

На правах рукописи

БОБКОВ Александр Владимирович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ “ТРАНСФОРМАТОР –
УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ” ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА ГАЛЛИЯ

Специальность 05.09.03

Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2002

Работа выполнена на кафедре “Электротехника и электротехнологические системы” Уральского государственного технического университета.

Научные руководители:	доктор технических наук, профессор Сарапулов Ф.Н. кандидат технических наук, профессор Копырин В.С.
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Шипицын В.В. кандидат технических наук, доцент Шилин С.И.
Ведущая организация:	АО “Уралэнергоцветмет”, г.Екатеринбург

Защита состоится 24 июня в 12 часов в аудитории Э-516 на заседании диссертационного совета Д.212.285.03 при Уральском государственном техническом университете по адресу: 620002, г.Екатеринбург, К-2, ул.Мира,19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного технического университета.

Автореферат разослан 17 мая 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

А.В.Паздерин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Используемые в качестве источников питания для электролизеров электротехнические системы (ЭТС), содержащие силовые трансформаторы (Т) и управляемые выпрямители (УВ), имеют различные силовые схемы, конструкцию, выходные параметры, способы регулирования и являются наиболее крупными потребителями энергии. Поэтому современной тенденцией развития ЭТС для электролиза является повышение их энергетической эффективности. Наряду с этим к ЭТС предъявляются постоянно возрастающие требования к надежности, технологичности конструкции, массогабаритным показателям, уровню автоматизации, а также снижению эксплуатационных затрат на обслуживание и ремонт. Это в полной мере относится к ЭТС для электролиза галлия, который является одним из наиболее перспективных способов его получения из растворов глиноземного производства.

Решение проблемы повышения эффективности производства галлия способом электролиза является актуальным не только из-за высокого показателя удельного электропотребления, но и из-за стабильного и постоянно возрастающего на него спроса. Потребность в производстве галлия и его соединений обуславливается увеличением объемов и расширением области его применения в основном в отраслях “высоких технологий”: производстве полупроводниковых приборов и элементов памяти, лазеров, специальных сплавов, оптике и медицине.

Параллельно с многолетним производством галлия способом электролиза проводились исследования, в основном Институтом химии твердого тела (ИХХТ) УрО РАН, в области совершенствования технологического процесса и конструкции электролизера галлия (ЭГ). В качестве источника питания ЭГ использовались известные преобразовательные агрегаты (ПА). Учитывая их ограниченные возможности, многие технологические режимы оказались не исследованными. Практически не проводились работы по повышению эффективности ЭТС для ЭГ. А главное, не проводились комплексные исследования энергетических режимов системы “трансформатор -управляемый выпрямитель-электролизер галлия” (Т-УВ-ЭГ). Это обусловлено в первую очередь сложностью технологии электролиза галлия, отсутствием физической и математической модели системы Т-УВ-ЭГ, необходимостью больших финансовых и временных затрат на проведение исследований, а также отсутствием совместного подхода к решению этой проблемы со стороны специалистов электрохимиков и электротехников.

Все эти факторы сдерживали расширение производства галлия и не гарантировали его конкурентоспособности на мировом рынке. Такое состояние вопроса обусловило актуальность решения комплекса теоретических и практических задач по повышению эффективности системы Т-УВ-ЭГ.

Цель работы состоит в разработке методов расчета и исследовании стационарных и динамических электрических режимов системы Т-УВ-ЭГ и создании

энергетически эффективного промышленного агрегата на основе единого силового модуля Т-УВ.

Задачи исследования:

1 Разработка физической модели и методики исследования электрических режимов системы Т-УВ-ЭГ.

2 Экспериментальные исследования параметров и характеристик электролизера галлия в физической модели и промышленной цепи.

3 Разработка схем замещения и математических моделей экспериментального и промышленного электролизеров галлия для статических и динамических режимов.

4 Разработка эффективной системы Т-УВ для промышленной цепи электролизеров галлия.

5 Исследование энергетических характеристик системы Т-УВ-ЭГ.

6 Разработка энергоэффективного способа регулирования выпрямленного напряжения.

7 Обоснование энергосберегающего алгоритма управления током в электролизере галлия.

8 Промышленные испытания системы Т-УВ при питании цепи электролизеров.

Методы исследования. Поставленные в работе задачи решаются с применением аппарата математического анализа, основных положений теоретических основ электротехники, теории электрических машин, вентильных преобразователей и электрохимии. Используются методы численного решения систем дифференциальных и матричных уравнений, аналитической и кусочно-линейной аппроксимации нелинейных функций, логических и коммутационных функций. Экспериментальные исследования проводились с применением промышленной ЭВМ с платами расширения и разработанным программным обеспечением на языке С++, обработка экспериментальных данных и расчеты – на персональной ЭВМ с 32-битной платформой по разработанным цифровым моделям с использованием языка программирования С++ и пакетов Mathcad и MATLAB.

Научная новизна работы заключается в теоретических и экспериментальных исследованиях, сущность которых заключается в следующих решенных задачах:

1 Разработана методика экспериментального исследования статических и динамических режимов электролиза галлия на физической модели и промышленной цепи.

2 Разработаны электрические схемы замещения и математические модели экспериментального и промышленного электролизеров галлия для динамических и статических режимов электролиза.

3 Разработана математическая модель системы Т-УВ-ЭГ для статических и динамических режимов электролиза.

4 Разработано программное обеспечение и исследована система Т-УВ для электролиза галлия с улучшенными энергетическими показателями.

5 Предложен и обоснован энергосберегающий алгоритм управления системой Т-УВ-ЭГ.

Практическая ценность выполненной работы заключается в следующем:

1 Создана физическая модель системы Т-УВ-ЭГ и комплект компьютерных программ для проведения экспериментов.

2 Разработана конструкция совмещенного силового модуля Т-УВ с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями.

3 Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета статических и динамических режимов системы Т-УВ-ЭГ.

4 Разработана и внедрена система Т-УВ для промышленной цепи электролиза галлия.

5 Предложено схемное решение, конструкция силового блока и система управления, реализующие фазоступенчатое регулирование выпрямленного напряжения, которое обеспечивает повышение коэффициента мощности ПА.

Реализация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, разработки технических и конструкторских решений использованы ОАО “Российская электротехническая компания” при подготовке технической документации и изготовлении двух преобразовательных агрегатов типа ПТР-12500/36 УХЛ4 для промышленной цепи электролиза галлия. При участии автора выполнена наладка двух агрегатов типа ПТР-12500/36 УХЛ4, с реализацией предложенного энергосберегающего алгоритма управления системой Т-УВ-ЭГ и пуск их в эксплуатацию в ООО “Галлий”. Результаты теоретических и экспериментальных исследований также используются в ИХХТ УрО РАН, ООО “Галлий”, ОАО “Российская электротехническая компания” и УГТУ-УПИ в их научно-исследовательской, проектно-конструкторской, производственной и образовательной деятельности.

Апробация работы. Основные результаты доложены и обсуждены на:

- всероссийском электротехническом конгрессе с международным участием “На рубеже веков: итоги и перспективы”. ВЭЛК-99 (Москва, 1999);
- II межвузовской отраслевой научно-технической конференции “Автоматизация и прогрессивные технологии” (Новоуральск, 1999);
- межвузовской научной конференции “Электротехника. Электромеханика. Электротехнологии.” (Новосибирск, 2001);
- международной научно-технической конференции “Современные проблемы и достижения в области электротехнологий в XXI веке” (Санкт-Петербург, 2001);

- научно-технической конференции “Совершенствование энергетики цветной металлургии” (Екатеринбург, 2001);
- международном конгрессе “300 лет Уральской металлургии. Цветная металлургия – производство меди, никеля, титана и других цветных металлов” (Верхняя Пышма, 2001);
- научно-практическом семинаре “Проблемы и достижения в промышленной энергетике” (Екатеринбург, 2001);
- научно-практических семинарах “Энергосберегающая техника и технологии” (Екатеринбург, 1999, 2000, 2001).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 20 печатных работ, включая два патента и два свидетельства на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников, пяти приложений и содержит 139 страниц основного текста, 94 рисунка, список использованных источников из 150 наименований. Общий объем работы составляет 214 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определена ее цель, сформулированы задачи исследований и описаны основные результаты, полученные при их решении.

В первой главе описаны свойства галлия и способы его получения, проведен анализ электротехнических систем для электролиза и преобразовательных агрегатов для питания электролизеров галлия.

Основные запасы галлия в странах бывшего СССР (до 97%) сосредоточены в алюминиевых рудах. В настоящее время производство окиси алюминия (глинозема), используемого для получения металлического алюминия, достигло очень больших масштабов, поэтому представляется возможность попутного получения значительных количеств галлия, несмотря на малое содержание его в глиноземном сырье.

В Советском Союзе алюминатно – щелочные растворы, получаемые по способу Байера, впервые предложены в качестве сырьевого источника галлия Н.М. Сырокомским и в дальнейшем исследованы К. А. Большаковым, П. А. Резник, Р. В.Ивановой, Н. В. Деменевым, С. П. Яценко, Н. И. Петуниной, Г. М. Рубинштейном, В. Н. Диевым и другими. Основные исследования проводились в Институте металлургии и обогащения АН Каз. ССР, ИХХТ УрО РАН и в институте Гиредмет. Сущность способа электролиза галлия, разработанного ИХТТ УрО РАН, заключается в совместном выделении на катоде галлия и металлоносителя – цинка, предварительно введенного в электролит для повышения эффективности осаждения галлия. Многократно повторяя в одном электролизере операции осаждения и растворения катодного сплава в специально при-

готовленном щелочном растворе, получают растворы, богатые галлием и цинком.

Для питания электролизеров применяются ЭТС, содержащие силовой трансформатор и выпрямитель. В ЭТС используются неуправляемые (на диодах) и управляемые (на тиристорах) выпрямители, причем неуправляемые выпрямители часто снабжаются дросселями насыщения, и они также становятся управляемыми. Преобразовательные агрегаты для электролиза выпускаются ОАО "Преобразователь", а трансформаторы к ним ОАО "Уралэлектротяжмаш". Низковольтные преобразовательные агрегаты для электротехнологии и электрохимии с номинальной выходной мощностью до 150кВт с питающей трехфазной сетью 380В серийно выпускались Кеминским (бывш. Быстровским) электротехническим заводом, а преобразовательные агрегаты на большую мощность с питанием от сети 6, 10кВ – Гайским заводом "Электропреобразователь". При опытно - промышленном внедрении на Уральском алюминиевом заводе способа электрохимического выделения галлия из щелочно – алюминатных растворов глиноземного производства был применен реверсивный тиристорный преобразователь САПТ-12500/24, разработанный и изготовленный объединением "Уралэнергоцветмет". В настоящее время широкую гамму преобразователей для электролиза также выпускает ОАО "Российская электротехническая компания" (РЭТК). Большое внимание производству агрегатов для электролиза уделяют и ведущие иностранные фирмы, такие, как Siemens, ABB, Geumont Schneider, Cegelec.

Номинальный ток промышленных электролизеров галлия находится в пределах $6 \div 12,5$ кА, а падение напряжения на одной ванне составляет $4 \div 4,5$ В. Количество последовательно включенных электролизеров не превышает десяти. Таким образом, для питания промышленных электролизеров галлия используются низковольтные преобразовательные агрегаты с номинальными токами 6300 и 12500А и стандартными напряжениями 24, 36 и 48В. Преобладает двойная нулевая схема "две обратные звезды с уравнительным реактором".

Специфика получения галлия обуславливает размещение цехов электролиза в сложившейся инфраструктуре алюминиевого завода и, в частности, глиноземного производства. Указанное обстоятельство может диктовать условия энергоснабжения преобразовательных агрегатов, питающих электролизеры галлия. Так, при строительстве цеха электролиза галлия на площадке филиала "УАЗ СУАЛ" оказалось невозможным запитать трансформаторы преобразовательных агрегатов от высоковольтных сетей 10 (6) кВ.

Поэтому, как давно действующая цепь электролиза, так и новое производство галлия питается от ЭТС с входным напряжением 380В. Это обусловило необходимость разработки для электролизеров галлия экономичного высоко-точного низковольтного преобразовательного агрегата с питанием от сети 380В.

Во второй главе сформулированы требования к экспериментальной установке для исследования режимов при электролизе галлия и описана разрабо-

танная на основе этих требований установка, а также методика проведения исследований. Приведены результаты исследований электрических режимов при стационарных, импульсных и реверсивных токах в электролизере.

Проведение экспериментов на промышленных установках сопряжено с рядом трудностей: невозможностью отступления от существующего технологического режима, нереализуемостью на существующем оборудовании новых режимов, трудностью обеспечения чистоты эксперимента. Кроме того, в силу энергоемкости процесса, отступление от оптимального режима на промышленной ванне приводит к значительному перерасходу электроэнергии и ухудшению качества продукции. С другой стороны, сложность химических процессов при электролизе галлия не позволяет обойтись без экспериментальной части исследований. Структурная схема разработанной и созданной экспериментальной установки представлена на рис 1, где: ЭИП – эталонный источник питания, ПА – преобразовательный агрегат. На этой установке в ИХХТ УрО РАН было проведено свыше 600 опытов. Исследования проводились по следующим направлениям: изменение состава электролита и температуры, изменение конструкции электролизера, изменение формы тока в электролизере и его плотности. Исследовались следующие виды токограмм: постоянный выпрямленный ток, трапециевидная токограмма, трапециевидная токограмма с реверсом, постоянный выпрямленный ток с наложением импульсов прямоугольной формы. Для каждого процесса оценивалась эффективность технологического процесса, количественно определяемая как процентное отношение разницы между исходной и конечной концентрациями галлия в растворе к исходной:

$$\Theta = [(K_{исх} - K_{кон})/K_{исх}]100\%. \quad (1)$$

Одним из основных показателей качества технологического процесса электролиза является выход по току, который в режиме постоянного тока определяется по формуле :

$$\eta = \frac{m}{gI\tau} 100\%, \quad (2)$$

где m - масса осажденного на катоде металла, г; g - электрохимический эквивалент металла, г/Ач; I - ток через электролизер, среднее значение, А; τ - продолжительность электролиза, ч.

В реверсивном режиме выход по току определяется как:

$$\eta = mT 100 / g [I_{км}(\tau_k - \tau_{кф}) + \beta I_{ам}(\tau_a - \tau_{аф})], \quad (3)$$

где $I_{км}$ – установившейся ток электролизера в катодный период; $I_{ам}$ – установившийся ток электролизера в анодный период; τ_k , τ_a – длительность протекания импульсов прямо-

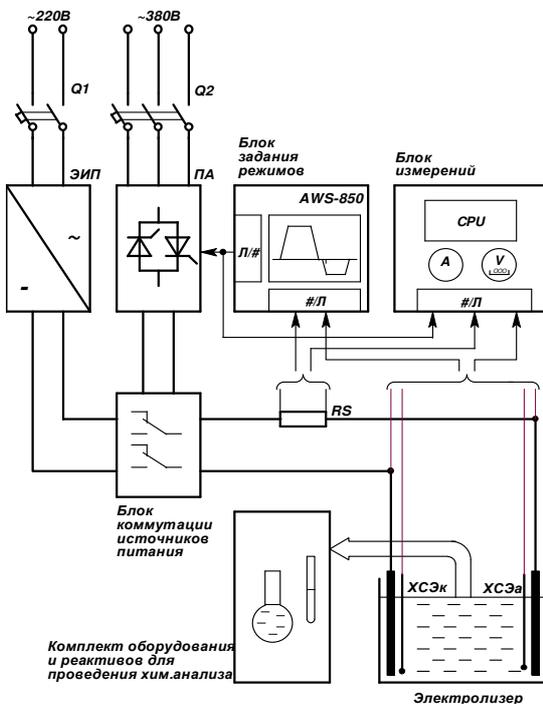


Рис.1

го и обратного тока; $\tau_{\text{кф}}$, $\tau_{\text{аф}}$ – длительность нарастания и спада импульсов прямого и обратного тока; T – период повторяемости импульсов тока; $\beta = U_{\text{ам}}/(E + U_{\text{ам}})$; $U_{\text{ам}}$ – установившееся напряжение на электролизере в анодный период; E – ЭДС электролизера.

Полученные результаты экспериментов позволили сделать ряд важных выводов и создали предпосылки для выполнения теоретических исследований системы Т-УВ-ЭГ.

1 Установлено, что электрические параметры электролизера галлия не зависят от концентрации в электролите ионов галлия и цинка и остаются постоянными, в пределах погрешности измерений, за весь период осаждения, а ряд параметров нелинейно изменяется при увеличении тока, протекающего через электролизер.

2 Определено, что количество электричества, непосредственно расходуемое на осаждение цинк – галлиевого сплава в экспериментальном электролизере, составляет не более 1,2% от общего количества электричества, подаваемого в электролизер за период осаждения, а остальная часть расходуется на электролиз щелочи.

3 Показано, что интенсивность осаждения цинк-галлиевого сплава определяется величиной напряжения на переходе катод-электролит, зависящей от катодной плотности тока.

4 Экспериментальные исследования электрических режимов при стационарных токах подтвердили, что оптимальная плотность тока для данных конструкции электролизера и параметров технологического процесса при работе с растворами глиноземного производства Уральского алюминиевого завода составляет $7 \div 7,5 \text{ А/л}$.

5 Установлено, что при работе на импульсной токограмме достигается уплотнение катодного осадка и сокращение за счет этого потерь галлия.

6 Применение реверсивной токограммы в экспериментальном электролизере оказалось неэффективным по причине дополнительных затрат электроэнергии из – за осаждения на аноде цинк – галлиевого сплава.

Третья глава посвящена разработке электрических схем замещения и математической модели электролизера галлия. Представление электролизера в виде электрической эквивалентной схемы позволяет получить количественную информацию о поведении исследуемого объекта при различных внешних воздействиях и несет объективную информацию о происходящих в электролизере процессах. Данная информация необходима для решения ряда задач: проектирование источника питания электролизеров; исследование электрических характеристик системы "источник питания – электролизер"; синтез системы автоматического регулирования; выбор оптимальных режимов электролиза, оценка энергетических характеристик технологического процесса и источника питания.

При пропускании электрического тока через электролизер на катоде идут процессы восстановления, а на аноде идут процессы окисления, с образованием

возле каждого электрода двойного электрического слоя. Двойной электрический слой характеризуется ЭДС (электрохимической составляющей напряжения) и емкостью и может быть представлен в виде параллельного соединения элементов E и C . Явление саморазряда двойного электрического слоя смоделировано активным сопротивлением R , шунтирующим ЭДС. В общем случае, сопротивление электролита может быть представлено комплексным сопротивлением в виде последовательно соединенных активного сопротивления и индуктивности. По утверждению большинства авторов, правомерно моделирование импеданса раствора электролита в виде обычного активного сопротивления.

Методически составление схемы замещения электролизера галлия выполнялось в следующей последовательности:

- определение статических вольтамперных характеристик;
- определение динамических вольтамперных характеристик;
- осциллографирование переходных режимов при различных возмущениях;
- синтез схемы замещения и определение ее параметров;
- моделирование и исследование синтезированной схемы замещения;
- уточнение параметров схемы замещения;
- составление математической модели электролизера.

Статические и динамические вольтамперные характеристики промышленного электролизера галлия приведены на рис. 2. В отличие от аналогичных характеристик экспериментального электролизера, где зависимости $U_{\text{э}} = f(I_{\text{э}})$, $U_{\text{аэ}} = f(I_{\text{э}})$ совпадают при нарастании и спадании тока, в промышленном электролизере указанные зависимости в динамике расходятся, образуя возрастающую и спадающую ветви. Таким образом, в промышленном электролизере галлия в динамике имеет место отставание тока от напряжения, аналогичное "петле гистерезиса".

Очевидно, с ростом объема электролита в электролизере, изменяются условия перемещения ионов газов, накладывающие ограничения на скорость электрохимических реакций при изменении приложенного к электролизеру напряжения. В электролизере галлия основными носителями тока являются ионы водорода и кислорода, а электролит имеет повышенную вязкость.

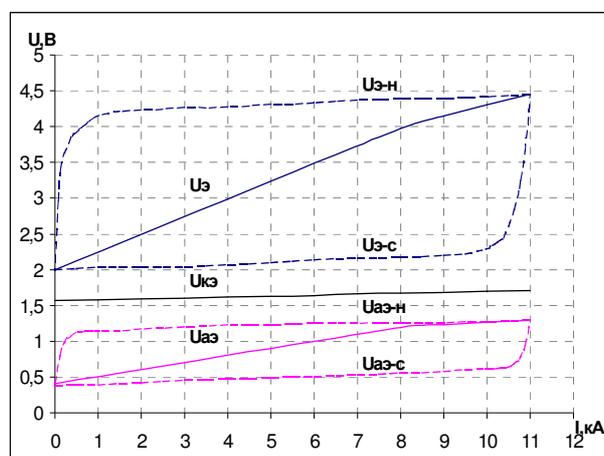


Рис.2.

В прикатодном слое, где происходит осаждение цинк – галлиевого сплава, явление запаздывания тока относительно напряжения не зафиксировано. Основной реакцией, идущей на аноде, является восстановление молекул кислорода. Наличие "петли" гистерезиса в прианодном двойном электрическом слое обусловлено, с точки зрения электрохимии, диффузионными явлениями, накладывающими ограничения на ускорение или замедление реакции восстановления кислорода при изменении приложенного к электролизеру напряжения. Таким

образом, в схеме замещения электролизера галлия должны присутствовать индуктивности, модулирующие инерционность электрохимических реакций.

На рис. 3 приведена полная схема замещения электролизера галлия. На схеме обозначены:

- $U_{\text{э}}$ – напряжение на электролизере;
- $U_{\text{эл}}$ – падение напряжения в электролите;
- $U_{\text{аа}}$ – падение напряжения в анодном узле;
- $U_{\text{кк}}$ – падение напряжения в катодном узле;
- $U_{\text{аэ}}$ – напряжение на переходе анод – электролит;
- $U_{\text{кэ}}$ – напряжение на переходе катод – электролит;
- $E_{\text{а}}$ – ЭДС прианодного двойного электрического слоя;
- $E_{\text{к}}$ – ЭДС прикатодного двойного электрического слоя;
- $i_{\text{э}}$ – ток через электролизер;
- $R_{\text{аа}}$ – сопротивление анодного узла;
- $R_{\text{кк}}$ – сопротивление катодного узла;
- $R_{\text{а}}$ – сопротивление перехода анод – электролит;
- $R_{\text{к}}$ – сопротивление перехода катод – электролит;
- $R_{\text{ар}}$ – сопротивление разряда прианодного двойного электрического слоя;
- $R_{\text{кр}}$ – сопротивление разряда прикатодного двойного электрического слоя;
- $R_{\text{элс}}$ – линейная составляющая сопротивления электролита;
- $R_{\text{элн}}$ – нелинейная составляющая сопротивления электролита;
- $L_{\text{а}}$ – индуктивность перехода анод – электролит;
- $L_{\text{эл}}$ – индуктивность электролита.

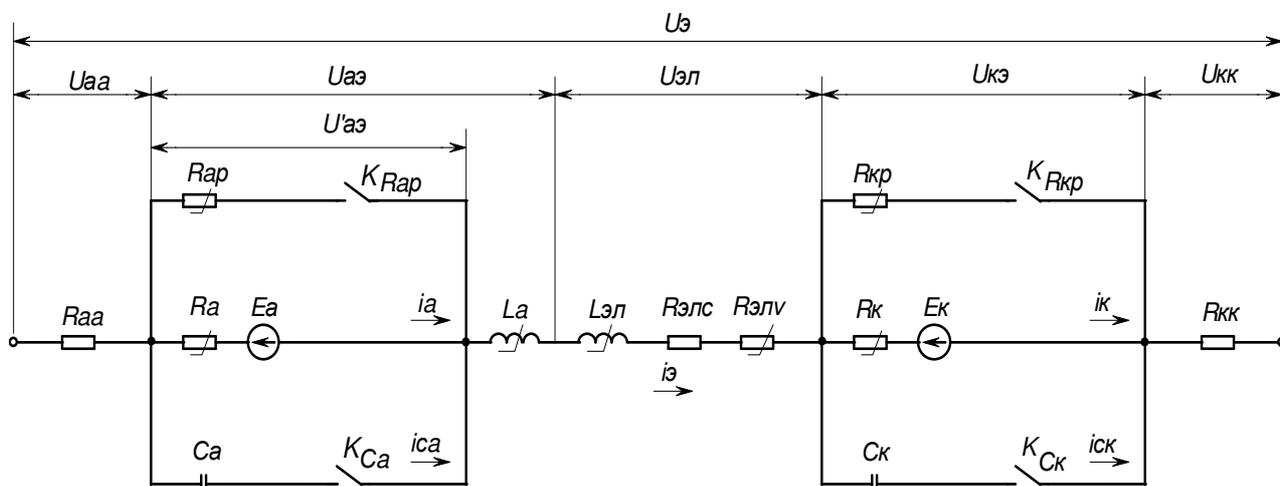


Рис.3

Как следует из вольтамперных характеристик, импедансы схемы замещения электролизера галлия зависят от протекающего по нему тока, т. е. носят нелинейный характер. Следует иметь в виду, что электрические параметры электролизера не являются постоянными величинами, а имеют зону разброса, определяемую случайным сочетанием ряда факторов: химического состава залитого в электролизер электролита, концентрации в растворе химических элементов, температуры, наличия органических добавок, плотности.

Математическая модель, соответствующая схеме замещения рис.3 представлена матричным уравнением (4).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\text{э}} \\ u'_{\text{аэ}} \\ u_{\text{кэ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{\text{э}\Sigma}}{L_{\text{э}\Sigma}} & -\frac{1}{L_{\text{э}\Sigma}} & -\frac{1}{L_{\text{э}\Sigma}} \\ \frac{1}{C_{\text{а}}} & -\frac{1}{C_{\text{а}} \cdot R_{\text{а}}} & 0 \\ \frac{1}{C_{\text{к}}} & 0 & -\frac{1}{C_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{\text{э}} \\ u'_{\text{аэ}} \\ u_{\text{кэ}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\text{э}\Sigma}} & -\frac{1}{L_{\text{э}\Sigma}} & -\frac{1}{L_{\text{э}\Sigma}} \\ 0 & \frac{1}{C_{\text{а}} \cdot R_{\text{а}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{\text{э}} \\ E_{\text{а}} \\ E_{\text{к}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $R_{\text{э}\Sigma} = R_{\text{аа}} + R_{\text{кк}} + R_{\text{элс}} + R_{\text{элв}}$, $L_{\text{э}\Sigma} = L_{\text{а}} + L_{\text{эл}}$.

Применительно к различным технологическим режимам экспериментального и промышленного электролизера полная схема замещения может быть трансформирована. На рис. 4 и рис. 5 представлены осциллограммы переходного процесса в экспериментальном электролизере и работы при больших углах управления. Видно, что форма тока точно повторяет форму напряжения.

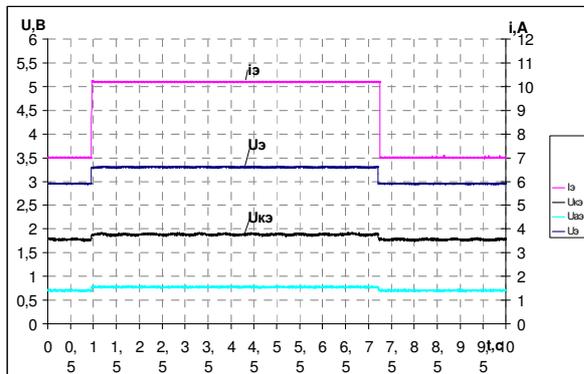


Рис.4.

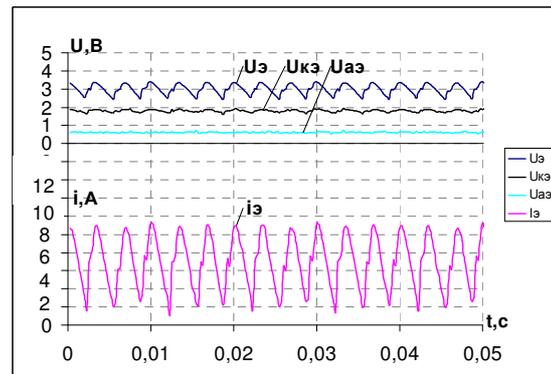


Рис.5.

Емкости $C_{\text{а}}$ и $C_{\text{к}}$ сказываются только в динамических режимах, когда происходит изменение величины ЭДС двойных электрических слоев, а именно при первом включении электролизера на напряжение, при работе в импульсном режиме с бестоковой паузой, при смене направления тока в электролизере. Тогда в режиме стационарных токов схема замещения ЭГ состоит из последовательно соединенных ЭДС электролизера $E_{\text{э}} = E_{\text{а}} + E_{\text{к}}$ и сопротивлений электролита $R_{\text{эс}} = R_{\text{аа}} + R_{\text{элс}} + R_{\text{кк}}$ и $R_{\text{эв}} = R_{\text{а}} + R_{\text{элв}} + R_{\text{к}}$. Вольтамперная характеристика описывается уравнением 5:

$$U_{\text{э}} = E_{\text{э}} + I_{\text{э}}(R_{\text{эс}} + R_{\text{эв}}). \quad (5)$$

Поскольку экспериментальный электролизер имеет меньший объем, диффузионные явления в нем практически не проявляются, что отражается отсутствием индуктивностей в схеме замещения рис.3. Математическая модель ЭГ в данном случае представляется уравнениями (6)-(8).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{a\varepsilon} \\ u_{к\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{\varepsilon\Sigma} + R_a}{C_a \cdot R_a \cdot R_{\varepsilon\Sigma}} & -\frac{1}{C_a \cdot R_{\varepsilon\Sigma}} \\ -\frac{1}{C_k \cdot R_{\varepsilon\Sigma}} & -\frac{R_{\varepsilon\Sigma} + R_k}{C_k \cdot R_k \cdot R_{\varepsilon\Sigma}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{a\varepsilon} \\ u_{к\varepsilon} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_a \cdot R_{\varepsilon\Sigma}} & \frac{1}{C_a \cdot R_a} & 0 \\ \frac{1}{C_k \cdot R_{\varepsilon\Sigma}} & 0 & \frac{1}{C_k \cdot R_k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{\varepsilon} \\ E_a \\ E_k \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$R_{\varepsilon\Sigma} = R_{aa} + R_{kk} + R_{\text{элс}} + R_{\text{элв}}; \quad (7)$$

$$i_{\varepsilon} = -\frac{1}{R_{\varepsilon\Sigma}} \cdot u_{a\varepsilon} - \frac{1}{R_{\varepsilon\Sigma}} \cdot u_{к\varepsilon} + \frac{1}{R_{\varepsilon\Sigma}} \cdot U_{\varepsilon}. \quad (8)$$

При математическом моделировании различных режимов удобно пользоваться аналитическими аппроксимациями вольтамперных характеристик электролизера. Например, характеристика рис. 2 может быть аппроксимирована следующим образом.

Прямая ветвь:

$$0 \leq i_{\varepsilon} \leq 1 \text{кА}: U_{\varepsilon} = 4,15 - 2,15(1 - i_{\varepsilon})^4, \quad (9)$$

$$1 \text{кА} \leq i_{\varepsilon} \leq 11 \text{кА}: U_{\varepsilon} = 4,15 + 0,03(i_{\varepsilon} - 1). \quad (10)$$

Обратная ветвь:

$$0 \leq i_{\varepsilon} \leq 10 \text{кА}: U_{\varepsilon} = 2,0 + 0,024i_{\varepsilon}, \quad (11)$$

$$10 \text{кА} \leq i_{\varepsilon} \leq 11 \text{кА}: U_{\varepsilon} = 2,29 + 2,16(i_{\varepsilon} - 10)^3. \quad (12)$$

Погрешность аппроксимации не превышает 2,5%.

В четвертой главе сформулированы требования к электротехнической системе для питания электролизеров галлия, разработана силовая часть Т-УВ системы питания электролизеров галлия, проведен анализ способов улучшения энергетических показателей ПА и разработана конструкция ПА с фазоступенчатым регулированием напряжения. Требования к электротехнической системе для питания электролизеров галлия определяются следующими факторами:

- электрическими параметрами электролизера галлия;
- количеством электролизеров в последовательной цепи;
- видом распределительной сети действующего производства;
- минимизацией потерь на преобразование электрической энергии.

Задачей, решаемой при разработке преобразовательного агрегата для электролиза галлия, было снижение внутреннего падения напряжения, минимизация потерь как в самом преобразовательном агрегате, так и питающей сети за счет снижения индуктивного сопротивления контура коммутации, активного сопротивления контура коммутации и отводов вентиляльных обмоток трансформатора. Данная техническая задача была решена путем создания совмещенного модуля "силовой трансформатор – управляемый выпрямитель". На рис. 6 приведен чертеж, поясняющий сущность конструкции модуля. Он включает три однофазных трансформатора 1, каждый из которых содержит кольцевой магнитопровод 2, установленный на горизонтальном элементе вентиляльной обмот-

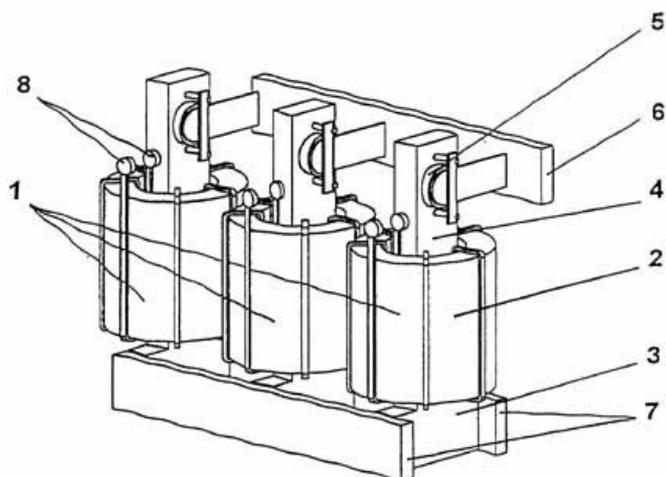


Рис.6

ки – шине 3 и охватывающий вертикальный элемент вентильной обмотки – жесткую шину 4, на которой установлен тиристор 5. Выходом модуля являются сборная шина постоянного тока 6, к которой подключены тиристоры трех фаз модуля, и сборные шины постоянного тока 7, к которым подключены горизонтальные элементы вентильных обмоток. Кольцевые магнитопроводы 2 охвачены сетевыми обмотками 8.

Снижение индуктивного сопротивления контура коммутации и снижение активного сопротивления обмоток трансформаторов достигается за счет применения однофазных трансформаторов с кольцевыми магнитопроводами, охватывающими вертикальные элементы вентильных обмоток, что обеспечивает лучшее потокосцепление между обмотками трансформаторов, меньшую длину магнитных силовых линий и стабильность характеристик кольцевых магнитопроводов по всей длине. Снижение сопротивления отводов вентильных обмоток трансформаторов достигается за счет установки тиристоров на вертикальных элементах вентильных обмоток трансформаторов непосредственно на выходе из кольцевого магнитопровода. Сильноточные вентильные обмотки выполнены из водоохлаждаемых шин, что позволяет уменьшить диаметр магнитопроводов и, следовательно, массу магнитопроводов и потери в них. Шины вентильных обмоток образуют жесткую сварную конструкцию и являются несущим элементом модуля "силовой трансформатор – управляемый выпрямитель". Конструкция модуля защищена патентом РФ №2173005 и свидетельством на полезную модель №15148.

Несмотря на ограниченный диапазон регулирования выпрямленного напряжения в установившихся режимах $\Delta U_d = U_{dmax} - U_{dmin}$ относительно максимального выпрямленного напряжения U_{dmax} , потребление преобразовательными агрегатами для электролиза реактивной мощности из сети весьма значительно. Основными техническими средствами компенсации реактивной мощности, улучшения спектров токов и напряжений преобразовательных подстанций (КПП) электролизных производств являются:

- пассивные фильтрокомпенсирующие устройства;
- увеличение эквивалентной пульсности ;
- тиристорные компенсаторы реактивной мощности;
- активные фильтры;
- компенсированные преобразовательные агрегаты;
- преобразовательные агрегаты с повышенными энергетическими характеристиками (параметрические источники тока, многоэлементные несимметричные агрегаты, агрегаты с управлением по первичной обмотке силового

трансформатора, агрегаты с применением полностью управляемых силовых вентиляей).

Эффективным средством улучшения энергетических характеристик преобразовательных агрегатов для таких нагрузок является фазоступенчатый способ регулирования выпрямленного напряжения. Однако, "классическая" схема реализации фазоступенчатого регулирования выпрямленного напряжения имеет существенные недостатки, препятствующие ее внедрению в агрегатах для электролиза:

- требуются два комплекта вентиляей на полный ток нагрузки агрегата;
- при переключении с тиристора минимальной ступени напряжения на тиристор максимальной ступени коммутируется полный ток нагрузки агрегата;
- требуется силовой трансформатор с отводами вентиляейной обмотки.

На основании проведенного анализа предложена схема дополнительного блока к системе Т-УВ, обеспечивающего фазоступенчатое регулирование напряжения, достаточное для стабилизации тока в установившихся режимах.

Значения максимального U_{dmax} и минимального U_{dmin} напряжений ПА при использовании фазоступенчатого регулирования определяются по (13) и (14):

$$U_{dmax} = k_{cx} U_{2ф}, \quad (13)$$

где: k_{cx} – коэффициент схемы выпрямления; $U_{2ф}$ – фазное вторичное напряжение.

$$U_{dmin} = k_T U_{dmax} / (1 + k_T), \quad (14)$$

где k_T – коэффициент трансформации дополнительного трансформатора, задаваемый соотношением витков его вторичной и первичной обмоток:

$$k_T = w_2 / w_1. \quad (15)$$

Новизна технического решения подтверждена патентом РФ №2172056 и свидетельством на полезную модель №15944.

В пятой главе приведена математическая модель системы Т-ТВ-ЭГ и проведен обзор программных продуктов, предназначенных для математической обработки и моделирования систем.

Значительный вклад в теорию и практику силовой преобразовательной техники внесли И.Л.Каганов, А.А.Булгаков, Г.А.Ривкин, В.С.Руденко, Ю.К.Розанов, И.М.Серый, А.А. Янко-Триницкий, И.Я.Браславский, В.В.Шипицын, Р.Т.Шрейнер, Ю.И.Хохлов и другие.

В основу моделирования положен подход, предложенный В.С.Богрым, Н.Н.Бондаренко и А.А.Суконниковым. Преобразователь, выполненный по схеме "две обратные звезды с уравнительным реактором" рассматривается как два "трехфазных нулевых" преобразователя, включенных параллельно на общую нагрузку через разделительный реактор (УР). Данный подход справедлив при условии, что уравнительный реактор полностью вступил в работу, выровняв напряжения "нулевых" групп, что справедливо при $I_d > I_{dкрит}$ ($I_{dкрит} \approx 0,01 \div 0,02\%$ от номинального тока).

В рассмотрение вводятся также контурные токи, для нечетной и четной группы соответственно: i_{K1} , i_{K2} – протекающие через находящуюся в работе

вентильную ветвь нечетной или четной группы, полуобмотку уравнительного реактора и нагрузку; i_{K3} , i_{K4} – токи в контурах коммутации групп.

При моделировании принимается кусочно-линейная модель тиристора. Полагается, что в закрытом состоянии сопротивление тиристора бесконечно велико, а открытому состоянию соответствует выражение вольт-амперной характеристики:

$$u_T = U_{TO} + R_T \cdot i_T, \quad (16)$$

где R_T – динамическое сопротивление тиристора в открытом состоянии.

Тогда УВ моделируется как тиристорный переключатель с переменной структурой, в котором моменты открытия и закрытия тиристоров зависят не только от моментов подачи сигналов управления, но и от развития электромагнитных процессов в схеме преобразователя. Изменение структуры преобразователя учитывается методом переключающих функций. Каждая функция F1, F3, F5 или F2, F4, F6, равна единице при одиночной работе вентиля в своей группе и при коммутации тока с него на очередной вентиль, в остальных случаях она равна нулю. Функции F7 и F8 равны единице при коммутации в своей группе и нулю – в межкоммутационных интервалах.

При моделировании автором принята T-образная схема замещения силового трансформатора и линейная аппроксимация кривой намагничивания УР. В общем случае нагрузка – ЭГ описывается уравнениями (4), (5) или (6)-(8), но в процессе моделирования более удобным является использование аппроксимации вольт-амперных характеристик ЭГ в виде функций, связывающих напряжение и ток ЭГ $u_{\Omega} = f(i_{\Omega})$, например, (9)-(12). Поскольку подключение ПА к цепи ЭГ осуществляется протяженной ошиновкой, ее влияния учитывается активным сопротивлением $R_{ш}$ и индуктивностью $L_{ш}$.

Эквивалентная расчетная схема приведена на рис.7.

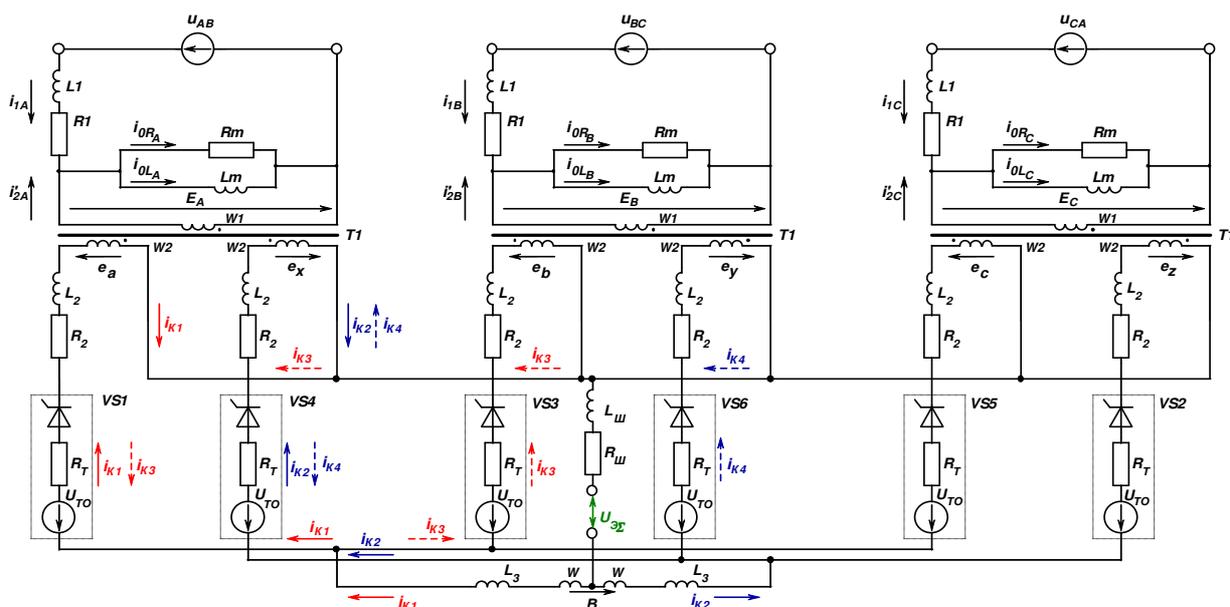


Рис.7.

Математическое описание системы Т-ТВ-ЭГ состоит из матричного уравнения вторичных цепей (17), матричного уравнения первичных цепей (18) и уравнений связи между ними.

Уравнение вторичных цепей:

$$M \cdot \frac{di_K}{dt} = M1 \cdot i_K + M2 \cdot [U_{TO} + U_{\Sigma}] + F \cdot e, \quad (17)$$

где: i_K – вектор контурных токов;

e – вектор ЭДС вторичных обмоток трансформаторов Т1-Т3;

M – квадратная матрица индуктивностей вторичных цепей;

$M1$ – квадратная матрица активных сопротивлений вторичных цепей;

F – квадратная матрица переключающих функций.

Уравнение (17) дополняется уравнениями, позволяющими выразить токи в ветвях ПА через контурные токи и переключающие функции.

Уравнение первичных цепей:

$$\frac{di_1}{dt} = K1 \cdot i_1 + K2 \cdot i'_2 + K3 \cdot u_1, \quad (18)$$

где: i_1 – вектор первичных токов;

i'_2 – вектор вторичных токов, приведенных к первичной стороне Т1-Т3;

u_1 – вектор линейных напряжений питающей сети;

$K1, K2, K3$ – матрицы активных сопротивлений и индуктивностей первичных цепей и контура намагничивания;

Уравнения связи позволяют выразить элементы матрицы вторичных цепей e через элементы матрицы первичных цепей i_1 , а элементы матрицы i'_2 через токи во вторичных ветвях ПА.

Моделирование проводилось с использованием языка С++ и пакета SIMULINK, интегрированного в состав пакета MATLAB. Цифровое моделирование режимов работы системы Т-УВ-ЭГ показало наличие высоких энергетических показателей ПА, выполненного на основе предложенной конструкции силового модуля по сравнению с системой Т-УВ обычной конструкции.

Выполнен расчет и анализ несинусоидальности напряжения преобразовательного агрегата типа ПТР-12500/36 и получена хорошая электромагнитная совместимость с системой электроснабжения (коэффициент несинусоидальности равен 1,75%, действующие значения гармонических составляющих меньше соответствующих значений по ГОСТ 31109-97).

Выполнены расчеты напряжений и токов на входе, выходе и в элементах системы Т-УВ для различных режимов электролиза галлия. Сравнение значений, полученных при моделировании и при промышленных испытаниях, показало высокую сходимость результатов (наибольшее отклонение составило 7,4%).

В шестой главе описан промышленный преобразовательный агрегат (ППА) для питания промышленного электролизера галлия (ПЭГ) и его система управ-

ления, приведены методика и результаты промышленных испытаний системы Т-УВ-ЭГ.

ППА ПТР-12500/36 УХЛ4 выполнен по схеме “две обратные звезды с уравнительным реактором” по документации, разработанной на основе конструктивных решений, изложенных в главе 4. Фото ПТР-12500/36 УХЛ4 приведено на рис.8, функциональная схема – на рис 9. Система управления реализована на элементной базе микроэлектроники и обеспечивает все необходимые функции управления и защиты. Разработана также система управления на базе контроллера SIEMENS SIMATIC S7-200.

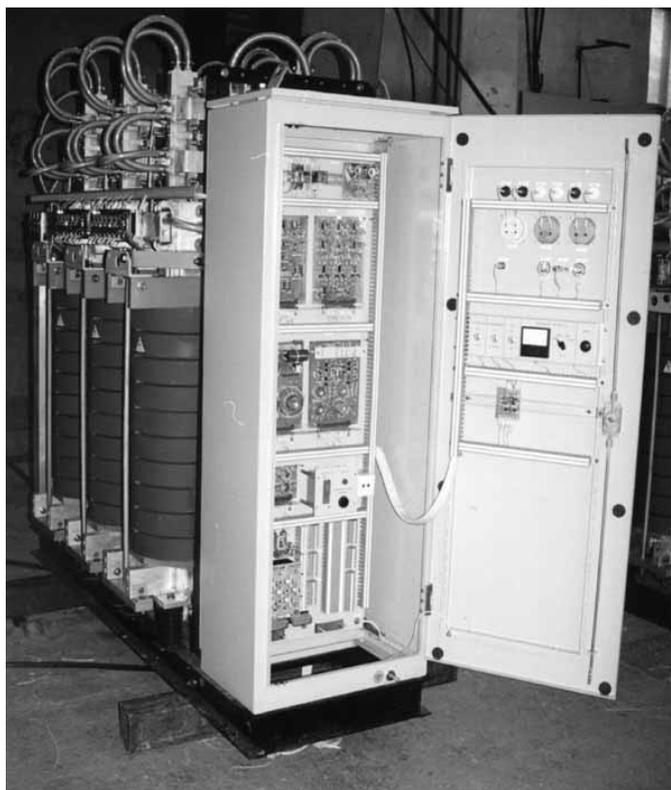


Рис.8

Результаты испытаний промышленного электролизера относительно характера графиков U_{Σ} и E_{Σ} полностью совпадают с результатами экспериментальных исследований лабораторного электролизера, и их величина не позволяет судить о конце процесса осаждения. Анализ режимов работы промышленного электролизера позволил создать его математическое описание, а также внести ряд усовершенствований в процесс электролиза и алгоритмы. Внедрение по результатам экспериментальных исследований импульсной токограммы также дало положительный эффект.

Итоговые технико-экономические показатели промышленных испытаний приведены в табл.1.

Таблица 1

№	Мероприятие	Показатель		Ед. изм.	Величина
		К	П Д		
1	Совершенствование конструкции системы “Т-УВ”	Типовая система		%	89,0
		Разработанная и внедренная система		%	94,8
2	Оптимизация процесса электролиза	Экономия электроэнергии		%	8,3
3	Оптимизация процесса растворения	Сокращение времени		мин	12
				%	30
4	Применение энергосберегающего алгоритма управления преобразователем	Увеличение выхода галлия по току		%	8%

В приложениях представлены документы о внедрении результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе поставлены и решены актуальные задачи разработки и исследования системы Т-ТВ-ЭГ.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1 Выполнен анализ электротехнологических систем для питания электролизеров, включая электролизеры галлия, и режимов их работы.

2 Создана физическая модель системы Т-УВ и выполнен комплекс экспериментальных исследований электрических режимов электролиза галлия.

3 Разработана методика исследования электрических режимов электролиза галлия на экспериментальной установке и промышленной цепи.

4 Разработаны электрические схемы замещения и математическое описание экспериментального и промышленного электролизеров для стационарных и динамических режимов.

5 Обосновано наличие и получена динамическая вольтамперная характеристика электролизера галлия и предложена ее аппроксимация.

6 Получены расчетные формулы для определения параметров и электрических величин электролизера галлия.

7 Разработана конструкция силового модуля Т-УВ с улучшенными энергетическими показателями (КПД увеличен на 5,8%).

8 Предложено техническое решение, реализующее фазоступенчатый способ регулирования выпрямленного напряжения и обеспечивающее повышение коэффициента мощности.

9 Разработана математическая модель системы Т-УВ-ЭГ для стационарных и динамических режимов.

10 Разработана программа расчета режимов системы Т-УВ-ЭГ с использованием пакета MATLAB, учитывающая конструктивные особенности силового модуля, нелинейность электролизера и различные виды токограмм.

11 Экспериментальные исследования и промышленные испытания системы Т-УВ-ЭГ подтвердили правильность теоретических предпосылок и разработанных на их основе методов расчета стационарных и динамических режимов электролиза галлия.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1 Бобков В.А., Бобков А.В. Энергосберегающая преобразовательная техника для электролиза в цветной металлургии // Энергосбережение-98, официальный каталог. – Екатеринбург: Уральские выставки, 1998. - С.44.

2 Бобков А.В. Электроэкономичный полупроводниковый преобразователь для производства галлия // Энергосбережение-99, официальный каталог. – Екатеринбург: Уральские выставки, 1999. - С.11.

3 Управляемый реверсивный преобразователь для электролиза галлия/ А.В.Бобков и др. // Всероссийский электротехнический конгресс с международным участием ВЭЛК – 99: тез. докл., т. 1. - М.: 1999. – С. 98.

4 Бобков А.В. Автоматизированная система управления источником питания электролизера галлия // Автоматизация и прогрессивные технологии –99: труды, часть 1, Новоуральск: 1999. - С.323-326.

5 Модернизация оборудования для электролиза галлия / В.С.Шаблаков, А.В.Кузнецов, В.Р.Лисин, В.Б.Садовников, А.В.Бобков, В.А.Бобков, С.П.Яценко, Г.М.Рубинштейн, В.С.Копырин // Промышленная энергетика, 1999, №9. - С.19-23.

6 Бобков А.В. Экспериментальная преобразовательная установка по исследованию экономичных режимов электролиза редкоземельных металлов // Энергосбережение, официальный каталог. – Екатеринбург: Уральские выставки, 2000. - С.113.

7 Бобков А.В., Копырин В.С., Сарапулов Ф.Н. Преобразовательная установка для экспериментального исследования режимов электролиза растворов нестационарными токами // Вопросы совершенствования электротехнического оборудования и электротехнологий: Сборник статей. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000, №8. - С.22-27.

8 Марков В.Ю., Бобков А.В., Сарапулов Ф.Н. Автоматизированная система управления преобразователями для электролиза // Межвузовская научная конференция “Электротехника. Электромеханика. Электротехнологии”. Доклады и тезисы докладов. Новосибирск: 2001. - С.61-62.

9 Бобков А.В., Копырин В.С. Алгоритм управления преобразователем для питания электролизеров галлия // Современные проблемы и достижения в области электротехнологий в XXI веке. Материалы международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2001. -С.6-7.

10 Бобков А.В. Математическая модель системы “преобразователь – электролизер галлия” для установившегося режима // Современные проблемы и достижения в области электротехнологий в XXI веке. Материалы международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2001. -С.4-5.

11 Бобков А.В., Бобков В.А., Копырин В.С. Управляемый выпрямитель с фазоступенчатым регулированием // Промышленная энергетика, 2001, №6. - С.42-45.

12 Эффективное использование электроэнергии при электролизе галлия / А.В.Бобков, С.П.Яценко, Г.М.Рубинштейн, В.Б.Садовников, В.С.Копырин //

Тезисы VI региональной научно-практической конференции “Алюминий Урала - 2001”, Краснотурьинск, 2001. - С. 113-114.

13 Сарапулов Ф.Н., Бобков А.В. Математическое описание электролизера галлия при стационарных токах //Сборник тезисов докладов научно-технической конференции “Совершенствование энергетики цветной металлургии”. Екатеринбург, 2001. С.44.

14 Формирование эффективных режимов электролиза галлия / А.В.Бобков, С.П.Яценко, Г.М.Рубинштейн, В.С.Копырин // Сборник тезисов докладов международного конгресса “300 лет уральской металлургии”. Верхняя Пышма, 2001. - С.83.

15 Бобков А.В. Исследование электрических режимов преобразователя для электролиза галлия / Энергетика и электротехника, официальный каталог. – Екатеринбург: Уральские выставки, 2001. - С.63.

16 Пути энергосбережения при электролизе галлия / А.В.Бобков, В.С.Копырин, С.П.Яценко, Г.М.Рубинштейн // Тезисы докладов IV международной научно-практической конференции “Энергопотребление и энергосбережение: проблемы, решения”. Пермь: Книга, 2001. -С.127-129.

17 Патент 2173005 (РФ) Полупроводниковый преобразователь / А. В. Бобков, О. А. Неуймин. Опубл. 27. 08.2001, бюл. №24.

18 Патент 2172056 (РФ) Управляемый выпрямитель / А.В.Бобков, В.А.Бобков, О. А. Неуймин. Опубл. 10. 08.2001, бюл. №22.

19 Св. на полезную модель №15148 (РФ) Полупроводниковый преобразователь / А. В. Бобков, О. А. Неуймин.

20 Св. на полезную модель №15944 (РФ) Управляемый выпрямитель / А.В.Бобков, В.А. Бобков, О.А. Неуймин.