.В. Постановка задачи оптимального управления электрохимическими процессами по векторному критерию / Ю.В. Литовка, И.А. Дьяков // Тез. докл. IV Всероссийской науч. конф. «Динамика процессов и аппаратов в химической технологии». – Ярославль, 1994. – Ч. 1. – С. 180 – 181.

58. Литовка, Ю.В. Разработка математических моделей для оптимального управления гальваническими процессами / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Математические методы в технике и технологиях: Сборник трудов XXIV Международной научной конференции 20–22 сент. 2011 г. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2011. – С. 77–79.

59. Литовка, Ю.В. Решение уравнения Лапласа при моделировании процесса нанесения никелевого гальванического покрытия с использованием реверса тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров, В.В. Пэк // 26 Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» 9–13 сентября 2013г. – Ангарск: Ангарская государственная техническая академия, 2013. – С. 16–18.

60. Литовка, Ю.В. Управление гальваническим процессом никелирования в режиме с реверсированием тока с учётом его предельной частоты / Ю.В. Литовка,

А.С. Егоров // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2014. – № 1. – С. 37–44.

61. Литовка, Ю.В. Устройство реализации режима реверсирования тока с заданной длительностью импульса / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2013. – № 2(46). – С. 280–286.

62. Литовка, Ю.В. Экспериментальное исследование значений неравномерности и микротвердости никелевого гальванического покрытия при реверсировании тока / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Вестник ТГТУ. – 2013. – Том 19. – № 1. – С. 177–180.

63. Малахов, А.И. Коррозия и основы гальваностегии / А.И. Малахов, К.М. Тютина. – М.: Химия, 1977. – 216 с.

64. Манукян, А.Б. Оптимальное управление объектами одного класса с распределёнными параметрами при смешанных краевых условиях: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1983. – 145 с.

65. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – СПб.: Издательство Лань, 2009. – 608 с.

66. Матулис, Ю.Ю. Блестящие электролитические покрытия / Под ред. Ю.Ю. Матулиса. – Вильнюс: Минтис, 1969. – 613 с.

67. Матулис, Ю.Ю. О состоянии теории и практики блестящих гальванопокрытий / Ю.Ю. Матулис, Р.М. Вишкомирскис // Тезисы докладов Всесоюзного совещания по теории и практике блестящих гальванопокрытий. – Вильнюс, 1962.

68. Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.

69. Олафсен, Ю. Visual C++ 6 и MFC. Энциклопедия пользователя / Ю. Олафсен, К. Скрайбнер, К.Д. Уайт. – К.: Диасофт, 2000. – 716 с.

70. Орехова, В.В. Теоретические основы гальваностегических процессов / В.В. Орехова, Б.И. Байрачный. – Киев: Выща школа, 1988. – 208 с.

71. Пасечник, С.Я. Механизм электродных процессов на никеле при электролизе реверсированным током / С.Я. Пасечник // Труды Воронежского технологич. ин-та. – № 16, 1960.
72. Романенко, А.В. Моделирование и оптимизация электрохимических процессов нанесения гальванопокрытий с реверсом тока: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Тамбов, 1999. – 167 с.
73. Ротинян, А.Л. ДАН СССР, сер. Химическая технология. Т. 104 / А.Л. Ротинян, Э.Ш. Иоффе, Е.С. Козич и др. – №5, 1955. С. 753–755.
74. Рябенский, В.С. Введение в вычислительную математику / В.С. Рябенский. – М.: Физматлит, 1994. – 336 с.
75. Саймон, Р. Microsoft Windows API. Справочник системного программиста. Второе издание, дополненное: Пер. с англ. / Ричард Саймон. – К.: ООО «ТИД ДС», 2004. – 1216 с.
76. Сайфуллин, Р.С. Некоторые пути интенсификации процесса никелирования: Диссертация на соискание ученой степени канд. хим. наук. Казанский химико-технологич. ин-т, 1956.
77. Самарский, А.А. Введение в теорию разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1971. – 552 с.
78. Самарский, А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
79. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 591 с.
80. Самарский, А.А. Разностные методы для эллиптических уравнений / А.А. Самарский, В.Б. Андреев. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
81. Самарский, А.А. Разностные уравнения / А.А. Самарский, Ю.М. Карамзин. – М.: Знание, 1978. – 62 с.
82. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1989. – 626 с.

83. Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.
84. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 112 с.
85. Соболев, И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб / И.М. Соболев. – М.: Знание, 1985. – 32 с.
86. Срочко, В.А. Численные методы. Курс лекций: Учебное пособие / В.А. Срочко. – СПб.: Издательство Лань, 2010. – 208 с.
87. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
88. Форсайт, Дж.Е. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных / Дж.Е. Форсайт, В.Р. Вазов. – М.: ИЛ, 1963. – 534 с.
89. Шлугер, М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х томах / Под ред. М.А. Шлугера. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
90. Шлугер, М.А. Коррозия и защита металлов / М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1981. – 216 с.
91. Ямпольский, А.М. Краткий справочник гальванотехника / А.М. Ямпольский, В.А. Ильин. – М.: Машиностроение, 1981. – 210 с.
92. Choo, R.T.C. Mass transfer and electrocrystallisation analyses of nanocrystalline nickel production by pulse plating / R.T.C. Choo, J.M. Toguri, A.M. El-Sherik, U. Erb // Journal of applied electrochemistry, 1995. – № 25. – p. 384–403.
93. El-Sherik, A.M. Microstructural evolution in pulse plated nickel electrodeposits / A.M. El-Sherik, U. Erb, J. Page // Surface and coatings technology, 1996. – № 88. – p. 70–78.
94. Jernstedt, G.W. Патент 2470775 США, МПК C25D. Electroplating nickel and cobalt with periodic reverse current / G.W. Jernstedt, Myron Ceresa; заявитель и патентообладатель Westinghouse electric corp. – № 759796; заявл. 09.07.1947; опубл. 24.05.1949. – 12 с.

95. Kollia, C. Nickel plating by pulse electrolysis: textural and microstructural modifications due to adsorption/desorption phenomena / C. Kollia, N. Spyrellis, J. Amblard // *Journal of applied electrochemistry*, 1990. – № 20. – p. 1025–1032.

96. Lindblom, M. Pulse reverse plating for uniform nickel height in zone plates / M. Lindblom, H.M. Hertz, A. Holmberg // *American Vacuum Society*, 2006. – pp. 2848.

97. Tang, P.T. Improved corrosion resistance of pulse plated nickel through crystallisation control / P.T. Tang, T. Watanabe, J.E.T. Andersen, G. Bech-Nielsen // *Journal of applied electrochemistry*, 1995. – № 25. – p. 347–352.

98. Tang, P.T. Pulse reversal plating of nickel and nickel alloys for microgalvanics / P.T. Tang // *Electrochimica Acta*, 2001. – № 47. – p. 61–66.

99. Wvanglen, C. *Kungliga Tekniska Hogskolans hande.* – 1955. – Vol. 94. – pp. 42.

Приложение А

Программная часть ИВК в режиме измерения

```
#include<conio.h>
#include<stdio.h>
#include<windows.h>
#include<mmsystem.h>
#include<math.h>
#include<time.h>
#include<dos.h>
#include<string.h>
#include<stdlib.h>
#include<iostream.h>
#include <tchar.h>
HANDLE hCom, hCom8;
    FILE *fp;
int i,j,f,k,n;
float d,s,st, uc[700],tc[700];

    long double t;

DWORD dwStatus; // Состояние регистров модема
_int64 t0,t1,qpf=0;
void main (void)
{
// Открытие портов
hCom=CreateFile("COM9",GENERIC_READ|GENERIC_WRITE,0,NULL,OPEN_EXISTING,0,NU
LL);
    if(hCom==INVALID_HANDLE_VALUE)
    {

        cout<<"Error open COM9!\n";
        return;
    }
}
```

```

    hCom8=CreateFile("COM8",GENERIC_READ|GENERIC_WRITE,0,NULL,OPEN_EXISTING,0,NULL);
EscapeCommFunction(hCom8,CLRRTS);
    EscapeCommFunction(hCom8,CLRDTR);
    if(hCom8==INVALID_HANDLE_VALUE)
    {

        cout<<"Error open COM8!\n";
        return;
    }
// Открытие файла
fp=fopen("D:\\rez_ex","w");
    if(fp==NULL)
    {

        cout<<"Error open file!\n";
        return;
    }
// Проверка триггера платы
    GetCommModemStatus(hCom,&dwStatus);
    if(!(dwStatus&MS_RING_ON))
    {
        EscapeCommFunction(hCom,CLRDTR);
        EscapeCommFunction(hCom,SETDTR);

        GetCommModemStatus(hCom,&dwStatus);

        if(dwStatus&MS_RING_ON)

            cout<<"Trigger ON!\n";
            else
            {

                cout<<"Error trigger!\n";
                // return;
            }

```

```

    }
else
    cout<<"Trigger ON!\n";
QueryPerformanceFrequency((LARGE_INTEGER *)&qpf);// кол-во тактов в секунду
EscapeCommFunction(hCom8,SETDTR);    //Включение моста

    QueryPerformanceCounter((LARGE_INTEGER *)&t0);// кол-во тактов в начальный мо-
мент

//    EscapeCommFunction(hCom8,SETDTR);    //Включение моста
    t=0;
//Измерение до отключения моста
//do
    for(k=0;k<7;k++)//к=7 число измерений до откл. моста
    {
        s=0; st=0;
        for(j=0;j<2;j++)
            {

                EscapeCommFunction(hCom,CLRDTR);

                d=0;
                for(i=0;i<3;i++)
                    {
                        EscapeCommFunction(hCom,SETRTS);
                        EscapeCommFunction(hCom,SETRTS);
                        EscapeCommFunction(hCom,SETRTS);
                        EscapeCommFunction(hCom,CLRRTS);
                    }
                for(f=0;f<12;f++)
                    {
                        EscapeCommFunction(hCom,SETRTS);
                        GetCommModemStatus(hCom,&dwStatus);
                        EscapeCommFunction(hCom,CLRRTS);
                    }
            }
    }

```

```

        if(dwStatus&MS_CTS_ON)
        {
            d+=pow(2,(11-f));
        }
    }
    d=5000*d/4096;
if(dwStatus&MS_RING_ON)
    {
        s=d;

    }
    else
    {
        st=d;
    }
EscapeCommFunction(hCom,SETDTR);

}

// Запись в массив значений t, s, st

QueryPerformanceCounter((LARGE_INTEGER *)&t1);
// EscapeCommFunction(hCom8,CLRDTR); // Выключение моста

t=((long double) t1- (long double) t0)/(long double) qpf;// Время измерения
    fprintf(fp,"%Lf  %6.0f  %6.0f \n", t,s,st);
//    t0=t1;
}

/* GetCommModemStatus(hCom,&dwStatus);
if(dwStatus&MS_RING_ON)
    {

EscapeCommFunction(hCom,CLRDTR);
EscapeCommFunction(hCom,SETDTR); //Установить измерение только st

```

```

    }
else cout<<"Trigger OFF!!\n";
GetCommModemStatus(hCom,&dwStatus);
if (!(dwStatus&MS_RING_ON))
{
    cout<<"Trigger OFF!!!\n";
}
// QueryPerformanceCounter((LARGE_INTEGER *)&t0); */

    EscapeCommFunction(hCom8,CLRDTR); // Выключение моста
// Измерение после отключения моста
k=0;
n=500; // n- число измерений после отключения моста
do
{
    QueryPerformanceCounter((LARGE_INTEGER *)&t1);
    t=((long double) t1- (long double) t0)/(long double) qpf;// Время измерения
    EscapeCommFunction(hCom,CLRDTR);
    d=0;
    for(i=0;i<3;i++)
    {
        EscapeCommFunction(hCom,SETRTS);
        EscapeCommFunction(hCom,SETRTS);
        EscapeCommFunction(hCom,SETRTS);
        EscapeCommFunction(hCom,CLRRTS);
    }
    for(f=0;f<12;f++)
    {
        EscapeCommFunction(hCom,SETRTS);
        GetCommModemStatus(hCom,&dwStatus);
        EscapeCommFunction(hCom,CLRRTS);
        if(dwStatus&MS_CTS_ON)
        {
            d+=pow(2,(11-f));
        }
    }
}

```

```
        d=5000*d/4096;
//      QueryPerformanceCounter((LARGE_INTEGER *)&t1);
//      t=((long double) t1- (long double) t0)/(long double) qpf;// Время измерения
        uc[k]=d;
        tc[k]=t;
        k++;
        EscapeCommFunction(hCom,SETDTR);
    }
    while(k<n);

for(i=0;i<n;i++)
{

    fprintf(fp,"%Lf   %6.0f   %6.0f \n", tc[i],uc[i],uc[i]);
}

    CloseHandle(hCom);
    CloseHandle(hCom8);
    fclose(fp);
```

Приложение Б**Программная часть автоматизированной системы управления гальваническим процессом**

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, ExtCtrls, StdCtrls, XPMan;
```

```
type
```

```
TForm1 = class(TForm)
```

```
  Button1: TButton;
```

```
  Button2: TButton;
```

```
  Edit1: TEdit;
```

```
  Edit2: TEdit;
```

```
  Edit3: TEdit;
```

```
  Edit4: TEdit;
```

```
  Label1: TLabel;
```

```
  Label2: TLabel;
```

```
  Label3: TLabel;
```

```
  Label4: TLabel;
```

```
  XPManifest1: TXPManifest;
```

```
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
```

```
  procedure Button2Click(Sender: TObject);
```

```
private
```

```

    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;
    S: String;
    IDCB: TDCB;
    fHandle: THandle;
    i:integer;
implementation

{$R *.dfm}

procedure Delay(ms : longint);
//{$IFDEF WIN32}
var
    TheTime : LongInt;
// {$ENDIF}
begin
// {$IFDEF WIN32}
// Sleep(ms);
// {$ELSE}
    TheTime := GetTickCount + ms;
    while GetTickCount < TheTime do
        Application.ProcessMessages;
// {$ENDIF}
end;

```

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
  tpr,tobr:integer;
  t:longint;
begin
  tpr:=StrToInt(Edit1.Text);
  tobr:=StrToInt(Edit2.Text);
  S:=Edit4.Text;
  fHandle:=CreateFile( Pchar(S), GENERIC_READ Or GENERIC_WRITE, 0,
  Nil, OPEN_EXISTING, 0, 0);
  If fHandle=INVALID_HANDLE_VALUE Then
  Begin
    // can't open....
    ShowMessage('Порт не был открыт');
    Exit;
  End;
  If Not GetCommState( fHandle, IDCB) Then
  Begin
    ShowMessage('Порт не был прочитан');
    Exit;
  End;
  IDCB.BaudRate:=CBR_115200;
  IDCB.ByteSize:=8;
  IDCB.Parity:=NOPARITY;
  IDCB.StopBits:=ONESTOPBIT;

  Idcb.Flags:=(Idcb.Flags And $FFFC0FF) Or $00000100;
  SetCommState( fHandle, Idcb);
```

```
EscapeCommFunction( fHandle, CLRRTS);
EscapeCommFunction( fHandle, CLRDTR);
i:=0;
Button1.Enabled:=false;
Button2.Enabled:=true;
t:=GetTickCount+StrToInt(Edit3.Text)*1000;
while (GetTickCount<t) xor (i=1) do
begin
EscapeCommFunction( fHandle, SETDTR);
sleep(tpr);
EscapeCommFunction( fHandle, CLRDTR);
EscapeCommFunction( fHandle, SETRTS);
Application.ProcessMessages;
sleep(tobr);
EscapeCommFunction( fHandle, CLRRTS);
end;
CloseHandle(fHandle);
fHandle:=0;
Button1.Enabled:=true;
Button2.Enabled:=false;
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
i:=1;
Button1.Enabled:=true;
Button2.Enabled:=false;
end;
end.
```

Приложение В

Копии свидетельств о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013614666

«Программа оптимального планирования серии экспериментов со многими критериями»

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (RU)*

Автор(ы): *Егоров Андрей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2013612588

Дата поступления 01 апреля 2013 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
20 мая 2013 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014613575

«Программа для вычисления граничной частоты
гальванического процесса в режиме с реверсивным током»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Тамбовский государственный технический
университет» (RU)*

Автор: *Егоров Андрей Сергеевич (RU)*

Заявка № **2013662058**

Дата поступления **24 декабря 2013 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **28 марта 2014 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011618074

Программа функционирования восьмиканальной
информационно-измерительной системы мониторинга
температуры объекта

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет» (RU)*

Автор(ы): *Егоров Сергей Александрович,
Егоров Андрей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2011616319

Дата поступления 22 августа 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

14 октября 2011 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов

Приложение Г

Копия патента на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 137668

МОСТОВОЙ РЕГУЛИРУЕМЫЙ ИНВЕРТОР

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тамбовский государственный технический университет" ФГБОУ ВПО "ТГТУ" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013116258

Приоритет полезной модели 09 апреля 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 03 февраля 2014 г.

Срок действия патента истекает 09 апреля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



Приложение Д**Копии актов о реализации результатов исследования**

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО "НаноТехЦентр"
А.Г. Ткачев
2014 г.
М.П.



АКТ

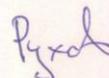
об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Егорова Андрея Сергеевича

Настоящий акт составлен генеральным директором ООО "НаноТехЦентр", д.т.н., проф., Ткачевым Алексеем Григорьевичем и заместителем генерального директора по науке ООО "НаноТехЦентр", д.т.н., Руховым Артемом Викторовичем о том, что результаты диссертационной работы Егорова А.С. на тему «Автоматизированная система управления гальваническими процессами с реверсом тока», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, в частности: разработанная методика планирования многокритериальных экспериментальных исследований процессов синтеза углеродных нанотрубок и нановолокон в промышленных условиях в реакторе с компактированным катализатором.

Полученные с использованием программы для ЭВМ «Программа оптимального планирования серии экспериментов со многими критериями» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614666) расчетные показатели, примененные при планировании экспериментальных исследований процессов синтеза углеродных нанотрубок и нановолокон в промышленных условиях в реакторе с компактированным катализатором, позволили сократить общее время исследования на 288 часов.

Сдвиг плана выпуска продукции, за счет сокращения времени исследования с использованием промышленного оборудования, позволил получить дополнительную прибыль 260 тыс. руб.

Зам. ген. директора по
науке ООО "НаноТехЦентр"



А.В. Рухов

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научно-инновационной
деятельности ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
д.т.н., проф. Дворецкий С.И.



2014г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Егорова Андрея Сергеевича

Комиссия в составе: председатель – директор института архитектуры, строительства и транспорта ФГБОУ ВПО «ТГТУ» д.т.н., профессор, Монастырев П.В., члены комиссии: заведующий кафедрой "Городское строительство и автомобильные дороги", д.т.н., профессор, Леденёв В.И., заместитель заведующего кафедрой "Городское строительство и автомобильные дороги", к.п.н., доцент Аленичева Е.В., ответственный за лабораторию строительной физики, к.т.н., доцент Макаров А.М. – составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Егорова А.С. на тему «Автоматизированная система управления гальваническими процессами с реверсом тока», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, используются в учебном процессе на кафедре "Городское строительство и автомобильные дороги" ФГБОУ ВПО «Тамбовский технический университет» при непосредственном участии Егорова А.С. в разработке лабораторных работ и обучающих программных комплексов с использованием программы для ЭВМ «Программа функционирования восьмиканальной информационно-измерительной системы мониторинга температуры объекта» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618074) по следующим дисциплинам кафедры: «Архитектурная физика», «Архитектурная климатология», «Строительная физика».

Результаты данной диссертационной работы используются для обучения студентов специальностей 270105 – «Городское строительство и хозяйство» и 270205 – «Автомобильные дороги и аэродромы» института архитектуры, строительства и транспорта, что дало возможность повысить качество и эффективность учебного процесса.

Председатель комиссии

д.т.н., проф. П.В. Монастырев

Члены комиссии

д.т.н., проф. В.И.Леденёв

к.п.н., доц. Е.В.Аленичева

к.т.н., доц. А.М.Макаров