

**АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**

На правах рукописи

Щерба Анатолий Андреевич

**СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО
ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ
МАТЕРИАЛОВ**

**Специальность 05.09.03 - Электротехнические
комплексы и системы, включая
их управление и регулирование**

**ДИССЕРТАЦИЯ
в форме научного доклада
на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Киев 1993



Робота виконана в Інституті електродинаміки АН України

Научный консультант - доктор технических наук, профессор,
академик АН Украины
А.К.Шидловский

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.И.Денисов

доктор технических наук, профессор
И.В.Пентегов

доктор технических наук, профессор
В.И.Сенько

Ведущая организация - Институт импульсных процессов
и технологий АН Украины
(г. Николаев)

Защита состоится 24 марта 1993 г. в 11:00
на заседании специализированного ученого совета Д016.30.03
в Институте электродинамики АН Украины (252680, Киев-57, пр.Победы, 56).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Института электродинамики АН Украины.

Научный доклад разослан * 23 * февраля 1993 г.

Ученый секретарь
Специализированного ученого совета
доктор технических наук

В.С.Федий



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие современной экономики неразрывно связано с разработкой новых технологий, в том числе на основе электроимпульсной интенсификации физико-химических и технологических процессов, в частности объемного электроэрозионного диспергирования (ОЭЭД) токопроводящих материалов (ТМ). Процесс ОЭЭД ТМ используется при создании перспективных и экологически чистых технологий:

- получения дисперсных быстрозакаленных порошков с уникальными свойствами (с высокоразвитой активной поверхностью, дисперсноупрочненных, мелкокристаллических, аморфных);
- переработки тугоплавких, сверхтвердых и пластичных металлоотходов;
- комплексной очистки водных стоков от биологических, органических и неорганических загрязнений (в том числе ионов тяжелых металлов).

Однако широкое внедрение в промышленности таких технологий до настоящего времени ограничивалось отсутствием специализированного электрооборудования, обеспечивающего повышение производительности и стабильность процессов электроимпульсного диспергирования материалов.

Возможность получения дисперсных порошков электроискровым способом была показана еще в 30-50-х годах XX века в работах В.В.Татаринова, Б.Р.Лазаренко, Н.И.Лазаренко, Е.Н.Золотых, К.К.Намитоква и других ученых. Однако исследования долгое время ограничивались в основном изучением одноканальных разрядов в межэлектродном промежутке (МЭП), заполненном лишь диэлектрической жидкостью, для возбуждения искровых разрядов в котором использовались низковольтные высокочастотные генераторы разрядных импульсов (до 80 В и 30 кГц), применяемые затем в размерной электроэрозионной обработке поверхности металлов. При таких условиях интенсивность порошкообразования была невысокой и для ее повышения в 60-х годах было предложено увеличить длину МЭП, заполнить его слоем металлических кусочков и формировать высоковольтные (30-50 кВ) искровые разряды. Увеличение количества последовательно соединенных искрящих контактов увеличило интенсивность порошкообразования, но при этом ухудшилась стабильность режимов разрядов.

В работе предложена новая концепция повышения производительности электроискрового диспергирования ТМ и повышения стабильности основных электротехнологических параметров. Она основана на формировании в слое гранул многоканальных искровых разрядов, позволяющих увеличивать количество одновременно искрящих контактов (и соответственно производительность диспергирования) не только за счет увеличения длины МЭП, но и за счет увеличения ширины и высоты слоя. При этом уменьшилась ве-

роятность возникновения холостых разрядов и появилась возможность реализации непрерывных и производительных промышленных технологий получения дисперсных порошков. Электроэнергетические параметры формирования многоканальных разрядов в слое ТМ до настоящего времени были неизвестны, отсутствовали методы управления режимами разрядов и средства преобразования параметров электроэнергии, реализующие необходимые функциональные зависимости.

Исследование условий и закономерностей формирования таких разрядов в слое токопроводящих частиц, создание методов регулирования и стабилизации основных электротехнологических параметров, разработка электротехнических систем, реализующих указанную концепцию, а также комплексный анализ протекающих в них электроэнергетических процессов, составили предмет настоящей диссертации.

Научные исследования проводились в Институте электродинамики АН Украины в 1975-1992 гг. под руководством и при непосредственном участии автора по темам, утвержденным Постановлениями ГКНТ СССР №407 от 09.08.79 г., №516 от 29.12.81 г., №535 от 31.12.86 г. и №290 от 10.08.88 г. и Постановлениями Президиума АН УССР №604 от 25.12.80 г., №487 от 17.11.82 г., №474 от 27.12.85 г. и №1641 от 02.08.88 г., по фундаментальным и прикладным программам 4/667, 4.2.4.(4) и 2.2.2.(33), утвержденным Постановлениями Госкомитета Украины по вопросам науки и технологий №19 от 24.07.92 г. и №12 от 04.05.92 г., а также по НИР: 6/131 МИД-21УА и 6/133 МИД 23-УА, входящих в Программу фундаментальных и поисковых исследований Академии наук Украины, утвержденную 07.08.1992 г.

Целью работы является - обобщение и развитие теории электроэнергетических процессов в системах объемного электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов, определение эффективных методов управления основными электротехнологическими параметрами и создание электрооборудования, реализующего новые электроимпульсные технологии.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- выявления закономерностей формирования искровых разрядов в слое токопроводящих гранул, математического моделирования и анализа энергетических процессов в электроэрозионной нагрузке и определения основных требований к преобразователям параметров электрической энергии;
- определения эффективных методов интенсификации порошкообразования и стабилизации основных параметров разрядных импульсов;

- исследования энергетических процессов в преобразователях с изменяемыми условиями заряда и разряда накопительных конденсаторов;

- разработки новых схемных решений и алгоритмов, реализующих оптимальные электротехнологические режимы систем искрового диспергирования токопроводящих материалов;

- создания теоретических основ анализа, расчета и проектирования систем электроимпульсного диспергирования токопроводящих материалов, опытной проверки и внедрения полученных результатов в промышленности.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы математического и физического моделирования. Теоретические исследования и расчеты выполнялись с применением методов теории электрических цепей, электромагнитного поля, матричного исчисления, функций комплексного переменного, гармонического анализа и планируемого эксперимента.

Научная новизна. Предложена концепция и создано новое направление в решении проблемы повышения производительности систем электроискрового диспергирования и стабильности их основных электротехнологических параметров, основанное, в отличие от традиционных, на формировании в слое токопроводящих частиц многоканальных искровых разрядов.

Выявлены ранее неизвестные особенности формирования искровых разрядов в слое токопроводящих материалов, исследованы детерминированные характеристики такой электроэрозионной нагрузки, установлены зависимости ее электрического сопротивления от напряжения и частоты разрядных импульсов, а также увеличение дисперсии указанного сопротивления к окончанию разрядов.

Впервые реализована параметрическая амплитудно-импульсная стабилизация режимов искровых разрядов в слое металлических гранул, определены области применения частотно-импульсного и широтно-импульсного регулирования параметров систем искрового диспергирования материалов.

Созданы новые математические модели нагрузки для расчета электроэнергетических процессов, поиска оптимальных режимов разрядов, интенсификации порошкообразования и учета электрофизических характеристик диспергируемых токопроводящих частиц.

Развита теория многофазных линейных необратимых устройств (ЛНУ), определены условия эффективного их включения в цепи заряда накопительных конденсаторов, получения высоких КПД и больших импульсных мощностей в нагрузке. Установлено, что неустойчивость компенсирующих элемен-

тов таких устройств не влияет на их КПД, а ее влияние на величину потребляемой от сети мощности зависит от величины и характера изменения сопротивления нагрузки (при оптимальном стабильном сопротивлении нагрузки такое влияние отсутствует). Определены условия реализации в ЛНУ параметрической стабилизации режимов в нагрузке.

Созданы новые силовые структуры полупроводниковых преобразователей электроэнергии с накопительными конденсаторами, начальные и конечные условия заряда (разряда) которых в процессе работы непрерывно изменяются, что позволило реализовать параметрическую стабилизацию режимов искровых разрядов в слое ТМ и уменьшить удельные энергозатраты в системах ОЗЭД. Предложен новый алгоритм определения параметров и условий включения регулирующих цепей преобразователя по детерминированным характеристикам нагрузки для реализации оптимальных электроэнергетических параметров систем электроискрового диспергирования материалов.

Обоснованы новые методы интенсификации искрений в слое и защиты электродов от разрушения за счет введения гранул с другой шероховатостью поверхности, создания в слое зон с различной подвижностью гранул и дисперсного порошка, возбуждения вспомогательных искрений и использования магнитного поля.

Практическая ценность работы. Использование установленных закономерностей и новых научных положений, обоснованных в диссертационной работе, позволило создать качественно новые производительные системы электроимпульсного диспергирования токопроводящих материалов с параметрической стабилизацией режимов искровых разрядов. Проведенные исследования позволяют выбрать рациональные характеристики систем и способы регулирования основных электротехнологических параметров, а также реализовать оптимальные режимы электроискрового получения дисперсных порошков токопроводящих материалов.

Автор защищает:

- концепцию повышения производительности систем искрового диспергирования, КПД и стабилизации их электротехнологических параметров;
- закономерности формирования искровых разрядов в слое токопроводящих гранул и изменения его электрического сопротивления;
- способы параметрической амплитудно-импульсной стабилизации режимов искровых разрядов, широтно-импульсного регулирования импульсной мощности разрядов и дисперсности порошка, а также частотно-импульсного регулирования производительности электроискрового диспергирования;

- элементы теории линейных необратимых устройств, использующих емкостные накопители энергии при питании импульсных нагрузок;
- научные основы и схемы систем электроискрового диспергирования, использующих накопительные конденсаторы с изменяемыми начальными и конечными условиями их заряда (разряда);
- результаты сопоставительного анализа схем преобразователей электроэнергии и областей регулирования электротехнологических параметров;
- методы интенсификации искрений в слое и защиты электродов от разрушения;
- результаты внедрения разработанных электроимпульсных систем, реализующих новые прогрессивные технологии получения порошков токопроводящих материалов.

Реализация результатов работы осуществлялась как путем разработки лабораторных систем мощностью до 5 кВт, так и созданием опытно-промышленного оборудования мощностью до 100 кВт, которое внедрено на предприятиях химической, станкостроительной и металлургической промышленности.

Под руководством и при участии автора создана серия двухканальных тиристорных источников питания искровыми разрядами ИПИР-100 ($P \leq 100$ кВт, $f \leq 4 \cdot 10^3$ Гц, $I_{\text{вых.}} \leq 8$ кА), внедренных в технологических линиях: получения порошков носителей и компонентов катализаторов Госпредприятия "Плазматех" (г.Новомосковск, Тульской обл.), переработки молибденовых концентратов Киргизского горнорудного комбината (г.Кара-Балта), переработки шламовых и стружечных отходов из оксидорезающей стали Фрунзенского завода сверл, очистки водных стоков НПО "Ротор" (г.Черкассы) и Госпредприятия "Защита окружающей среды" (г.Краснодар).

Разработаны электроискровые установки мощностью до 20 кВт, которые использованы в технологических процессах: электроискровой переработки и дисперсного упрочнения вторичных платиновых сплавов при изготовлении стекловолоконного оборудования на НИИ "Суперметалл" (Московская обл., г.Зеленоград); получения ультрадисперсных жаростойких металлических порошков (п/я А-7354, г.Свердловск); диспергирования металлоотходов (НПО "Ротор" г.Черкассы и Фрунзенский ИЦ "Искра"); создания жаропрочных систем типа $Ni-Mo-Al-x$, $Ni-Cr-Al-x$ и $Ti-Al-x$ (Курский политехнический институт); получения лакокрасочных пигментов на основе оксидов титана и железа (ИП "Плазматех" и Санкт-Петербургский институт машиноведения).

В настоящее время для НПК "Суперметалл" на базе ПЭВМ AT286/287 разрабатывается автоматизированная система ОЭЭД с адаптивным управлением 5 технологическими и 3 электрическими параметрами системы.

Подтвержденный экономический эффект от внедрения результатов работы в народном хозяйстве превышает 3,6 млн.руб. при доле автора - более 1,4 млн. (по состоянию на январь 1991 г.).

Апробация работы. Основные научные положения и результаты работы докладывались на 2 международных, 8 всесоюзных и 6 региональных конференциях и совещаниях.

Публикации. Основные результаты работы отражены в 86 научных работах (из них 11 без соавторов), в т.ч. в 1 монографии, 55 статьях и докладах, а также в 5 отчетах по НИР. Новизна технических решений защищена 25 авторскими свидетельствами СССР.

Структура и объем работы. Диссертация, представленная в форме научного доклада и состоит из 6 разделов, заключения и списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

I. ФОРМИРОВАНИЕ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ В СЛОЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ГРАНУЛ

Особенности создания новых электротехнологических систем. Создание электротехнологического оборудования, реализующего новые электроимпульсные технологии получения дисперсных порошков, предполагает решение в первую очередь задач повышения производительности диспергирования при допустимых удельных энергозатратах и повышения стабильности режимов разрядов. Эффективность решения этих задач и определяет в основном целесообразность использования тех или иных методов и средств. При разработке промышленных технологических систем электроискрового диспергирования необходимо пройти три основных этапа.

а) Исследовать принципиальную возможность и особенности искрового диспергирования исходного материала, а также оценить возможность реализации требуемых параметров разрядных импульсов и характеристик порошка (дисперсности, структуры, фазового и химического составов).

Для этого необходимы системы, изменяющие в широком диапазоне параметры единичных разрядных импульсов в нагрузке. Средняя мощность таких систем может быть небольшой, однако они должны обеспечивать в низкосмной нагрузке (сопротивлением менее 0,1 Ом) высокие импульсные параметры и быть устойчивыми к стохастическому изменению в широком диапазоне сопротивления нагрузки.

б) Определить требуемую производительность диспергирования, конструкцию и электрические характеристики технологического аппарата диспергирования (ТАД), мощность и структуру преобразователя электроэнергии, способы стабилизации и регулирования электрических и технологических параметров системы, а также оценить удельные энергозатраты.

На этом этапе требуется электрооборудование, реализующее выбранные на первом этапе диапазоны изменения параметров разрядных импульсов и имеющее возможность выбора способов стабилизации и регулировки режимов всей системы.

в) Выбрать оптимальные электрические и технологические режимы электротехнологической системы получения дисперсных порошков.

Для решения задач этого этапа необходимо создать мощные высокочастотные преобразователи электроэнергии, реализующие оптимальные параметры разрядных импульсов, а также режимы и структурные связи всей системы. Диапазоны изменения параметров таких преобразователей гораздо меньше, чем на первом и втором этапах, но стабильность режимных параметров всей системы, и ее мощность должны быть гораздо выше.

Многоканальность разрядов и миграция искрений. Анализ осциллограмм токов и падений напряжений в одном и нескольких ТАД (подключаемых к одному генератору импульсов) и эрозийных следов на электродах, гранулах и пластинах, устанавливаемых параллельно и перпендикулярно электродам [1, 5], и скоростная фотосъемка (до $5 \cdot 10^5$ кадр/с) искрений в слое гранул свинца и алюминия [3, 37] показали возможность протекания в слое ТМ многоканальных мигрирующих искровых разрядов.

На рис.1 приведены осциллограммы тока и падения напряжения, снятые при искровом диспергировании в воде монослоя гранул свинца, на рис.2 - кривые изменения во времени электрического сопротивления слоя $R_{\Sigma}(t)$ и поглощаемой в нем мощности $P(t)$, а на рис.3 - изменение количества одновременно регистрируемых искрений $\bar{n}(t)$ и распределение количества искрений по длительности их регистрации $n(\Delta t)$ за время одного разрядного импульса длительностью $\tau \gg \Delta t$. Из рис.2 и 3 видно, что кривая $n(t)$ наилучшим образом коррелирует с кривой $P(t)$ и что при длительности разрядного импульса $\tau \approx 90$ мкс более 60% искрений продолжались менее 5 мкс и менее 5% искрений существовали 90 мкс. Проведенный анализ показал, что производительность диспергирования определяется общим числом искрений, наибольшие размеры частиц получаемого порошка искрениями длительностью $\Delta t \approx \tau$, а кривая распределения количества частиц порошка по их размерам коррелирует с кривой $n(\Delta t)$ (по крайней мере, в области $\Delta t \gg 5$ мкс при $\tau = 90$ мкс и диспергировании свинца).

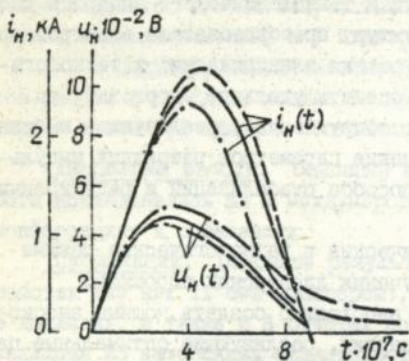


Рис.1

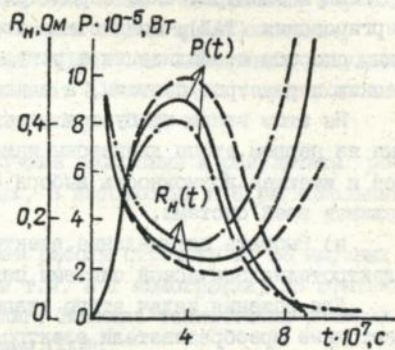


Рис.2

При диспергировании алюминия распределения $\bar{n}(t)$ и $n(\Delta t)$ имели аналогичный вид, но наблюдалось до 3% искрений длительностью $200 \text{ мкс} > t$, что объясняется высокой окислительной способностью алюминия в воде. Поэтому при одинаковых параметрах разрядных импульсов диспергирование свинца может проходить при больших удельных энергозатратах, но в порошке алюминия могут присутствовать более крупные частицы, что и было подтверждено на практике.

Анализ поверхности гранул свинца диаметром 3-4 мм показал наличие эрозионных следов диаметром до 1 мм, но размеры получаемого порошка не превышали 20 мкм. Известно, что в искровом канале плотности токов составляет $10^6 - 10^8 \text{ А/см}^2$, поэтому при разрядном токе до 3 кА и соответственно токе в сотни ампер в одном искровом канале диаметр канала не должен был превышать 0,1 мм. Увеличение размеров эрозионной лунки возникает из-за высокоскоростной миграции искрового канала по поверхности гранулы с удалением от центра лунки до тех пор, пока длина искры не превысит критического значения на этом контакте. Исчезновение искрения на одном контакте не

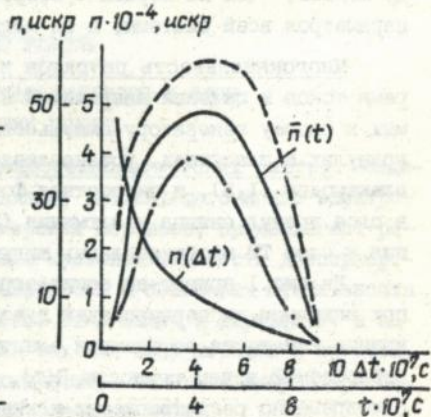


Рис.3

обязательно приводит к исчезновению канала разряда, который может замкнуться через соседние гранулы, что невозможно при отсутствии между электродами слоя токопроводящих гранул. Скоростная съемка показала также, что после исчезновения регистрируемого искрения в слое новое искрение на том же контакте за время $t < \tau$ не наблюдалось, то есть время восстановления подвергнувшегося эрозии контакта, как правило, больше длительности импульса. Этот результат затем позволил понять зависимость электрического сопротивления слоя от частоты разрядов.

Исследования подтвердили, что увеличение количества искрящих контактов более эффективно не за счет увеличения величины МЭП, а за счет увеличения ширины и высоты слоя. При этом увеличивается производительность диспергирования и повышается стабильность режимов разрядов.

Эффективность импульсного электропитания. Увеличение количества одновременно искрящих контактов в соответствии с рис.2 и 3 требует увеличения мощности в нагрузке, что предопределяет импульсное электропитание установок ОЭД [1-6]. При таком питании увеличивается также омическое сопротивление контактных зон между гранулами, что интенсифицирует процесс ОЭД и повышает КПД систем.

Для сопротивления кругового контакта радиуса r_1 между проводниками радиуса r_2 переменному току частотой ω_n из работ К.К.Намитокова можно записать

$$R_n = \frac{16 \rho}{3 \pi^2} F_n \left[r_1/r_2, r_1/\delta_n \right], \quad (1)$$

где ρ - удельное сопротивление, $\delta_n = \sqrt{2\rho/\mu\omega_n}$ - глубина скин-слоя, $F_n \left[r_1/r_2, r_1/\delta_n \right]$ - форм-фактор, учитывающий отклонение силовых линий тока от радиуса сферы с центром в точке $r_1=0$, связанное с конечностью зоны проводимости контакта. Выполнив искусственную периодизацию (периодом T) для кривой импульса тока длительностью $\tau < T$

$$i(t) = \begin{cases} I_0 \sin(\pi t/\tau), & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & \tau < t < T \end{cases}$$

после разложения $i(t)$ в ряд Фурье получим

$$i(t) = \sum_n t_n \sin \frac{\pi n}{T}, \quad \text{где} \quad t_n = \frac{2I_0 \tau}{T} \int_0^{\tau} \sin \frac{\pi t}{T} \sin \frac{\pi n t}{T} dt,$$

или после вычисления интеграла

$$t_n = \begin{cases} \frac{I_0}{\pi n} \left[\frac{\sin(1-n/m)\pi}{1-n/m} - \frac{\sin(1+n/m)\pi}{1+n/m} \right] & n \neq m, \\ I_0/m, & n = m. \end{cases} \quad (2)$$

где $n = 1, 2, \dots$, а $m = T/\tau$ - скважность импульсов.

Определив для каждой гармоники R_n и t_n согласно (1) и (2), численно сопротивление отдельного контакта импульсному току по формуле

$$R_{\tau} = \sum_n t_n^2 R_n / \sum_n t_n^2, \text{ которую можно привести к виду}$$

$$R_{\tau} = \frac{16\rho}{3\pi^2 r} F_{\tau} \left(r_1/r_2, r_1/\delta_{\tau} \right), \quad (3)$$

где $\delta_{\tau} = \sqrt{2\rho/\mu_0 \omega_{\tau}}$, а $\omega_{\tau} = \pi/\tau$.

Таким образом, сравнение R_n и R_{τ} сводится к сравнению форм-факторов F_n и F_{τ} , численный расчет которых показывает, что уже при $r_1 > 5\delta_{\tau}$ и при $n \geq 2$ сопротивление $R_{\tau} > R_n$, позволяя повысить КПД преобразователя электроэнергии.

В работах [1-4] установлено, что наиболее эффективным является электропитание (ТАД) низковольтными (до 1 кВ) высокочастотными мощными импульсами небольшой длительности (до 100 мкс). Анализ осциллограмм напряжений и токов при длительностях импульсов от 10^{-5} до 0,5с показал, что при формировании импульсов длительностью $\tau \geq 0,1\text{с}$ после протекания первого сильноточного ($I_1 > 1\text{kA}$) импульса длительностью $\tau_1 < \tau/200$ в течение времени $\tau_2 \approx 50\tau_1$ протекал холостой разряд (слаботочный разряд без искрений). Затем в течение времени $\tau_3 = \tau - \tau_1 - \tau_2$ протекали импульсы тока с амплитудой и длительностью в несколько раз меньшими, чем I_1 и τ_1 , что уменьшает частоту разрядных импульсов и интенсивность диспергирования в ТАД.

Известно, что при разряде конденсаторов на линейное активное сопротивление условия $P_u = P_{\max}$ реализуется при добротности разрядного контура $Q_2 \approx 1,2$. Аппроксимировав кривую $R_H(t)$, приведенную на рис.2, в виде функции

$$R_H(t) = R \left[1 + A \cos 2\pi t / \tau \right],$$

(где R - среднее за время τ значение R_H , а коэффициент $A < 1$), было получено, что для таких нагрузок мощность $P_u = P_{\max}$ при $Q_2 \approx 0,7$. Поэтому системы ОЗЭД обычно выполнялись таким образом, чтобы удовлетворялось условие $0,5 < Q_2 < 0,9$, при котором реализуется большая импульсная мощность в нагрузке и возможна естественная коммутация тиристорных разрядных ключей.

Стабилизация режимов разрядов. Анализ осциллограмм напряжения на конденсаторе и в ТАД, а также тока в разрядном контуре [1,2] выявил зависимости режимов разрядов от напряжения заряда U_1 конденсатора. При колобательном разряде конденсатора увеличение (уменьшение) напряжения U_1 вызывало увеличение (уменьшение) напряжения его перезаряда U_2 обратной полярности относительно напряжения U_1 , то есть

возникла функциональная связь $U_2(U_1)$. При ашеридическом разряде длительность τ которого фиксировалась специальными формирующими цепями, на конденсаторе происходило уменьшение (увеличение) остаточного напряжения U_3 (но той же полярности, что и U_2), то есть возникла зависимость $U_3(U_1)$. Увеличение напряжения U_1 вызывало смещение вниз по оси OR , приведенной на рис.2, среднестатистической кривой $R_H(t)$ (увеличивая таким образом добротность Q_2 разрядного контура), а уменьшение U_1 вызывало смещение кривой $R_H(t)$ вверх по оси OR , уменьшая величину Q_2 .

Установлено также, что для каждой системы ОЗЭД существует свое значение частоты разрядов $f=f_0$, при превышении которого кривая $R_H(t)$ смещается по оси OR_H вверх. Это происходит потому, что время восстановления электрических контактов $\tau = 1/f_0$ между гранулами (происходящее в основном под действием гравитационных сил) гораздо больше времени их разрыва при искровой эрозии, и потому, что в слое имеется хоть и большое, но конечное число контактов. Увеличение высоты и ширины слоя вызывало увеличение f_0 , но во всех случаях при $f > f_0$ наблюдались зависимости $Q_2(f)$ и $R_H(f)$.

Выявленные зависимости применялись для реализации параметрической стабилизации режимов разрядов, глубина которой регулировалась изменением величины U_2 или U_3 при амплитудно-импульсной стабилизации, или изменением длительности разрядных импульсов с помощью специальных цепей при широтно-импульсной стабилизации [1-4,9-12,22-26,39,40].

Для стабилизации режимов разрядов в работе применялись также методы воздействия на ферромагнитные частицы слоя магнитным полем, возбуждения искрений в другом направлении, создания в слое зон с различной подвижностью гранул и интенсивностью эвакуации порошка, введения в слой гранул с другой шероховатостью поверхности [2,35-38,40-42].

2. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОЗЭД ТМ

Моделирование нагрузки преобразователя электроэнергии. При разработке систем ОЗЭД электрическое сопротивление $R_H(t)$ ТАД представлялось различными моделями в зависимости от того, какие процессы имеют первостепенное значение. При анализе энергетических характеристик преобразователей электроэнергии (мощности, КПД, средних токов и т.п.) ТАД представлялся линейным сопротивлением

$$R_H = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_k = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \int_0^{\tau_k} U_k(t) i_k(t) dt / \int_0^{\tau_k} i_k^2(t) dt, \quad (4)$$

где N - число импульсов за время измерения Δt , R_k - среднее сопротивление ТАД в импульсе k ; t_k , $U_k(t)$ и $i_k(t)$ - его длительность, падение напряжения в МЭП и разрядный ток. При пренебрежении потерями электроэнергии в разрядном контуре и $Q > 0,5$

$$R_k = 2 \sqrt{\frac{L}{C}} / \sqrt{\left[\frac{\pi}{\ln(U_{1k}/U_{0k})} \right]^2 + 1}, \quad (5)$$

где L - индуктивность разрядного контура, а U_{1k} и U_{0k} - напряжение заряда и остаточное напряжение на конденсаторе емкостью C в цикле k . Условием выбора величины R_k и характеристикой стохастичности ее изменения было получение минимальной дисперсии $D_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_{mk} - I_2)^2$ максимума разрядного тока I_{mk} при среднем его значении I_2 .

При анализе переходных характеристик преобразователей электроэнергии (например, минимального времени сходимости процесса) из-за возникновения в нагрузке возмущений она моделировалась сопротивлением R_k , величина которого определялась по формулам (4) или (5) и принималась неизменной в течение протекания импульса k , а затем скачкообразно изменялась для импульса $(k+1)$ [17-19]. Величина сопротивления слоя в паузах между разрядными импульсами, как правило, в 20 и более раз больше сопротивления R_k при протекании искрового разряда.

В работе [17] с помощью методов теории планируемого эксперимента была получена в виде полинома модель сопротивления R_k как функции от величины U_{1k} и высоты h слоя гранул, что позволило учитывать изменение режимов разрядов между дозагрузками ТАД. Оценка дисперсии D_1 и неустойчивости I_{mk} для разных схем преобразователей электроэнергии проводилась в работах [8,9], где показана эффективность введения в системы ОЗЭД отрицательной обратной связи величины U_{1k} от U_{0k-1} .

Характер осциллограмм $U_k(t)$ и $I_k(t)$ позволяет аппроксимировать их форму кривыми, близкими к нормальной кривой распределения вероятностей, а функции, описывающие эти кривые, исследовать методами дифференциального исчисления. Поэтому при необходимости анализа режимов преобразователя, связанных с изменением величины R_k за время $t < t_k$, для $R_k(t)$ можно использовать выражение:

$$R_k(t) = \frac{U_{mk}}{I_{mk}} \exp \left[\frac{(t-a_1)^2}{2D_1} - \frac{(t-a_2)^2}{2D_2} \right] \quad (6)$$

где $t=a_1$ и $t=a_2$ - моменты времени, при которых соответственно $i_k(t) = I_{mk}$ и $u_k(t) = U_{mk}$. D_2 - дисперсия величины U_{mk} .

Экспериментальный анализ кривой $R_k(t)$ проводился с использованием двухканального 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя, позволяющего производить измерения с частотой $f_k = 10^5 - 10^6$ Гц и определять величину сопротивления в момент измерения t по формуле

$$R_k(t) = \left[CU_1^2 - CU_{окл}^2(t) - L i_k^2(t) \right] / 2 \int_0^t i_k^2(t) dt, \quad (7)$$

что дало хорошее совпадение с расчетами сопротивления по формуле (6).

Влияние на режимы ОВЭД характеристик гранул. Анализ проводился в предположении одинакового протекания процессов для всех гранул слоя с использованием линейной [20] и нелинейной [21] математических моделей и программ расчета эквивалентного электрического сопротивления гранулы, электромагнитного и теплового полей при протекании импульсного тока и ее оплавлении. Моделирование проводилось в сферической системе координат для области $G = \{0 < r < R, 0 \leq \theta \leq \pi/2, \phi = 0\}$ с учетом симметрии полей относительно горизонтальной и вертикальной осей. Источниками тепла считались Джоулево тепловыделение при токе $i(t)$ и тепловой поток $g(t)$, действующий на гранулу со стороны искры.

Используя систему уравнений Максвелла и уравнение теплопроводности для вектора магнитной индукции $\vec{B} = (0, 0, B_\phi)$, $B_\phi = B_\phi(r, \theta, t)$ и температуры $T(r, \theta, t)$, получим уравнения

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{\mu_0 \sigma(T)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial r} + \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{1}{\mu_0 \sigma(T) r^2 \sin \theta} \frac{\partial \vec{B}}{\partial \theta}, \quad (8)$$

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\lambda(T) \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right] + P, \quad (9)$$

где $\vec{B} = r B_\phi \sin \theta$, $C_v(T)$ - удельная объемная теплоемкость гранулы, $\lambda(T)$ - теплопроводность, $P = (j_r^2 + j_\theta^2) / \sigma(T)$ - мощность Джоулевого тепловыделения, $j_r = (\mu_0 r^2 \sin \theta)^{-1} \partial B / \partial \theta$ и $j_\theta = -(\mu_0 r \sin \theta)^{-1} \partial B / \partial r$ - составляющие плотности тока, $\sigma(T)$ - электропроводность.

Для области G с границей $\Gamma = \sum_{n=1}^5 \Gamma_n$, показанной на рис. 4, система нелинейных уравнений (8) и (9) дополняется начальными условиями $B|_{t=0} = 0$ и $T|_{t=0} = T_0 = \text{const}$ и граничными условиями

$$\vec{B} \Big|_{\Gamma_1} = \frac{\mu_0 i(t) \sin^2 \theta}{2\kappa \sin^2 \theta_q}, \quad \vec{B} \Big|_{\Gamma_2} = \frac{\mu_0 i(t)}{2\kappa}, \quad \vec{B} \Big|_{\Gamma_3, \Gamma_4} = 0,$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial n} \Big|_{\Gamma_5} = 0, \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Gamma_1} = q(t) \quad \text{и} \quad \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5} = 0,$$

полученными из закона полного тока с учетом отсутствия поля по оси тока и в центре гранулы, симметрии процессов относительно горизонтальной и вертикальной осей и отсутствия теплопередачи в среду на границе Γ_2 . Отверстие малого радиуса r_0 с границей Γ_3 введено для устранения особенности в вычислительном алгоритме при $r=0$. Для учета теплоты плавления в уравнении (9) использовалась эффективная теплоемкость, вычисляемая с учетом скрытой теплоты фазового перехода.

Система уравнений (8) и (9) с неизвестными V и T и нелинейными электро- и теплофизическими характеристиками материала исходных гранул решалась численно с применением локально-одномерного метода, с помощью которого двумерная задача расщеплялась на последовательность одномерных, решаемых методом скалярной прогонки. Расчетные формулы такого метода просты и удобны в реализации, кроме того он устойчив из-за преобладания диагональных элементов матрицы коэффициентов разностных уравнений, что обеспечивает существование и единственность их решения.

Эквивалентное сопротивление гранулы вычислялось по формуле

$$R_n = 2\pi \int_r \int_0^{\pi/2} \int_0^{\tau} \frac{j_r^2 + j_\theta^2}{\sigma(T)} r^2 \sin\theta \, dr \, d\theta \, dt \Big/ \int_0^{\tau} i^2(t) \, dt \quad (10)$$

путем численного интегрирования и использования значений j_r и j_θ , полученных из решения уравнений (8) и (9).

На модели проводился анализ влияния электрофизических характеристик материала гранул, их размеров и параметров разрядных импульсов на электромагнитные и тепловые процессы и электрическое сопротивление контактной зоны. Расчет электротепловых процессов для алюминия и платины показал, что при одинаковых параметрах разрядных импульсов и одинаковых размерах гранул изолинии температуры фазового перехода металл-жидкость для платиновых гранул глубже, больше и вычисляемое по формуле (10) электрическое сопротивление, что определяет для платины меньшие удельные энергозатраты [42], подтвержденные на практике.

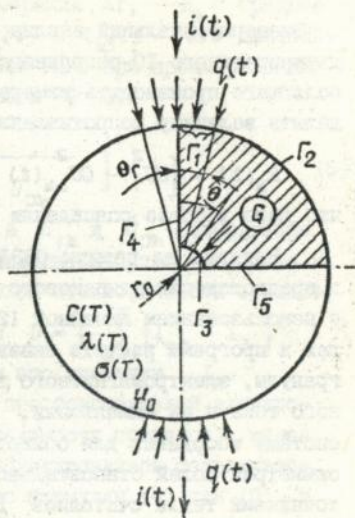


Рис. 4

Влияние параметров преобразователя и ТАД на производительность диспергирования. В работе проведен анализ зависимостей производительности системы m и удельных энергозатрат w от мощности потребления P , емкости рабочих конденсаторов C , напряжения их заряда U_1 , частоты разрядов f , их длительности t , длины МЭП l , размера гранул d , рабочей площади электродов S , высоты слоя h и скорости потока жидкости v . Решения оптимизационных электротехнологических задач проводились с использованием статистических методов теории планируемого эксперимента [2,13,38,40]. Так, для определения производительности систем ОЗЭД алюминия в воде получено уравнение регрессии в виде

$$y = 5,08 + 0,81x_1 - 3,4x_2 + 0,3x_3 - 1,36x_4 + 0,14x_5 + 1,92x_1x_2 + 0,66x_2x_3 + 0,24x_3x_4 - 2,43x_3x_5 - 0,1x_1^2 + 1,6x_2^2 + 0,01x_5^2,$$

где $y = \frac{m}{m_0}$, $x_1 = \frac{f}{f_0}$, $x_2 = \frac{c}{c_0}$, $x_3 = \frac{d}{d_0}$, $x_4 = \frac{s}{s_0}$, $x_5 = \frac{v}{v_0}$ - параметр и влияющие на него факторы в относительных единицах.

Исследования однофакторных и многофакторных зависимостей показали, что при $f < f_0$ величина m прямо пропорциональна P и f (практически без изменения w и Q_2). Зависимости же m от c, t, l, s, d, h и v - нелинейны и имеют экстремумы. Изменение этих факторов изменяет также и величины Q_2 и w , причем повышение f обычно повышает дисперсность получаемого порошка, а увеличение t, c, d и v - уменьшает.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕОБРАТИМЫХ УСТРОЙСТВ

Свойства и особенности линейных необратимых устройств. Исследования многофазных силовых фильтров симметричных составляющих, проведенные А.Н.Мялихом, А.К.Шидловским, Л.В.Пукерником, В.Л.Фабрикантом и Х.Ф.Фазыловым, показали, что такие фильтры являются линейными необратимыми устройствами и реализуют стабилизацию входных и выходных характеристик при изменении электрического сопротивления нагрузки от нуля до бесконечности. Поэтому анализ эффективности использования в системах ОЗЭД ТМ таких устройств, устойчивых к режимам короткого замыкания и холостого разряда в нагрузке, представляет большой интерес.

На рис.5 представлена одна из схем ЛНУ, выполненного на основе трехфазного фазорегулятора, одноименные первичные и вторичные фазные обмотки которого соединены последовательно и повернуты в пространстве на угол $\alpha = 90^\circ$, а к точкам соединений подключены звездой резисторы сопротивлением R . Индуктивности и активные сопротивления указанных обмоток и коэффициент взаимной индукции между ними равны соответствен-

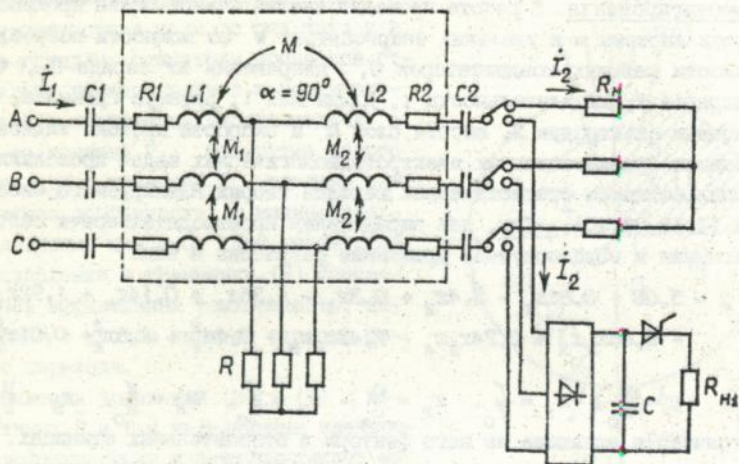


Рис.5

но L_1, L_2, R_1, R_2 и M . Для комплексных напряжений и токов, $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1$ и \dot{I}_2 на входе и выходе однофазного эквивалента ЛНУ справедливы соотношения [22-26, 39]

$$\dot{U}_1 = (R + R_1 + jX_1) \dot{I}_1 - (R - R_0) \dot{I}_2, \quad (II)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_H = (R + R_0) \dot{I}_1 - (R + R_2 + jX_2) \dot{I}_2, \quad (I2)$$

где $X_1 = \omega(L_1 + M_1/2) - 1/\omega C_1$ и $X_2 = \omega(L_2 + M_2/2) - 1/\omega C_2$ - реактивные сопротивления в коллтурах первичной и вторичной обмоток ФР, $Z_H = R_H + jX_H$ - сопротивление нагрузки, $R_0 = 1,5\omega M$ - сопротивление взаимной индукции между однофазными обмотками фазорегулятора с учетом их индуктивной связи с обмотками других фаз, ω - частота питающей сети. Отметим, что в отличие от реальных ЛНУ их однофазные эквиваленты не удовлетворяют принципу взаимности и не имеют физической интерпретации.

Без учета величин $R_1 \ll R_0$ и $R_2 \ll R_0$ при $R \ll R_0$ потребляем от сети активную мощность P_1 , коэффициент $\cos \varphi$ и потребляем в нагрузке активную мощность P_H можно представить в виде

$$P_1 = RU_1^2 / (R_1^2 + X_1^2), \quad \cos \varphi = R / (R^2 + X_1^2)^{1/2}, \quad (I3), (I4)$$

$$P_H = 4R^2 R_H U_1^2 / [R^2 + X_1^2] [(R + R_H)^2 + X_{2H}^2], \quad (I5)$$

где $X_{2H} = X_2 + X_H$ - общее реактивное сопротивление контура нагрузки. Тогда для КПД ЛНУ $\eta = P_H / P_1$, получим

$$\eta = 4RR_H / \left[(R+R_H)^2 + X_{2H}^2 \right]. \quad (16)$$

Из уравнений (II)-(16) видно, что $P_1 \neq P_1(Z_H)$, $P_H < P_1$, а КПД и соэф ЛНУ взаимно-независимые величины ($\eta \neq \eta(X_1)$ и $\eta \rightarrow \eta_{max}$ при $X_{2H} \rightarrow 0$ и $R_H \rightarrow R$, а соэф $\rightarrow 1$ при $X_1 \rightarrow 0$ независимо от изменения X_{2H} и R_H); напряжение холостого хода на выходе ЛНУ и ток короткого замыкания в нагрузке ограничены и не зависят от коэффициента трансформации ФВ-авторегулятора, однако мощность в нагрузке $P_H \leq P_1$.

Влияние нестабильности элементов ЛНУ на их свойств. Для мощности P_0 , рассеиваемой на компенсирующих резисторах R , можно записать [22]

$$P_0 = P_1 \left[(R_H - R)^2 + X_{2H}^2 \right] / \left[(R_H + R)^2 + X_{2H}^2 \right]. \quad (17)$$

Анализ уравнения (17) показывает, что изменение X_{2H} влияет на величину P_0 больше, чем изменение R_H . Так, при $0,7 < R_H/R < 1,7$ $P_0 < 0,06P_1$, и кривая $P_0(R_H)$ имеет широкий минимум при $P_0 \rightarrow 0$, а при $0,7 < X_{2H}/R < 1,7$ $P_0 = (0,11-0,42)P_1$. Поэтому введение в ЛНУ компенсирующих конденсаторов C_1 и C_2 оправдано [41].

В ЛНУ вместо резисторов R и R_H могут использоваться их аналоги, отличающиеся нестабильностью своих входных сопротивлений. В работе проведен анализ характеристик ЛНУ при условии $X_1 = X_2 = 0$, $R_1 \ll R$, $R_2 \ll R$, но $R \neq R_0$. Тогда

$$P_1 = (R + R_H) / (R_0^2 + RR_H) U_1^2, \quad (18)$$

$$P_H = \frac{(R_0 + R) R_H^2}{(R_0^2 + RR_H)(R+R_H)} P_1, \quad P_0 = \frac{R(R_H - R_0)^2}{(R_0^2 + RR_H)(R+R_H)} P_1,$$

$$\dot{U}_H = \dot{U}_1 (R_0 + R) R_H / (R_0^2 + RR_H), \quad (19)$$

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_1 R (R_H - R_0) / (R_0^2 + RR_H) = \dot{U}_H R (R_H - R_0) / R_H (R + R_0). \quad (20)$$

Из (18) видно, что мощность P_1 одинаково зависит от R и R_H . Для потребления от сети стабильной мощности $P = U_1^2/R$ достаточно, чтобы $R \rightarrow R_0$ или $R_H \rightarrow R_0$. При допустимой 5% нестабильности мощности P_1 , сопротивления R_H и R могут изменяться в пределах $0,7 < R_H/R_0 < 1,6$ и $0,82 < R/R_0 < 1,25$. Анализ также показывает, что рассогласование сопротивлений R ухудшает стабильность потребляемой мощности P_1 , но не уменьшает КПД ЛНУ

$$\eta = (R_0 + R)^2 R_H / (R_0^2 + RR_H) (R + R_H)$$

во всем диапазоне изменений сопротивления R_H , то есть относительные потери энергии в ЛНУ при рассогласовании R и R_H не увеличиваются.

Из уравнений (19) и (20) можно определить изменение напряжений \dot{U}_H и \dot{U}_O при неустойчивости R_H и R . Так, при $0,85 < R_H/R_O < 1,2 - U_O < 0, U_H$, при изменении R в таких же пределах неустойчивость U_O также незначительна, но при $R_H \rightarrow 0$ $U_O \rightarrow U_1$ (в $U_H \rightarrow 0$) и при $R_H \rightarrow \infty$ $U_O \rightarrow U_1$ (в $U_H \rightarrow 2U_1$). Это свойство ЛНУ использовалось в схемах преобразователей для параметрической стабилизации режимов электропитания различных нагрузок.

При мощности потребителей $P_H < P_1$, мощность потерь $P_O = P_1 - P_H$, поэтому использование ЛНУ целесообразно тогда, когда мощность нагрузки уменьшается незначительно или ее уменьшение непродолжительно.

Использование в ЛНУ накопительных конденсаторов. В работах [22-26] показано, что ЛНУ являются также фильтрами высших гармоник и в их цепях могут использоваться, как показано на рис.5, нелинейные элементы и накопительные конденсаторы, реализуя при этом $P_H \approx P_1$. Для эквивалента ЛНУ при компенсации его реактивных сопротивлений и при $\Delta t \gg T$ (где T - период основной гармоники тока) можно записать

$$U_O = 2U_1(1 - e^{-t/RC}), \quad i^2 = \frac{2U_1}{R} e^{-t/RC}$$

$$W_O = C(U_2^2 - U_3^2)/2, \quad W_R = (U_1^2/R) \int_{t_1}^{t_2} (1 - 2e^{-t/RC}) dt,$$

где $t = RC \ln(2U_1 - U_O)/2U_1$, $\Delta t = t_2 - t_1$ - длительность заряда емкости C , W_O - накапливаемая энергия в емкости при заряде емкости C от напряжения U_3 до U_2 , W_R - энергия, рассеиваемая на R за время Δt . В таблице I приведены значения КПД заряда емкости C через ЛНУ при различных значениях U_2 и U_3 , приведенных в относительных единицах U_3/U_1 и U_2/U_1 , где U_1 - среднее фазное напряжение сети.

Таблица I

U_3/U_1	0	0	0,5	0,8
U_2/U_1	1	1,6	1,5	1,3
W_O/CU_1^2	0,5	1,3	1,0	0,53
η	0,7	0,8	0,9	0,88

Анализ показывает, что заряд через ЛНУ с реактивными компенсирующими сопротивлениями происходит с КПД $\eta > 50\%$, который не зависит от их величины, но постоянная цепи заряда конденсаторов $\tau = RC$. Это позволяет выбирать скорость их заряда и ограничивать зарядный ток, не уменьшая КПД и энергии зарядного цикла. При этом КПД заряда увеличивается при увеличении противо-ЭДС для питающей сети, но наиболее важным при использовании ЛНУ является отсутствие в цепях преобразователей сверхтоков и перенапряжений при изменении R_H от

нуля до бесконечности. На рис.6 приведены осциллограммы фазного тока на входе (кривая 1) и на выходе (кривая 2) ЛНУ с накопительными конденсаторами при неперiodических их разрядах на изменяющуюся нагрузку. Повышение энергетических показателей преобразователей, использующих ЛНУ, возможно также при замене компенсирующих сопротивлений источниками эквивалентных противо-ЭДС [26, 39], энергия которых может использоваться для стабилизации режимов нагрузки. Применение ЛНУ с емкостными накопителями энергии в системах ОЭД наиболее целесообразно при исследованиях режимов ОЭД новых материалов и когда дисперсии R_n и параметров разрядных импульсов могут быть особенно большими. В таком случае то, что система с ЛНУ устойчива к изменению сопротивления нагрузки от нуля до бесконечности, является наиболее важным, а средняя мощность системы и частота разрядов могут быть небольшими (соответственно - единицы кВт и единицы - десятки герц).

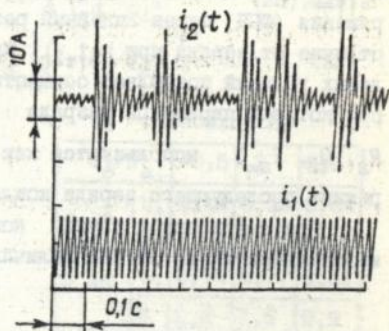


Рис.6

4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Широкому использованию полупроводниковых преобразователей с емкостными накопителями энергии для импульсного питания различных технологических нагрузок способствовали результаты исследований, проведенных учеными: В.Волковым, И.В.Пентеговым, В.А.Полищуком, Г.Л.Бенедиктовым и др. Известны исследования условий формирования высоковольтных подводных электроискровых разрядов в работах Л.А.Дуткина, Г.А.Гулого, Е.В.Кривяцкого, А.И.Вовченко, И.З.Окуня и др., а также режимов низковольтной электроэрозионной обработки (ЗЭО) поверхности металлов в работах В.Р.Лазаренко, Н.И.Лазаренко, В.Н.Золотых, М.Ш.Отто, А.В.Рыбалко, К.К.Намитоква и др. Однако в этих работах основное внимание уделялось режимам полного разряда конденсаторов на нагрузку и их заряда при нулевых начальных условиях.

Заряд конденсаторов при ненулевых начальных условиях. В работе исследовались режимы заряда конденсаторов с ненулевыми начальными условиями $u_c|_{t=0} = u_0$ и неполного разряда конденсаторов на нагрузку

$u_c|_{t=0} = U_{сг}$. Показано, что при заряде от формирователя постоянного напряжения (ФН) через линейный резистор КПД η_1 может быть большим 50%, в отличие от заряда при $u_c|_{t=0} = 0$. Кроме повышения η_1 , использование ненулевых условий позволяет осуществлять стабилизацию режимов разрядов, при которой параметры разряда ($u_c|_{t=0} = U_c$, $t|_{t_2 = \max} = t_{2m}$, $t|_{t_2 = 0} = t_0$, R_2 , Q_2 , I_{2m}) используются как информационные факторы для изменения режима последующего заряда конденсаторов.

При резонансном заряде конденсатора емкостью C через дроссель индуктивности L_1 от ФН величиной U_d (рис.7) для зарядного тока

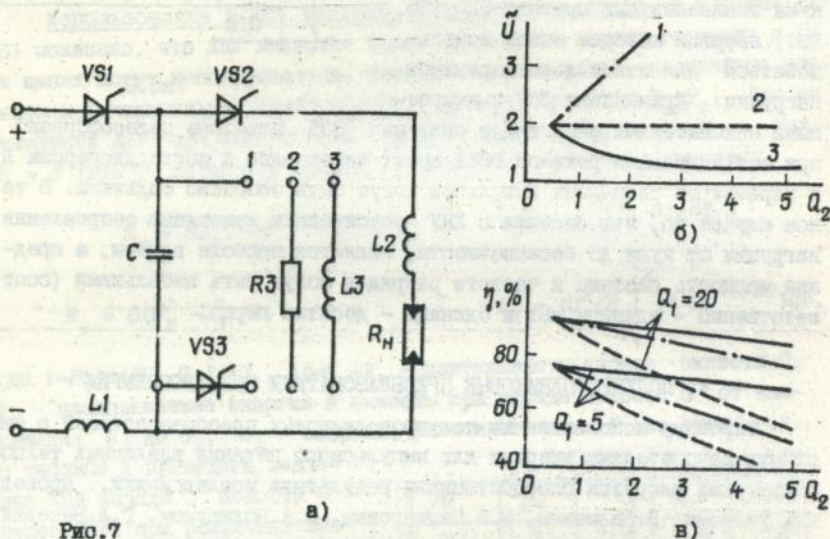


Рис.7

$t_1(t)$ и напряжения $u_c(t)$ на конденсаторе справедливы уравнения

$$t_1(t) = [U_d - U_c] \cdot \frac{2Q_1}{\rho_1 b} \exp(-\omega_1 t / 2Q_1) \sin \frac{\omega_1 b}{2Q_1} t, \quad (21)$$

$$U_c(t) = U_d - \frac{U_d - U_c}{b} \exp(-\omega_1 t / 2Q_1) \left[\sin \frac{\omega_1 b}{2Q_1} t + b \cos \frac{\omega_1 b}{2Q_1} t \right], \quad (22)$$

где Q , $\rho = \sqrt{L_1 C}$ и $\omega = 1/\sqrt{L_2 C}$ – добротность, волновое сопротивление и частота собственных колебаний зарядной цепи, $b = \sqrt{4Q_1^2 - 1}$.

Для напряжения заряда конденсатора U , потребляемой от ФН энергии W и КПД η из (21) и (22) при $Q > 2$, обозначив $e_1 = \exp(-\pi/b)$ можно записать [14,34]:

$$U_1 \approx U_d + [U_d - U_0] e_1, \quad W_1 = 2cU_d [U_d - U_0]. \quad (23), (24)$$

$$\eta = \frac{1}{4} \left\{ [(1+e_1(1-U_0/U_d))^2 - U_0^2/U_d^2] \{1 - U_0/U_d\}^{-1} \right. \quad (25)$$

В таблице 2 приведены значения η_1 и энергии $\frac{c}{2} (U_1^2 - U_0^2)$, выражаемой в относительных единицах $W = W_0/cU_d^2$. Проведенный анализ показывает, что увеличение значений $U_0 > 0$ повышает величину η_1 , особенно при низкой добротности зарядной цепи.

С увеличением Q_1 зависимость η_1 от U_0 уменьшается, что позволяет и $Q_1 > 2$ производить заряд при $U_0|_t < 0$, реализуя высокие W и $U_1 > 2U_d$.

Таблица 2.

U_0/U_d		-0,5	0	0,5
$Q_1=2$	η_1	0,44	0,53	0,64
	W	1,42	1,06	0,75
$Q_1=5$	η_1	0,74	0,77	0,81
	W	2,2	1,5	0,9
$Q_1=20$	η_1	0,92	0,94	0,96
	W	2,7	1,85	0,94

Параметрические формирователи колебательных разрядов. Колебательный режим разрядов ($Q_1 > 0,5$) является основным режимом большинства систем ОЭД ТМ. В работах [8,9,31] с использованием кусочно-припасовочного метода проведен анализ трех схем преобразователей (рис.7): 1 - без шунтирующих цепочек, 2 и 3 - с шунтирующими цепочками R3-VS3 и I3-VS3. При анализе было принято: ключевые элементы - идеальные, сопротивление нагрузки - R_H скачкообразно изменяется от цикла к циклу при изменении напряжения заряда U_1 . Были получены обобщенные выражения для выходных и входных характеристик:

$$U_1 = (1+ke_1)U_d, \quad I_1 = 4U_d k(1+e_1)Q_1^2 / \rho_1 \omega_1 (4Q_1^2 + 1),$$

где T - период рабочей частоты преобразователя; k - коэффициент кратности входного тока, зависящий от типа схемы.

Выражения для определения величин k и КПД η_1 для каждой из схем приведены в таблице 3, где $e_{2,3} = \exp(-\pi/\sqrt{4Q_{2,3}^2 - 1})$. Сравнение выходных характеристик $U_1(Q_2)$ и КПД $\eta_1(Q_2)$ (рис.7 б,в) показывает основные различия схем. С увеличением Q_2 в схеме 1 напряжение U_1 растет, η_1 - уменьшается, а в

Таблица 3

Схема	k и η_1
1	$k = \frac{1 + e_2}{1 - e_1 e_2}$
	$\eta_1 = 1 - ke_1/2$
2	$k = 1$
	$\eta_1 = \frac{1}{2}(1+e_1)(1-e_2^2)$
3	$k = (1-e_2 e_3)/(1+e_1 e_2 e_3)$
	$\eta_1 = \left[1 - \frac{k}{2}(1-e_1)\right] e_3^2$

схеме 3 - наоборот. В схеме 2 значения U и η , не зависят от Q_2 (при $Q_2 > 0,5$). Поэтому применение схемы 1 целесообразно, если с увеличением U_1 значение R_H растет, а схемы 2 - если такой зависимости нет.

В системах ОЗЭД, в которых увеличение U_1 вызывает уменьшение R_H целесообразно использовать схему 3, в которой имеется устойчивый режим, соответствующий значению $U_1 = \tilde{U}_1$, к которому будет стремиться U_1 при изменении R_H . Кроме этого, схема 3 наиболее защищена от режимов короткого замыкания в нагрузке, при котором $I_{1кз} \rightarrow 0$ (на практике $I_{1кз} < 0,03 I_{1ном}$). Статистический анализ параметров схем 1, 2 и 3 [9] показал, что для схемы 3 коэффициент неустойчивости (определяемый как отношение дисперсии тока $I_{2м}$ к его среднему по выборке значений) не превышал 6,2% и его величина регулируется выбором величины U_1 .

Основным алгоритмом схемы 3 является VS1-VS2-VS3-VS1, причем в качестве ключа VS3 может использоваться силовой диод, что упрощает систему управления. В этом случае для исключения "опрокидывания" схемы величина L_3 выбирается из условия [2]

$$L_3 \geq (2\Delta t / \kappa + \sqrt{C/L_2})^2,$$

где Δt - время выключения VS2. Отметим, что включая VS1 раньше, чем исчезнет ток в L , в схеме 3 можно регулировать коэффициент обратной связи (КОС), определяемый как $k = \tilde{U}_0 / \tilde{U}_1$ (где \tilde{U}_0 и \tilde{U}_1 - квазиустановившиеся значения U_0 и U_1). Достоинства схемы 3 - простота, малое количество ключей, небольшое напряжение U_0 , высокий КПД, параметрическая амплитудно-импульсная стабилизация режимов разрядов, недостаток - критичность к режимам $Q_2 < 0,5$.

Преобразователи с регулируемой длительностью разрядных импульсов и обратной связью. При добротности $Q_2 < 0,5$ неустойчивость $R_H(t)$ и τ особенно увеличивается к окончанию разряда, что ухудшает дисперсный состав порошка и стабильность параметров системы. В таком случае эффективно введение прямых перезарядных цепочек [1,10,12,1] I3-VS3, как показано на рис.8, что позволяет регулировать КОС и стабилизировать длительность разрядов. Учитывая, что к окончанию разряда выделяемая в нагрузке мощность $P(t)$ (рис.2) и количество искрений (рис.3) резко падают, то включение цепочек в моменты времени $t \rightarrow \tau$ практически не уменьшает импульсную мощность и производительность систем, но повышает дисперсность порошка. Цепочки подключали в моменты времени $t_3 > 1,5t_m$ (где $t = t_m$ - когда $i_2(t_m) = \max$), (см. рис.8 б), при этом потребляемая в нагрузке мощность уменьшалась менее, чем на 10%, а производительность диспергирования - менее, чем на 5%.

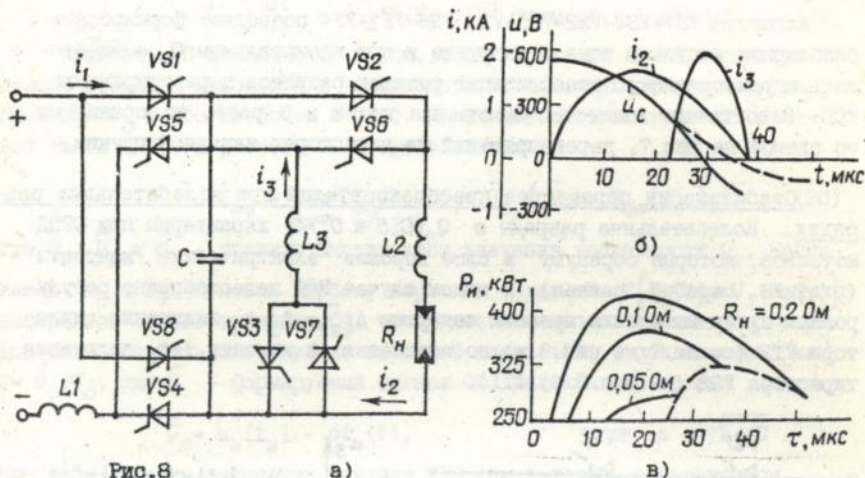


Рис.8

а)

б)

в)

В работе [12] показан пример решения оптимизационной задачи

$$P_u [\tau, R_n, t_3, L_2, L_3] = c (\tilde{U}_1^2 - \tilde{U}_0^2) / 2\tau \rightarrow \max \quad (26)$$

при $U_1 = 600$ В, $C = 100$ мкФ, $0,05 \text{ Ом} \leq R_n \leq 0,5 \text{ Ом}$, $L_2 \gg 2\text{мкГн}$ и $L_3 \gg 0,2\text{мкГн}$, считая, что в данном пространстве параметров функционал имеет один максимум. Дифференциальные уравнения, описывающие изменения токов и падения напряжений на элементах схемы, и условие (26) решались численными методами. Исследовались зависимости P_u от одного из факторов при неизменности остальных. На рис.8 в) для случая $Q_2 > 0,5$, для которого достоинства схемы неочевидны, приведено семейство кривых $P_u(R_n)$, пересечение которых со штриховой кривой показывает значения максимальных импульсных мощностей, которые потреблялись бы в R_n , если бы цепочка не подключалась. При $Q_2 < 0,5$ достоинства подключения прямой L -цепочки еще эффективнее.

Если в нагрузке необходимы униполярные импульсы, то ключи VS4, VS5 и VS8 можно из схемы исключить, и основным алгоритмом будет VS1-VS2-VS3-VS1, который обеспечивает регулировку КОС, используя зависимость $k(t_3)$. При $Q_2 > 0,5$ эффективней алгоритм VS1-VS2-VS3-VS7-VS1, а при изменении Q_2 в широких пределах - алгоритм VS1-VS3-VS6-VS1, который защищает схему от режимов $R_n \rightarrow \infty$ и $R_n \rightarrow 0$, но требует использования в качестве L_3 высокооборотных дросселей ($Q_3 > 20$). Регулировка КОС в таком случае осуществляется включением при $t = t_3$ ключа VS1.

Алгоритм VS1+VS4-VS2-VS5-VS3-VS6-VS1+VS4 позволяет формировать биполярные импульсы тока в нагрузке и при произвольном Q_2 осуществлять параметрическую стабилизацию режимов разрядов и регулирование КОС. Недостатком является увеличение почти в 3 раза, по сравнению со схемой на рис.7, перенапряжений на тиристорах зарядной группы.

Стабилизация параметров преобразователей при колебательных разрядах. Колебательные разряды с $Q_2 > 0,5$ и $U_0 > 0$ характерны при ОЭЭД металлов, которые образуют в слое хорошие электрические контакты (платина, серебро, свинец). В таком случае КОС целесообразно регулировать путем изменения времени задержки $\Delta t_{32} = t_3 - t_2$ включения тиристора VS3 (см. сх. I на рис.9 а) по отношению к моменту $t = t_2$ включения тиристора VS2 (см. рис.9 б) [11].

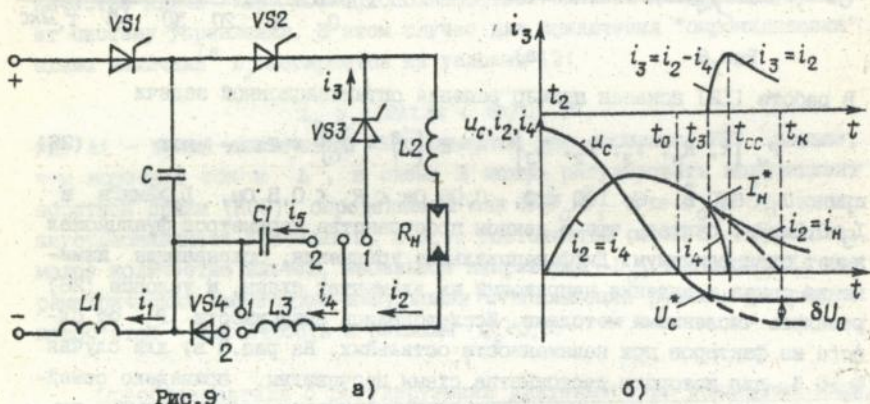


Рис.9

а)

б)

Для определения токов и напряжений в разрядном контуре использовался кусочно-припасовочный метод. Если VS3 не включать, то напряжение на конденсаторе C при его разряде

$$u_c(t) = U_1 e^{-\delta t} (\cos \omega_2 t + \lambda \sin \omega_2 t), \quad (27)$$

где $\delta = \frac{R_n}{2L}$, $\omega = \frac{R_n}{2L} e_2$, $Q_2 = \frac{1}{R} \sqrt{L/C}$, $\lambda = \delta/\omega_2$, $L = L_2 + L_3$.

При изменении $u_c(t)$ от U_1 до U_0 в нагрузке возникает ток

$$i_n(t) = \frac{U_1}{\omega_2 L} e^{-\delta t} \sin \omega_2 t, \quad (28)$$

причем $t_n = t_1 = t_2$ (рис.9 б), а напряжения на индуктивностях L_1 и L_2 -

$$u_{L,2}(t) = L_{1,2} \frac{di}{dt} = \frac{L_{1,2}}{L} U_1 e^{-\delta t} (\cos \omega_2 t + \lambda \sin \omega_2 t). \quad (29)$$

Сущность ОС заключается в том, что напряжение на C перед следующим разрядом находится в зависимости от величины остаточного напряжения U_0 в соответствии с (23). Коэффициент отрицательной обратной связи (КОС) в работе [II] определен как

$$K_{oc} = \lim_{t \rightarrow \infty} U_0 / \lim_{t \rightarrow \infty} U_1 = \tilde{U}_0 / \tilde{U}_1 = K_{oc}(Q_1, \tilde{Q}_2), \quad (30)$$

где \tilde{Q}_2 , \tilde{U}_0 и \tilde{U}_1 - квазиустановившиеся значения добротности Q_2 , напряжений U_0 и U_1 . Изменяя глубину обратной связи $\Gamma = \Gamma(R_2(t), U_1, (E, Q_1))$ выбиралось такое значение \tilde{Q}_2 , чтобы неустойчивость параметров разрядов была минимальной. Глубина обратной связи (ОО) определялась как $\Gamma = \tilde{U}_0 / U_0$, где \tilde{U} - формируемый сигнал ОС, величина которого

$$\tilde{U}_0 = u_c(t_3) - \rho i_2(t), \quad \text{где } \rho = \sqrt{L_3/C}.$$

При этом условие отпирания вентиля VS3 определялось неравенством

$$t_3 > t_2 + \frac{1}{\omega} \left[\pi - \arcsin \operatorname{tg} \frac{1}{\lambda} \frac{L-L_d}{L+L_d} \right],$$

полученным с учетом (27) и (29) из неравенства $u_{VS3}(t) > 0$, где

$$u_{VS3}(t) = u_c(t) - u_{L_1}(t) = u_0 e^{-\delta t} \left[\left(1 - \frac{L_d}{L}\right) \cos \omega t + \left(1 + \frac{L_d}{L}\right) \lambda \sin \omega t \right].$$

Нижняя граница α для области возможных значений $\Gamma(\alpha; 1)$ может быть определена по величине $\tau_{3min} = \min\{t_3 - t\}$, где $t = t_2 + \frac{1}{\omega} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \operatorname{tg} \lambda \right]$ - момент перехода напряжения $u_c(t)$ через нуль. Очевидно, что для расширения диапазона Γ необходимо уменьшать индуктивность L_3 конденсаторов и соединительных проводов.

Таким образом, изменением момента $t = t_3$ регулируются длительность разряда τ и параметры преобразователя $U_0, U_1, W = C(U_1^2 - U_0^2)/2$, то есть осуществляется широтно-импульсное регулирование параметров разрядных импульсов. Отметим, что при $t_3 > t_0$ величина i_{Hmax} не зависит от момента включения VS3, а затухание тока $i_H(t)$ зависит от величины R_H при $t = t_T$ и поскольку при $t \rightarrow t$ значения R_H быстро увеличиваются, то средняя величине τ обычно меньше расчетной. Возможное затягивание тока при $t \rightarrow t$ не вызывает сквозной ток через зарядные и разрядные тиристоры, так как ток $i_4(t)$ обеспечивает запертие тиристора VS2 в момент

$$t_{oc} = t_3 + \frac{1}{\omega} \arcsin \operatorname{tg} \left| \frac{\rho I_3}{\tilde{U}_3} \right|.$$

Таким образом, заряд емкости можно начинать через промежуток времени $\Delta t = t_n + \tilde{t}$, где t_n - время восстановления тиристора VS3 (см. рис.9). Следующий разряд можно осуществлять, не дожидаясь исчезновения тока в нагрузке, что уменьшает критичность преобразователей к изменению $R_n(t)$ в конце разряда и путем стабилизации длительности разрядных импульсов позволяет повысить частоту следования разрядов в слое ТМ.

Формирование разрядных импульсов специальной формы. В работах [2,28] проведен анализ подключения предварительно заряженных дополнительных конденсаторов емкостью C , через время $\Delta t < \tau$ после начала разрядки основных конденсаторов емкостью C (обычно $C_1 < 0,1C$), формируя таким образом импульс тока в нагрузке и интенсифицируя выброс материала из искровых зон. Исследование преобразователя электроэнергии (см. сх.2 на рис.9), использующего дополнительный конденсатор $C1$ и формирующего в нагрузке М-образные импульсы тока, проведено в работе [28]. Получены выражения для определения моментов времени максимумов и минимумов тока в нагрузке в зависимости от параметров разрядного контура и проведен анализ кривой тока $i_n(t)$.

Такие преобразователи интенсифицируют процесс ОЗЭД как при поджиге искровых разрядов, так и при их исчезновении, и эффективны при повышенных требованиях к дисперсности получаемых порошков.

В некоторых случаях (например, при ОЗЭД шламовых и мелкостружечных металлоотходов, содержащих диэлектрические включения) возникает трудность возбуждения искрений в слое. В работах [2,41] приведена схема, позволяющая создавать в нагрузке высоковольтные импульсы без применения специальных блоков "поджига". Такое решение одновременно с введением между электродами продольного постоянного и поперечного импульсного магнитных полей позволило реализовать новый способ отделения и очистки металла из отходов шлифовального производства.

5. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ОЗЭД

Структурное построение систем ОЗЭД. В соответствии с предложенной концепцией электропитания ТАД, повышения их производительности и стабилизации режимов разрядов, основанной на описанных в разделе I закономерностях их формирования, в основу структурной схемы положено разделение задач реализации параметров разрядных импульсов (необходимых для многоканального искрового процесса), повышения производительности диспергирования а также обеспечения стабильности режимов разрядов и

простого управления их параметрами. В системах используется частотно-импульсное регулирование производительности диспергирования, тепловых и технологических режимов. Причем при $f < f_0$ (где величина f_0 определяется конструкцией ТАД) $R_H \neq R_H(t)$ и производительность $m \sim kf$ (где k - коэффициент пропорциональности). При $f > f_0$ зависимость $m(f)$ более сложная, поскольку с увеличением $f > f_0$ растет среднее значение R_H . Но при $Q_2 > 0,5$ это обстоятельство используется для повышения КПД и производительности систем ОЗЭД. Дозирование энергии импульсов и исключение влияния режимов нагрузки на питающую сеть осуществлялись использованием промежуточного звена формирования постоянного напряжения и накопительных конденсаторов с разобненными зарядным и разрядным контурами и регулирующими цепочками. Коммутация токов осуществлялась быстродействующими тиристорами типа ТБ333-320 и ТБ353-1000. Индуктивность разрядного контура обычно не превышала 1,5 мкГн, активное сопротивление - 0,01 Ом. В системах формировались импульсы напряжением до 1 кВ, длительностью до 100 мкс, энергией до 100 Дж, разрядным током до 8 кА со скоростью нарастания до 500 А/мкс, импульсной мощностью до 1 МВт, частотой $f \leq 10^3$ Гц.

Обобщенная структурная схема систем ОЗЭД представлена на рис.10,

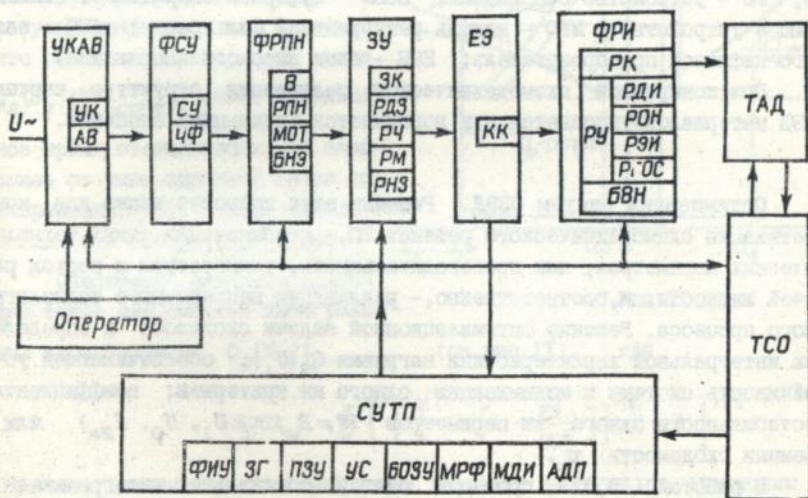


Рис.10

отражающем функциональные связи тиристорного преобразователя (ТП)

электроэнергии с его системой управления (СУТП), технологическим аппаратом диспергирования (ТАД), технологической системой обеспечения (ТСО) и оператором. На рис.10 приняты обозначения: УКAB - устройство контроля и автоматического отключения; ФСУ - фальтросимметрирующее устройство, в котором может использоваться ЛНУ; ФРПН - формирователь регулируемого постоянного напряжения; ЗУ - зарядное устройство; ЕНЭ - емкостной накопитель энергии; ФРИ - формирователь разрядных импульсов; УК - устройство контроля; АВ - автоматический выключатель; СУ - симметрирующее устройство; ЧФ - частотные фильтры; В - выпрямитель; РПН - регулятор постоянного напряжения; МОТ - модуль ограничения тока первого включения; БНЭ - буферный накопитель энергии; ЗК - зарядный коммутатор; РДЗ - регулятор длительности зарядки ЕНЭ; РЧ - регулятор частоты; РМ - регулятор мощности; РНЗ - регулятор напряжения зарядки ЕНЭ; КК - коммутатор конденсаторов; РК - разрядный коммутатор; РУ - регулирующие устройства; РДИ - регулятор длительности импульсов разрядного тока; РОН - регулятор остаточного напряжения на ЕНЭ; РЭИ - регулятор энергии импульсов в нагрузку; РГОС - регулятор глубины обратной связи; ФМУ - формирователь импульсов управления ТП; ЗГ - задающий генератор; ПЗУ - постоянно запоминающее устройство; УО - устройство сопряжения; БОЗУ - буферное оперативное запоминающее устройство; МРФ - модуль рекуррентной фильтрации; АЦЦ - аналого-цифровой преобразователь; БВН - блок высокого напряжения.

При конкретной схемотехнической реализации структура систем ОЭЭД материалов упрощается или дополняется отдельными звеньями.

Оптимизация систем ОЭЭД. Решение этих вопросов важно для конкретизации схемотехнического решения ТП, стабилизации таких технологических параметров, как производительность, температура и расход рабочей жидкости, и, соответственно, - реализации непрерывного технологического процесса. Решение оптимизационной задачи сводилось к определению интегральной характеристики нагрузки $Q_2(U_1)$, обеспечивающей устойчивость системы и минимизацию одного из критериев: коэффициента неустойчивости одного из параметров ($W, P_u, \tau, U_1, U_0, I_{2m}$) или времени сходимости τ_0 .

В работах [19,32] проведен синтез оптимальных интегральных характеристик электровозгонных нагрузок и определение КПД для схем преобразователей, приведенных на рис.7-9. Моделирование преобразователей осуществлялось с помощью системы алгебраических и дифференциальных уравнений, представленных в форме Коши и описывающих ди-

намику электромагнитных процессов в контурах преобразователя для всех интервалов постоянства его структуры, а также условий перехода от одного интервала к другому. С помощью полученной модели был разработан алгоритм синтеза интегральной характеристики нагрузки, удовлетворяющей требованиям стабилизации одного из основных параметров преобразователя ($U_1, U_0, I_{2m}, W, \tau$). Исходной информацией являлись значения параметров разрядного контура и регулирующей цепи, а также пороговые условия коммутации тиристоров. В соответствии с алгоритмом разработана программа синтеза характеристик $Q_2(U_1)$ при произвольных параметрах элементов преобразователя. Расчет динамики разряда осуществлен модифицированным методом Рунге-Кутты 2-го порядка.

На рис. II представлены графики зависимости $Q_2(U_1) | \tilde{U}_0 = \text{const}$, синтезированные по критерию $\tilde{U}_0 = \text{const}$ для схемы I на рис. 9.

Изменение вида этой зависимости осуществляется варьированием параметров разрядного контура и регулирующей цепочки. Отметим, что система с нагрузкой типа $Q_2(U_1) | \tilde{U}_0 = \text{const}$ имеет минимальное время стабилизации, не зависящее от типа обратной связи по напряжению, что бывает определяющим при выборе типа схемы.

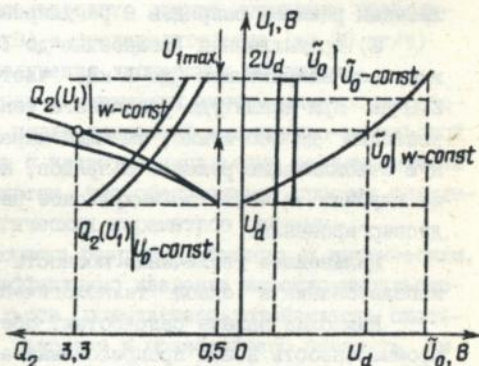


Рис. II

Описанный алгоритм пригоден также для синтеза интегральных характеристик $Q_2(U_1) | W = \text{const}$, (см. рис. II), где

$$Q_2(U_1) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{1}{\pi} \ln \left(1 - \frac{2W}{CU_1^2} \right) \right]^{-2} + 1 \right\}^{1/2}$$

Отметим, что чем меньше выбранная величина энергии по сравнению с максимальной для заданного диапазона выходных напряжений, тем меньше КПД преобразователя и отношение частоты разрядных импульсов к частоте зарядов, то есть тем чаще пропуски зарядных циклов и хуже неустойчивость энергопотребления на входе преобразователя.

6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В соответствии с необходимостью решения различных электроэнергетических, физико-химических и технологических задач на разных этапах создания новых наукоемких технологий электроискрового диспергирования токопроводящих материалов системы, созданные в Институте электродинамики АН Украины, имеют три варианта исполнения:

1) лабораторный (мощностью до 5 кВт), с широким диапазоном изменения параметров единичных разрядных импульсов: длительностью до 200 мкс, напряжением до 1 кВ, энергией до 500 Дж, мощностью до 2 МВт, током до 10 кА при скорости нарастания до 500 А/мкс;

2) экспериментальный (до 20 кВт), с параметрами единичных импульсов, аналогичных экспериментальному (но изменяемыми в более узком диапазоне), обеспечивающий изменение частоты разрядов в нагрузке от 10 Гц до 10^4 Гц, а также возможность выбора способа стабилизации режимов разрядов и регулировки коэффициента обратной связи;

3) промышленный (мощностью до 100 кВт), формирующий разрядные импульсы напряжением до 1 кВ, частотой до 10 кГц, энергией до 200 Дж при амплитуде разрядного тока до 10 кА и скорости его нарастания до 500 А/мкс, имеющий параметрическую амплитудно-импульсную стабилизацию режимов разрядов, широтно-импульсное регулирование ее глубины и частотно-импульсное регулирование производительности диспергирования.

Дальнейшее увеличение мощности систем осуществлялось за счет использования в одной технологической линии нескольких систем ОЗД.

Наиболее важные разработки, обеспечившие создание и внедрение в промышленность новых прогрессивных электроимпульсных технологий, представлены в разделе "Реализация результатов работы" диссертации.

Среди указанных разработок наибольшее значение для народного хозяйства в настоящее время имеют работы по созданию электрооборудования для безаффинажной технологии переработки платинового лома с дисперсным упрочнением перерабатываемого материала, что позволяет в несколько раз увеличить ресурс создаваемого из такого материала оборудования. Разработки весьма актуальны для развитой на Украине стекло- и базальт-волоконной промышленности, имеющей до 10 т платинового лома в год. Важное значение имеют также работы по созданию жаропрочных композиционных материалов, мелкокристаллических и аморфных магнитных материалов, носителей и составляющих компонентов химических катализаторов, лако-красочных пигментов и комплексной очистки водных стоков.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение в развитии теории импульсных электротехнологических систем, обеспечивающие основу для создания перспективных технологий получения дисперсных порошков. При этом получены следующие результаты:

1. Исследованы параметры и особенности технологического аппарата объемного электроэрозионного диспергирования материалов как электрической нагрузки и объекта управления. На этой основе сформулированы требования, которым должны удовлетворять преобразователи параметров электроэнергии применительно к системам электроимпульсного получения дисперсных материалов.

2. Предложена новая концепция повышения производительности и стабильности режимов систем искрового диспергирования металлов, учитывающая выявленные закономерности формирования в слое токопроводящих гранул многоканальных искровых разрядов, изменения их электрических и временных параметров. Использование данной концепции позволило создать низковольтные (до 1 кВ) и производительные (до 20 кг/ч) электроимпульсные системы для получения дисперсных порошков.

3. Разработаны научные основы и структуры систем электроискрового диспергирования материалов с параметрической амплитудно-импульсной стабилизацией режимов разрядов и с частотно-импульсным регулированием мощности и производительности систем, что обеспечивает простое регулирование основных электротехнологических параметров системы.

4. Установлено, что при режимах разрядов, близких к критическим, для стабилизации их параметров эффективно введение широтно-импульсного регулирования разрядных импульсов, повышающего устойчивость системы к режимам случайных холостых разрядов и позволяющего изменять импульсную мощность разрядов и дисперсность получаемого порошка. Показано, что с уменьшением добротности разрядного контура эффективность такой регулировки возрастает.

5. Разработаны элементы теории многофазных линейных необратимых устройств при питании импульсных нагрузок. Доказано, что неустойчивость компенсирующих элементов таких устройств не влияет на КПД, а их стабилизирующие свойства определяются диапазонами изменения компенсирующих элементов и нагрузки. Установлено, что при включении в цепи линейных необратимых устройств накопительных конденсаторов в нагрузку возможно получение большой импульсной мощности при высоком КПД устройства, если в нем используется неполный заряд (разряд) конденсаторов.

6. На основе анализа совместной работы линейных необратимых устройств, полупроводниковых элементов и накопительных конденсаторов определены области предпочтительного использования таких устройств: мощности - единицы киловатт, частота зарядно-разрядных циклов - меньше частоты питающей сети.

7. Получены обобщенные выражения и исследованы характеристики полупроводниковых преобразователей, использующих накопительные конденсаторы с изменяемыми начальными и конечными условиями их заряда (разряда), что позволило упростить регулирование коэффициента обратной связи по напряжению и увеличить КПД преобразователей.

8. Определены области устойчивости систем объемного электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов по разным критериям: отсутствие "сквозных" токов и холостых разрядов, пропуск зарядных циклов, отсутствие крупных частиц в порошке. Разработана методика определения характеристик эрозионной нагрузки, обеспечивающая повышение стабильности основных электротехнологических параметров систем: максимального тока в нагрузке, длительности разрядных импульсов, напряжения заряда конденсаторов, импульсной мощности, производительности диспергирования, температуры и скорости потока рабочей жидкости при установленном времени сходимости процесса стабилизации.

9. Исследованы характеристики преобразователей с управляемым зарядом и разрядом накопительных конденсаторов. Разработан алгоритм определения параметров регулирующих цепей преобразователей электроэнергии по характеристикам технологического аппарата диспергирования, позволяющий реализовать максимальную производительность системы искрового диспергирования при установленных удельных энергозатратах и коэффициенте нестабильности выбранного параметра.

10. Созданы математические модели и программы расчета основных режимов разрабатываемых систем, увеличения производительности диспергирования и влияния характеристик материала на электротехнологические характеристики системы. Обоснованы методы интенсификации искрений в слое за счет введения гранул с другой шероховатостью поверхности, возбуждения искрений в ином направлении, а также способы защиты электродов от износа и повышения стабильности режимных параметров за счет организации в слое зон с различной подвижностью гранул.

11. Научное обобщение комплексных задач, изложенных в настоящей работе, позволило разработать эффективные электроимпульсные системы, обеспечившие реализацию новых технологий получения дисперсных быстрозакаленных порошков с уникальными свойствами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Щерба А.А. Основные принципы построения многофазных стабилизированных источников питания установок электроэрозионного диспергирования металлов в жидкости// Проблемы преобразовательной техники. - Киев, 1983. - Ч.6. - С.59-62.
2. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология химических соединений и порошков металлов. - Фрунзе: Илим, 1990.-255 с.
3. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизация параметров полупроводниковых электроимпульсных систем искрового диспергирования слоя токопроводящих материалов// Стабилизация параметров электрической энергии.- Киев, 1991. - С.12-29.
4. Milyakh A.N., Barabanov V.A., Shcherba A.A., Muratov V.A. Effective Devices for Power Supply and Stabilization of Electrodischarge Metal Dispersion Units// 5-th Power Electronics Conference. - V.3. - Budapest, 1985. - P.273-282.
5. Щерба А.А., Муратов В.А. Электрофизические особенности искровых разрядов в слое токопроводящих гранул// Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной и силовой техники.-М: Информэлектро,1986. - С.32-33.
6. Шидловский А.К., Щерба А.А. Повышение эффективности электропитания технологических линий электроэрозионного диспергирования металлов// Соверш.электрооборуд. и средств автоматиз.технол.процессов промышл.предприятий.- Комсомольск-на-Амуре,1986. - С.102-104.
7. Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул// Стабилизация параметров электрической энергии. - Киев, 1991. - С.65-74.
8. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А. Полупроводниковые преобразователи для установок электроимпульсной обработки металлов// Техн.электродинамика. - 1987. - № 5. - С.30-37.
9. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А. Формирование выходных характеристик преобразователей с учетом свойств объемной электроэрозионной нагрузки// Техн.электродинамика.-1988.-№1.- С.28-34.
10. Щерба А.А. Параметрические тиристорные преобразователи для электропитания импульсных технологических установок// Проблемы преобразовательной техники. - Киев, 1987. - Ч.2. С.263-265.
11. Щерба А.А.,Павелко А.Н. Стабилизация параметров электромагнитной энергии полупроводниковых формирователей импульсного тока// Теория матем.модели эл.цепей и интегр.схем.- Киев,1983.- С.95-104.

12. Щерба А.А., Муратов В.А., Павелко А.Н. Тиристорные параметрические преобразователи с регулируемой длительностью разрядных импульсов// Преобразование и стабилизация параметров электроэнергии. - Киев: Наук.думка, 1990. - С.133-138.
13. Щерба А.А., Муратов В.А., Карвовский Б.В. Влияние характеристик источника питания и технологического аппарата на производительность искрового диспергирования металлов в слое гранул// Состояние и перспективы развития электротехнологии (II Бенардосовские чтения).- Т.II. - Иваново, 1985. - С.104-105.
14. Щерба А.А., Павелко А.Н., Мишин А.М. Анализ тиристорного преобразователя для электропитания установок искровой обработки ферромагнитных частиц// Измерительные и преобразовательные устройства для электроэнергетики.- Киев: Наук.думка, 1989. - С.114-119.
15. Миях А.Н., Щерба А.А., Щенко Б.А., Казекин В.И. Анализ стабилизации режимов высокочастотного генератора импульсов с помощью математ. моделирования// Пробл. преобраз. техн.-Киев, 1983.- С.190-193.
16. Щерба А.А., Муратов В.А., Цой А.Д. Формирование сильноточных импульсов преобразователями на основе последовательного резонансного инвертора// Регулируемые асинхронные электродвигатели. - Киев: Наук.думка, 1988. - С.119-124.
17. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А. Моделирование аппарата объемного электроэрозионного диспергирования металлов, как элемента электрической цепи// Преобразование и стабилизация параметров электроэнергии. - Киев: Наук.думка, 1990. - С.128-133.
18. Шидловский А.К., Щерба А.А., Павелко А.Н. Идентификация установки электроэрозионного диспергирования, как элемента разрядного контура генератора импульсов тока// Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий. - Комсомольск-на-Амуре, 1989. - С. 156-158.
19. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Павелко А.Н. Синтез интегральных характеристик эрозионных нагрузок параметрических формирователей искровых разрядов// Стабилизация параметров электрической энергии. - Киев, 1991. - С.3-11.
20. Щерба А.А., Заруба Н.И., Павелко Т.В. Анализ электротепловых режимов в слое металлических гранул при протекании в нем электроэрозионных разрядных импульсов// Стабилизация параметров электрической энергии. - Киев, 1991. С.42-51.
21. Щерба А.А., Щенко Б.А., Эркенов Н.Х., Подольцев А.Д. Моделирование электромагнитных и тепловых переходных процессов при искро-

- вом диспергировании контактирующих токопроводящих гранул// Стабилизация параметров электрической энергии.-Киев,1991.-С.52-64.
22. Шидловский А.К., Щерба А.А. Свойства преобразователей электрической энергии, использующих линейные необратимые устройства// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1988. - № 5. С.138-144.
23. Щерба А.А. Питание переменной нагрузки через фильтр симметричных составляющих, выполненный на основе трехфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем// Проблемы технической электродинамики.- Киев, 1979. - С.3-5.
24. Щерба А.А. Анализ устройства с необратимыми свойствами для питания переменных нагрузок//Техн.электродинамика.-1982.-№3.-С.44-48.
25. Милых А.Н., Барсбанов В.А., Щерба А.А. Исследование характеристик источников питания со стабилизацией потребляемой мощности// Процессы в устройствах преобразования параметров электрической энергии. - Киев: Наук.думка,1983. - С.24-28.
26. Щерба А.А. О работе трехфазного фильтра симметричных составляющих без компенсирующих активных сопротивлений// Проблемы преобразовательной техники. - Киев, 1979. - С.5-8.
27. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Заруба Н.И. Анализ электромагнитных процессов в полупроводниковых параметрических преобразователях с емкостными накопителями// Проблемы преобразовательной техники. - Ч.3. - Киев, 1987.- С.255-257.
28. Щерба А.А., Муратов А.А. Анализ процессов в формирователе импульсов для электроэрозионного диспергирования металлов// Техн. электродинамика.- 1986.- № 2. - С.51-54.
29. Щерба А.А. Стабилизация параметров электроимпульсных установок диспергирования токопроводящих материалов// Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологич. процессов промыш.предприятий.- Комсомольск-на Амуре,1989.-С.154-155.
30. Щерба А.А. Принципы стабилизации режимов полупроводниковых систем электроискрового диспергирования токопроводящих материалов// Проблемы преобразовательной техники.-Ч.2.- Киев,1991.-С.134-137.
31. Щерба А.А., Муратов В.А. Сравнительный анализ характеристик и свойств тиристорных преобразователей для питания установок электроэрозионного диспергирования металлов// Вестн. Киевск. политехн. ин-та.- Сер.Радиоволновая.- Киев,1988. - Вып.26. - С.43-48.
32. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Павелко А.Н. Оптимизация параметров тиристорных электроимпульсных систем диспергирования токопроводящих материалов// Проблемы преобразовательной техники. Ч.2.- Киев, 1991.- С.127-130.

33. Казекин В.М., Карвовский В.В., Щерба А.А. Установка для электроэрозионного диспергирования алюминия в воде// Опыт, внедрение и промышленная эксплуатация теплообменных аппаратов и реакторов. - Днепропетровск, 1980. - С.129-131.
34. Щидловский А.К., Муратов В.А., Щерба А.А. Электроэрозионные технологические установки получения порошков металлов// Электрофизические технологии в порошковой металлургии. - Рига, 1986. - С.106-108.
35. Щерба А.А. Установка электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов// Техн.электродинамика. - 1990. - № 3. - С.88.
36. Щерба А.А. Электроэрозионная установка переработки токопроводящих промышленных отходов// Техн.электродинамика. - 1989. - №6. - С.45.
37. Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул// Электрофизический разряд в жидкости и его применение в промышленности. - Николаев, 1992. - С.26-27.
38. Авторские свидетельства СССР на изобретения, относящиеся к интенсификации искровой обработки в слое гранул и защите электродов от износа: 1050843, 1077743, 1217581, 1238324, 1260167, 1374573.
39. Авторские свидетельства СССР на изобретения, относящиеся к созданию систем с линейными необратимыми устройствами: 680107, 707472, 719450, 752618, 807456, 817859.
40. Авторские свидетельства СССР на изобретения. Полупроводниковые преобразователи электроэнергии и устройства управления для систем искровой диспергирования материалов: 1134994, 1197066, 1231582, 1243584, 1251300, 1274124, 1360533, 1697212, 1697218, 1709473.
41. А.с. 1367242 СССР. МКИ В 22 F 9/14. Способ отделения и очистки металла из отходов шлифовального производства/ А.Д.Пой, В.Я.Петренко, А.А.Щерба и др.
42. А.с. 1499952 СССР. МКИ В 22 F 9/14. Способ получения дисперсноупроченных материалов на основе платины/ Д.С.Тыкочинский, В.А.Ясребов, А.А.Щерба и др.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежит: в монографии [2] - главы 1-3, в [6, 11-16, 23, 29, 30, 33,] - анализ процессов формирования разрядных импульсов и методы стабилизации их режимов, в [5, 7, 17-21, 34, 37] - закономерности влияния динамики разрядов на энергетику, в [4, 8-10, 27, 28, 31, 32] - оптимизация схем полупроводниковых преобразователей, в [22-26] - исследование работы линейных необратимых устройств на импульсную нагрузку, в изобретениях [38-42] - вклад автора определяется справками о творческом участии.

Сопискатель

А. А. Щерба

А.А.Щерба

Подписано к печати 19.02.1993г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист.2,0.Уч.-изд.лист 2,0.
Тираж 120. Заказ 202. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

AB 26.819

AB 26.819