

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт

Электроэнергетики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В.И. Пантелеев
подпись инициалы, фамилия
«__» _____ 2023г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
Автоматизация режима управления серии электролиза
наименование темы
13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
код и наименование направления
13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»
код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____	доц. каф ЭМиАТ, к.э.н.	Н. В. Дулесова
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		С. С. Лебедев
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	Начальник ПСО МУП «АЭС»	И.А. Кычакова
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	доц. каф ЭМиАТ, к.т.н.	А. В. Коловский
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»
институт

«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Г.Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия
«29» сентября 2021 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Абакан 2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Автоматизация режима управления серии электролиза» содержит 61 страницы текстового документа, 28 использованных источников.

Объект исследования – кремниевое-преобразовательная подстанция АО «Русал–Саяногорск»

Методы исследования – обработка информации с помощью изучения уже внедренных технологий по автоматизации, моделирование с помощью информационных технологий в том числе и с визуализацией.

Цель данной работы является автоматизация режима управления серии электролиза.

Научная новизна работы заключается в автоматизации новых выпрямительных агрегатов по производству алюминия способных как в ручном, так и в автоматическом режиме осуществлять режим серии электролиза.

Практическая значимость исследований – работа позволит провести анализ преимуществ и недостатков уже действующего оборудования, необходимые расчеты для новых выпрямительных агрегатов, а также автоматизация по их управлению.

THE ABSTRACT

The final qualifying work on the topic “Automation of the electrolysis series control mode” contains 61 pages of text document, 28 sources used.

Object of study – Silicon-converter substation of JSC Rusal-Sayanogorsk

Research methods - information processing through the study of already implemented automation technologies, modeling using information technologies, including visualization.

The purpose of this work is to automate the control mode of a series of electrolysis.

The scientific novelty of the work lies in the introduction at aluminum production enterprises of new rectifying units capable of carrying out a series of electrolysis modes both manually and automatically.

The practical significance of the research - the work will allow for an analysis of the advantages and disadvantages of existing equipment, the necessary calculations for new rectifier units, as well as automation for their control.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Теоретическая часть.....	10
1.1 Общая характеристика КПП АО «Русал –Саяногорск»	10
1.2 Электроснабжение серии электролиза.....	13
1.3 Устройство и работа АПД.....	19
1.4 Стабилизация силы тока для электролиза.....	23
2 Аналитическая часть.....	26
2.1 Описание ведения режима серии электролиза на действующих предприятиях.	26
3 Практическая часть	31
3.1 Конструктивный расчет высокоамперных электролизеров	31
3.2 Расчет технологических параметров высокоамперного электролизера. ..	36
3.3 Электрический расчет высокоамперного электролизера	39
3.4 Расчет среднего напряжения.....	43
3.5 Падение напряжения в катодной ошиновке	45
3.6 Падение напряжения в общекорпусной ошиновке.....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	59

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в период нестабильной экономической ситуации многие именные и известные мировые производители алюминия, как в России, так и за рубежом, остановили свои производства. Серии электролизеров средней мощности с обожжёнными анодами были отключены, законсервированы или демонтированы на предприятиях «РУСАЛ».

Компании приняли решения по развитию современного электролитического производства алюминия, а связано это с совершенствованием высокоамперных развивающихся технологий, на которых получении алюминия на электролизерах с обожжёнными анодами происходит при силе тока более 300кА.

Из этого следует что на предприятиях по производству алюминия наиболее мощными и энергоемкими потребителями постоянного тока являются электроустановки для электролитического получения алюминия. Наиболее совершенным и технологическим преобразователем тока является кремниевые выпрямительные агрегаты. За короткий срок данные агрегаты зарекомендовали себя с лучшей стороны и в кратчайший период времени стали основными преобразователями в цветной металлургии. Поэтому для стабилизации технологического процесса электролиза необходимо функциональное расширение возможностей кремниевых выпрямительных агрегатов.

В данной работе проведен анализ внедренных кремниево-выпрямительных агрегатов на объектах «РУСАЛ», расчет технических показателей для оборудования питающих высокоамперные электролизеры.

Актуальность работы. С ростом развития современного электролитического производства алюминия, необходима автоматизации по управлению кремниевых выпрямительных агрегатов, обеспечивающих режим электролиза, с целью, повышение технических и экономических показателей.

Степень разработанности проблемы. Особый вклад по внедрению и развитию процессов автоматизации режима электролиза и автоматизации в

целом электролизного производства на различных уровнях занимались многие отечественные и зарубежные ученые, и ведущие специалисты в этой области, такие как Березин А.И., Чалых В.И., Левин М.В., Ветюков М.М., Концур А.Н., Платонов В.В. Архипов Г.В., M. Dupuis, J. Thonstan, и др.

Все работы упомянутых выше ученых, позволили обобщить, в полной мере изучить степень актуальности и важности рассматриваемой проблемы, которую они поднимают в своих научных работах и исследованиях и сделать выводы.

Целью работы является автоматизация режима управления серии электролиза

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучить литературные источники и работы по теме исследования;
- оценить потенциал действующих установок для режима серии электролиза;
- выполнить анализ и изучить характеристики оборудования;
- рассчитать технические параметры установок, которые будут выдавать высокоамперные характеристики;
- разработать интерфейс для автоматизации по управлению и обеспечению режима серии электролиза с визуализацией объектов.

Объект исследования – Кремниевое-преобразовательная подстанция АО «Русал–Саяногорск»

Предметом исследования Преобразовательные агрегаты серии КВА.

Методология и методы исследования. Обработка информации с помощью изучения уже внедренных технологий по автоматизации, моделирование с помощью информационных технологий, в том числе и с их визуализацией.

Научная новизна работы заключается в внедрении на предприятия по производству алюминия новых высокомоощных выпрямительных агрегатов способных как в ручном, так и в автоматическом режиме вести режим серии электролиза.

Практическая значимость работа позволит провести анализ преимуществ и недостатков уже действующего оборудования, необходимые расчеты для новых выпрямительных агрегатов, а также автоматизация по их управлению.

Апробация работы. Основные результаты были представлены в 2022 на XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы – 2022», в секции «Интеллектуальные энергетические системы в промышленности», посвященной Международному году фундаментальных наук в интересах устойчивого развития. Докладчик награжден сертификатом очного участия.

Структура и объем работы. Работа состоит из трех разделов: теоретическая, аналитическая и практическая часть. Объем работы составляет 62 страницы.

1 Теоретическая часть

1.1 Общая характеристика КПП АО «Русал–Саяногорск»

Объект расположен на территории АО «Русал–Саяногорск», в городе Саяногорск.

Площадка завода по производству алюминия располагается в Республике Хакасии район Муниципального образования г. Саяногорск, который располагается в 75 км южнее столицы г. Абакан, на левобережье реки Енисей, рассматриваемый объект расположен на промплощадки действующего предприятия.



Рисунок 1.1 – Промплощадка АО «Русал–Саяногорск»

Переменный ток напряжением 220кВ поступает на понизительную подстанцию открытого типа ОРУ 220кВ ГПП САЗ по воздушной линии

электропередач ВЛ 220кВ с подстанции 500кВ Означенное. На понизительной подстанции АО «Русал–Саяногорск», установлены открытые головные трансформаторы, которые понижают напряжение с 220кВ до 20кВ.

Далее ток поступает в главное распределительное устройство (ГРУ), откуда по средствам двойной системы шин, основной и резервной, поступает на кремниевые выпрямительные агрегаты (КВА). Такое исполнение обеспечивает бесперебойное питание потребителей 1 категории. Для преобразования переменного тока промышленной частоты в постоянный необходим целый комплекс оборудования, который включает в себя несколько выпрямительных блоков, трансформатор, защиты, сигнализация, контрольно-измерительную аппаратуру (КИА) и приборы, осуществляющие управление.

Особенность выпрямительных агрегатов на кремниевом преобразовательной подстанции АО «Русал–Саяногорск», в том, что эти агрегаты имеют совмещенную конструкцию – выпрямительные блоки в них расположены в одной камере с трансформатором. Такая конструкция используется в целях уменьшения габаритов преобразовательных подстанций, а также уменьшение трудоемкости при их монтаже.

Исполнение КПП на АО «Русал–Саяногорск» имеет открытую установку, без дополнительных ограждений, так как находится в помещениях с нормальной средой. Конструкция РУ постоянного тока в камерах КВА, осуществляется выводом из шкафов шинопроводом, для создания при необходимости видимого развода по средствам разъединителей постоянного тока РПТ.

Так как для производства алюминия необходимы большие значения выпрямленного тока, то преобразовательные подстанции построены по схеме параллельного включения. Поэтому для бесперебойного питания серии электролизеров на кремниевом-преобразовательной подстанции имеется определенное число агрегатных трансформаторов и столько же групп преобразователей. На КПП АО «Русал–Саяногорск» имеется 5 кремниевых выпрямительных агрегатов (КВА), в том числе один является резервным. Которые обеспечивают требуемую надежность электроснабжения. Кремниевая

подстанция сооружена вблизи электролизного корпуса, приблизительно 25 метров. В целях избегания больших потерь напряжения выпрямленного тока в ошиновке на участке, который проходит от подстанции до электролизеров, а также учитывается и экономическая целесообразность на сооружение соединительной ошиновки.

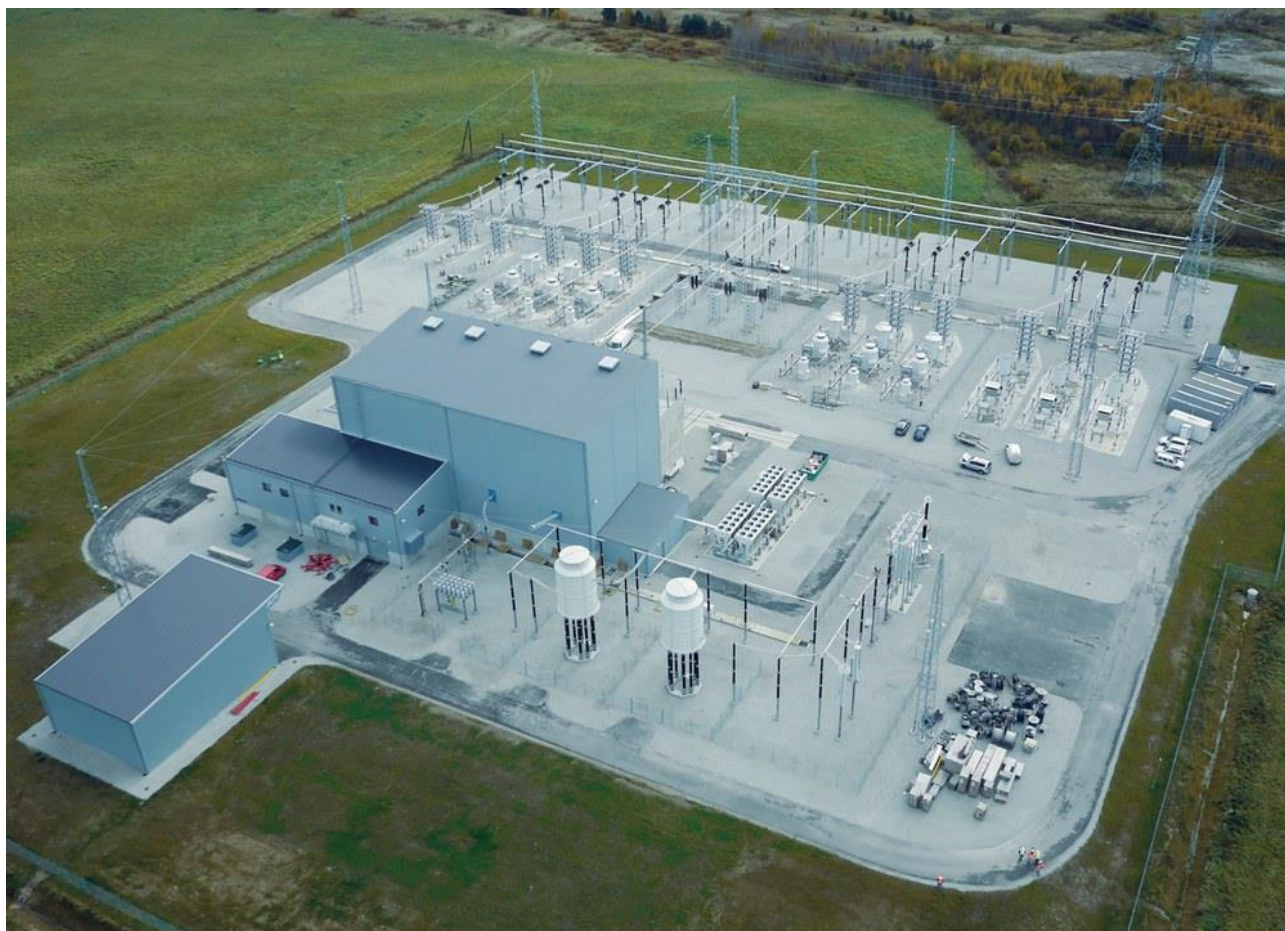


Рисунок 1.2 – Конструкция преобразовательной подстанции

1.2 Электроснабжение серии электролиза

Серия электролиза – это совокупность электролизеров, которые подключаются относительно друг друга в последовательную схему подключения и получающие электроэнергию в виде постоянного тока от кремниевой преобразовательной подстанции. Они располагаются в двух корпусах, длина которых достигает около 750 метров, а ширина 30 метров.

Согласно «Правилам устройства электроустановок» предприятия по производству алюминия, относятся к потребителям 1 категории, а это означает, что при прерывании электроснабжения может повлиять на опасность жизни и здоровья людей, повреждение оборудования, повлекшее за собой дорогостоящий ущерб, массовый брак производимой продукции. Исходя из правил электроприемники 1 категории электроснабжения, должны обеспечиваться двумя источниками питания. На всех заводах по производству алюминия соблюдаются данные правила, путем резервирования электроснабжения по высоковольтным ЛЭП, дополнительно устанавливаются на главных понизительных подстанциях (ГПП) резервные мощности и обязательным условием выполнения резерва, является дополнительный агрегат на серию.

Алюминиевая промышленность не стоит на месте, поэтому по мере ее развития, требуется значительные усовершенствования в преобразовательной технике. Первые преобразовательные агрегаты оснащались мотор-генераторами постоянного тока (МГ), но обладали совершенно низким КПД (80%), что совершенно мало при производстве цветных металлов. В том числе имели высокие эксплуатационные и технико-экономические затраты. Механические выпрямители — это самый первый способ преобразования переменного тока в постоянный ток, который разрабатывался еще начале XX века. Такие выпрямители работают на основе механического выпрямления тока, когда

движущаяся магнитная система вращается внутри статора с определенным количеством обмоток.

Принцип работы механического выпрямителя очень прост, он заключается в том, что, когда магниты вращаются они создают переменное магнитное поле, которое в свою очередь проходит через статор, с несколькими числом витков обмоток. Обмотки соединяются последовательно и с помощью коммутатора будут создавать постоянное напряжение на выходе.

Механические выпрямители широко распространялись в первой половине XX века, в особенности в промышленных установках, таких как ГЭС, где переменный ток, который генерируется генераторами, нужно было преобразовывать в постоянный ток для электропривода установки.

Но данные выпрямители, имели несколько проблем, одна из, это высокая стоимость, сложность в обслуживании и определенные ограничения по диапазон мощностей, что привело к тому, что со временем развития электронной техники они постепенно перестали использоваться в производстве.

В наше время МВ используются крайне редко. Вместо них имеют применение электронные выпрямители, которые имеют более высокую эффективность и точность, а также небольшие габариты и высокую надежность.

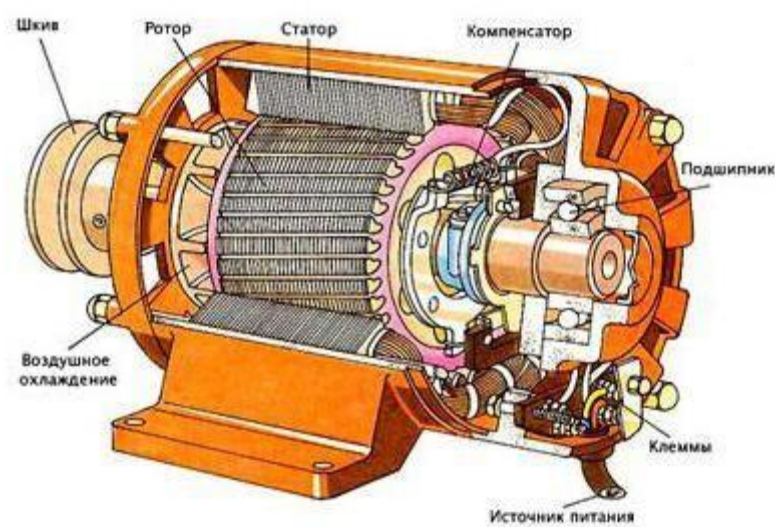


Рисунок 1.3 – Генератор постоянного тока

На смену им в преобразовательную технику пришли ртутные выпрямители (РВ), КПД которых 94%.

Ртутный выпрямитель – это электронный прибор, который так же, как и механический выпрямитель, предназначен для преобразования переменного тока в постоянный. Только данный выпрямитель использует свойства ртути, которая в жидком состоянии всегда является проводником, а если ртуть будет находиться в газообразном состоянии, то будет по своим свойствам изолятором.

В ртутном выпрямителе всегда используется два электрода, которые расположены внутри самой стеклянной колбы, заполненной ртутью.

Когда подается на один из электродов положительное напряжение, то электроны из ртути начинают переходить на данный электрод. В это время, ртуть становится проводником, и ток начинает протекать через выпрямитель, только в одном направлении. Если на электрод подать отрицательное напряжение, то электроны будут возвращаться в ртуть, и к ней возвращаются изоляционные свойства.

В эпоху ламповых технологий ртутные выпрямители имели широкое применение, в то время существовало потребность в высоконапряженном постоянном токе. Он нужен был для питания ламповых усилителей и других приборов. Но со временем они замаялись на более эффективные и экономичные твердотельные выпрямители, которые имеют ряд преимуществ таких как меньшая габаритная размерность, меньшие потери и шумы.

Однако ртутные выпрямители до сих пор используются в некоторых отраслях, например, в электрохимическом производстве, где с помощью них получают постоянный ток большой мощности.

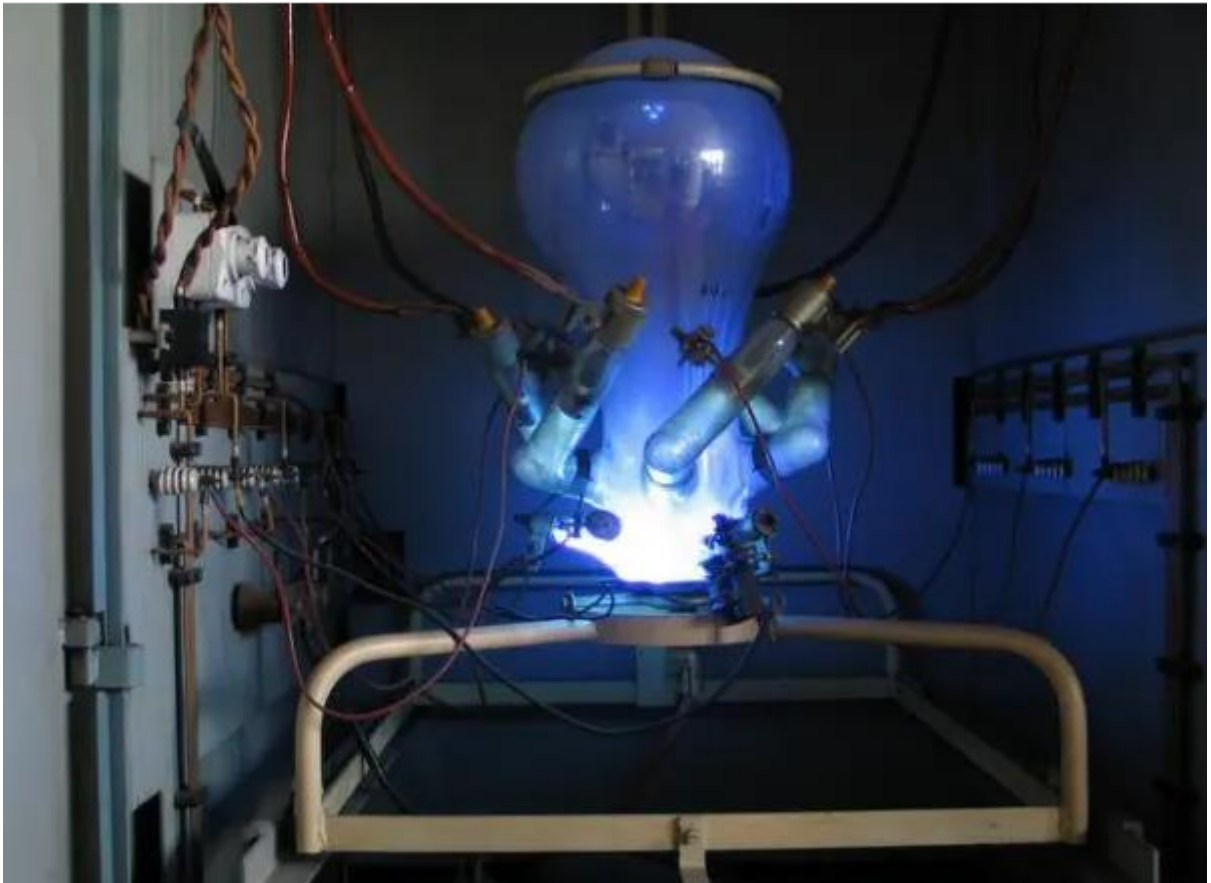


Рисунок 1.4 – Ртутный выпрямитель

В данный момент в промышленности по производству цветных металлов широко используется и оснащается кремниевые выпрямительные агрегаты, КПД которых уже составляет не менее 97%. Данные выпрямительные устройства просты по устройству и надежны в работе.

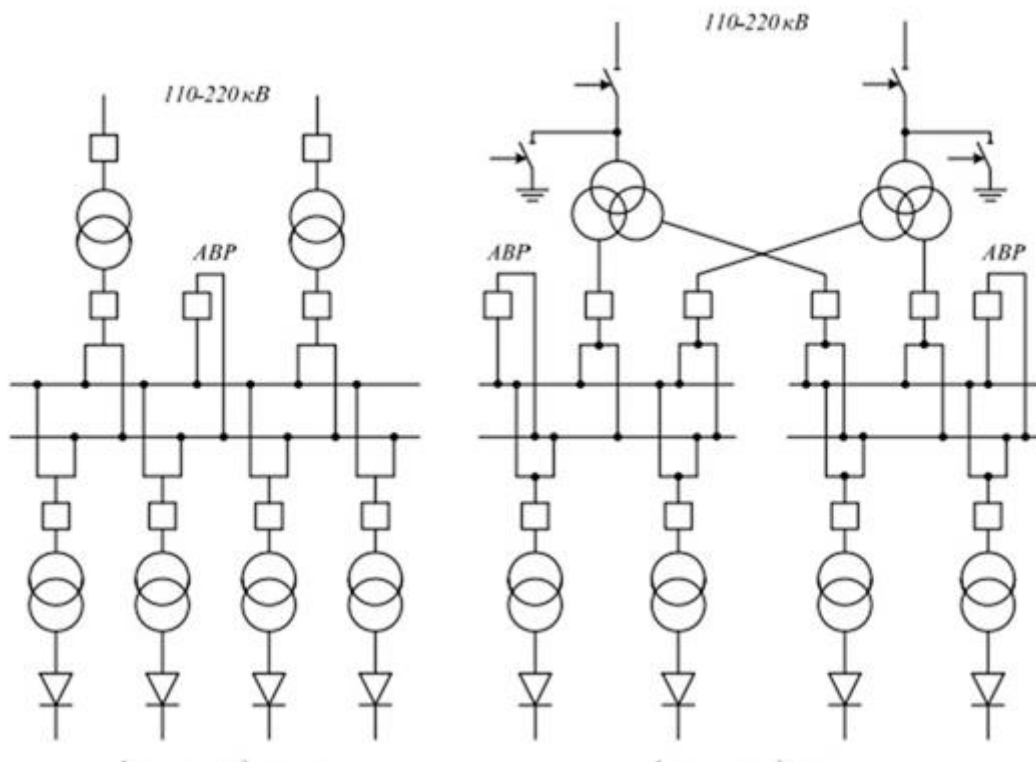


Рисунок 1.5 – Типовая схема электроснабжения преобразовательной подстанции

Силовой трансформатор получает питание по средствам системы шин, через разъединитель и масляный выключатель. Трансформаторы оснащаются переключателями устройствами, которые ступенчато регулируют напряжение под нагрузкой и тем самым изменяют коэффициент трансформации.

Вторичная обмотка трансформатора подключается к отдельному выпрямительному блоку, две обмотки соединяются в треугольник, а еще две в звезду, тем самым создается двенадцати фазный режим выпрямления. Который является самым оптимальным по уровню пульсации выпрямленного напряжения и благоприятно влияет на питающую сеть.

Рабочее напряжение на серии можно представить как сумму обратных ЭДС E_0 на действующих электролизерах и сумму сопротивлений R_c элементов серии, которые нужно умножить на ток серии I_c . Отсюда получаем формулу для расчета рабочего напряжения на серию:

$$U_{p.c} = E_0 + I_c * R_c \quad (1.1)$$

Напряжение на серии постоянно изменяется из-за электросопротивления токоведущих элементов, таких как электролит, анод, ошиновка и пр. Но преобразовательная подстанция должна осуществлять свое прямое назначение, это выдерживать постоянную силу тока. Такое требование к подстанциям осложняется таким обстоятельством как изменение напряжения серии $U_{p.c}$ не пропорциональна изменению силы тока, из-за наличия E_0 .

$$d I / I = d U_{p.c} / (U_{p.c} - E_0), \quad (1.2)$$

Из формулы 1.2 следует, что чем больше E_0 , тем соответственно и больше $d I$ при одном и том же напряжении серии $d U_{p.c}$. Данную зависимость можно построить на графиках.

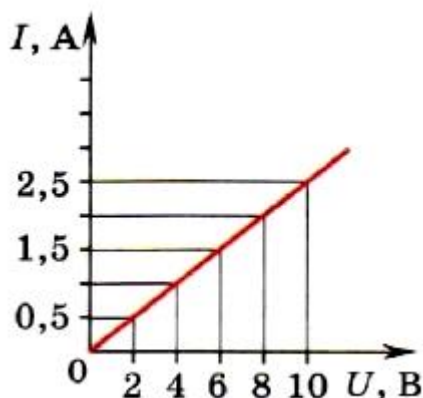


Рисунок 1.6 – Зависимость силы тока от рабочего напряжения

Таким образом, параметры работы КПП напрямую оказывают влияние на электрические параметры серии и состояния технологического режима работы электролизеров.

1.3 Устройство и работа АПД

АПД – это статический преобразователь переменного 3-фазного тока в постоянный.

ТЦНПФ-служит для согласования выпрямленного напряжения с напряжением питающей сети и для ступенчатого регулирования выпрямленного напряжения.

АПД выполнен по 3-фазной мостовой схеме с 12-пульсным режимом выпрямления, который обеспечивается соединением двух частей вентильной обмотки силового трансформатора в «звезду», двух – в «треугольник».

К каждой части вентильной обмотки подключен выпрямительный блок БВДВ, состоящий из двух полумостов ШВДВ-К-и ШВДВ-А.

Подключение цепей контроля ШВДВ к шкафу управления УУ-S производится через клеммные колодки, установленные снаружи на задних стенках ШВДВ в коробках. Датчики температуры воздуха, установленные в ШВДВ, подключаются к измерителю температуры в УУ-S.

Выводы выпрямительных токов по постоянному току подключаются к сборным шинам.

Номинальные параметры выпрямительных блоков БВДВ обеспечиваются без одной параллельной ветви «диод – предохранитель».

УЗП ограничивает внешние перенапряжения до уровня, не опасного для диодов выпрямительных блоков. К каждому выпрямительному мосту подключено одно УЗП.

Питание собственных нагрузок агрегата производится от устройства ввода питания УВП-3, содержащего узел АВР. УВП-3 подключаются к существующей сети, причем к этой сети не должны подключаться электроприемники с резкопеременной нагрузкой, создающие глубокие просадки в сети и искажения напряжения.

Агрегат АПД содержит два идентичных контура автоматического регулирования тока выпрямительных блоков с подчиненными контурами регулирования токов управления выравнивающих дросселей насыщения, встроенных в трансформатор.

ДН служат для выравнивания тока нагрузки блоков, подключенных к обмоткам трансформатора «треугольник» по отношению к току нагрузки блоков, подключенных к обмоткам трансформатора «звезда».

Рабочей обмоткой дросселя насыщения, встроенного в трансформатор, является выводы обмоток НН трансформатора.

Обмотка управления включается в основной канал системы регулирования тока.

Обмотка смещения служит для расширения рабочего диапазона дросселя насыщения.

Дополнительная обмотка шунтирует переменную составляющую напряжения, наводимую в управляющих обмотках из силовой сети.

В качестве датчиков тока используется ТТ, встроенные в преобразовательный трансформатор. К вторичным обмоткам ТТ подключены датчики тока, установленные в УУ-S.

УУ-S содержит следующие функциональные узлы:

- узел питания собственных нужд с входами по постоянному и переменному напряжению;
- узел местного оперативного управления;
- узел МТЗ и защиты от перегрузок;
- узел управления приводами РПН;
- узел блокировок и сигнализации, включая контроль силового трансформатора, выпрямительных блоков, системы охлаждения с учетом резерва;
- интерфейс для связи с верхним уровнем управления.

Основные виды защит, реализуемые в УУ-S:

- **МТЗ** с отключением вводного силового выключателя при превышении измеренным током сетевой или вентильной обмоток силового трансформатора уставок защиты;

Действие МТЗ связано с увеличением силы тока в цепи при возникновении короткого замыкания на данном участке цепи. Принцип действия имеет аналогию по действия токовой отсечки. Когда сила тока на защищаемом участке цепи резко повышается, защита начинает свою работу, но в отличие от токовой отсечки, которая работает без выдержки времени, МТЗ имеет определенную выдержку времени по истечении которой действует на отключение выключателя. Выдержка времени защиты напрямую зависит от удаленности защищаемого участка, так наименьшая выдержка времени будет на наиболее удаленном участке. МТЗ участка близкого к источнику энергии, действует с большей выдержкой по времени, которая отличается на величину, называемой степенью селективности. Если защита не сработала, то через заданное время, которое равно ступени селективности, после начала короткого замыкания на участке цепи, сработает МТЗ более близкого к источнику участка и отключит повреждённый участок и свой. Именно поэтому важно, чтобы ступень селективности была больше, чем время срабатывания защиты, иначе защита смежного участка отключит повреждённый, так и рабочий участок. До того момента, как защита повреждённого участка успеет сработать. Также важно сделать ступень селективности защиты достаточно небольшой, чтобы защита срабатывала до того, как ток короткого замыкания сможет нанести серьёзный ущерб электрическим участкам.

- **интегральная защита выпрямительных блоков от перегрузки** с отключением вводного выключателя, если интеграл по времени между током выпрямительного блока и начальным током включения интегральной защиты от перегрузки превышает заданное значение;

Согласно требованиям международного и национального стандарта устройств защиты от перегрузки, имеют времятоковую характеристику с обратозависимой выдержкой по времени и обеспечивает отключение от токов

перегрузки раньше, чем будет происходить опасное повышение температуры проводников и в том числе их соединений. Рабочая характеристика любого устройства защиты от сверхтока, применяемого для защиты. Имеет следующие условия:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z, \quad (1.3)$$

где I_B – расчетный ток электрической цепи;

I_n – номинальный ток устройства защиты от сверхтока;

I_Z – допустимый длительный ток токоведущих частей;

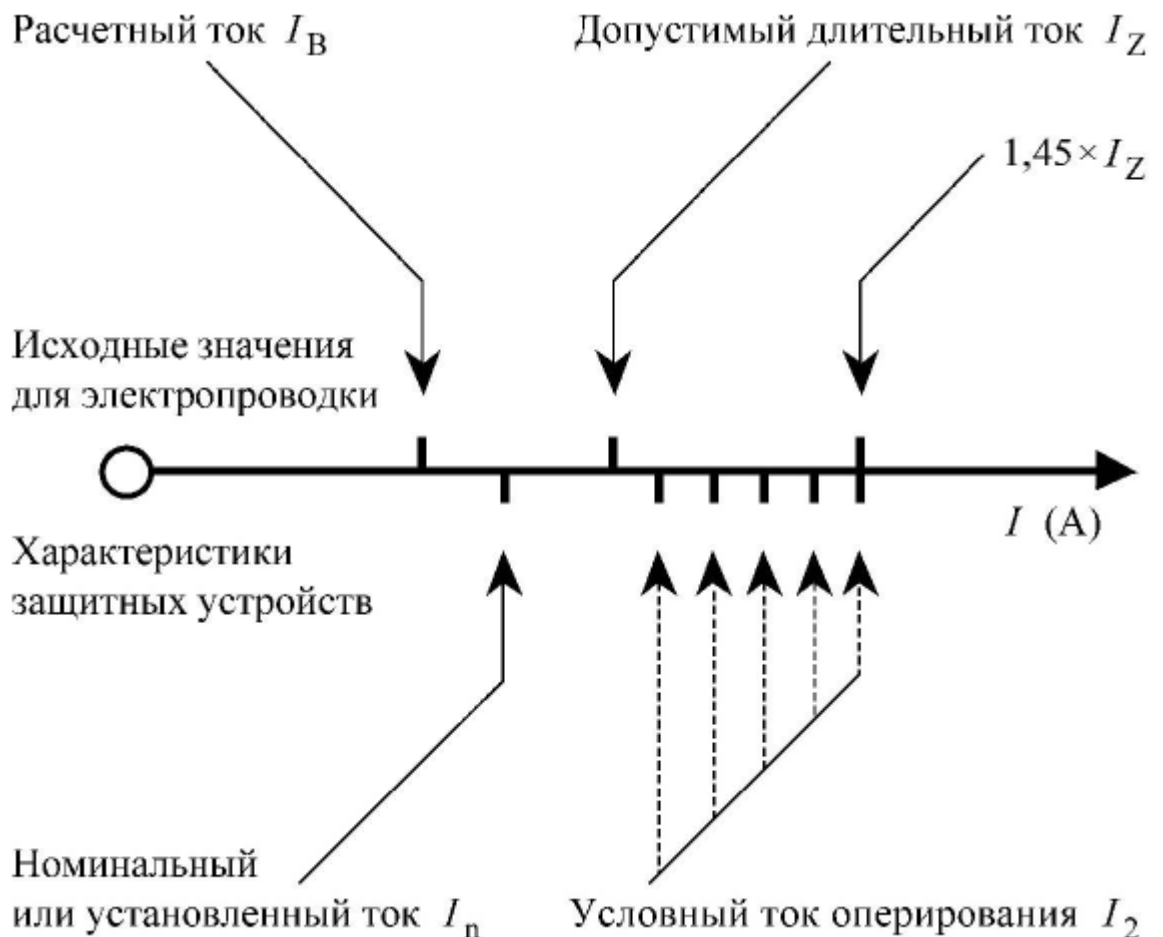


Рисунок 1.7 – Иллюстрация условия защиты от сверхтоков

- отключение вводного силового выключателя при **дискретных аварийных сообщениях** от силового трансформатора, выпрямительных блоков, привода РПН.

На лицевой стороне УУ-S расположены амперметр «Ток сети» для измерения тока СО трансформатора, и амперметры для измерения выпрямленного тока агрегата по блокам. Внутри УУ-S расположены вольтметр «Напряжение СУ» с переключателем для измерения напряжений системы управления и амперметр «Ток» с переключателем для измерения тока смещения и тока управления ДН, встроенных в трансформатор.

Информация о текущих параметрах АПД и состоянии входящих в него устройств выводится на текстовой дисплей. Оперативная информация о состоянии вводного выключателя, работе РПН, а также общая информация о срабатывании сигнализации (авария, предупреждение), дублируется светодиодами и сигнальными лампами.

На лицевой стороне УУ-S размещаются кнопки управления вводным выключателем и приводами РПН.

1.4 Стабилизация силы тока для электролиза

В силовых блоках используются трехфазные мостовые схемы выпрямления, в частности схема Ларионова. В данной схеме используется 6 диодов, которые в свою очередь выпрямляют как положительные, так и отрицательные полуволны для трехфазного напряжения. При этом в любой момент времени ток проводят только два диода, у которых на аноде имеется наибольшее положительное напряжение, а на катоде наибольшее отрицательное.

Данная схема имеет ряд преимуществ, таких как:

- Отсутствие необходимости подмагничивания сердечника трансформатора постоянным током
- Наименьшее обратное напряжение

- Вдвое увеличенная частота пульсаций
- Малый коэффициент пульсаций

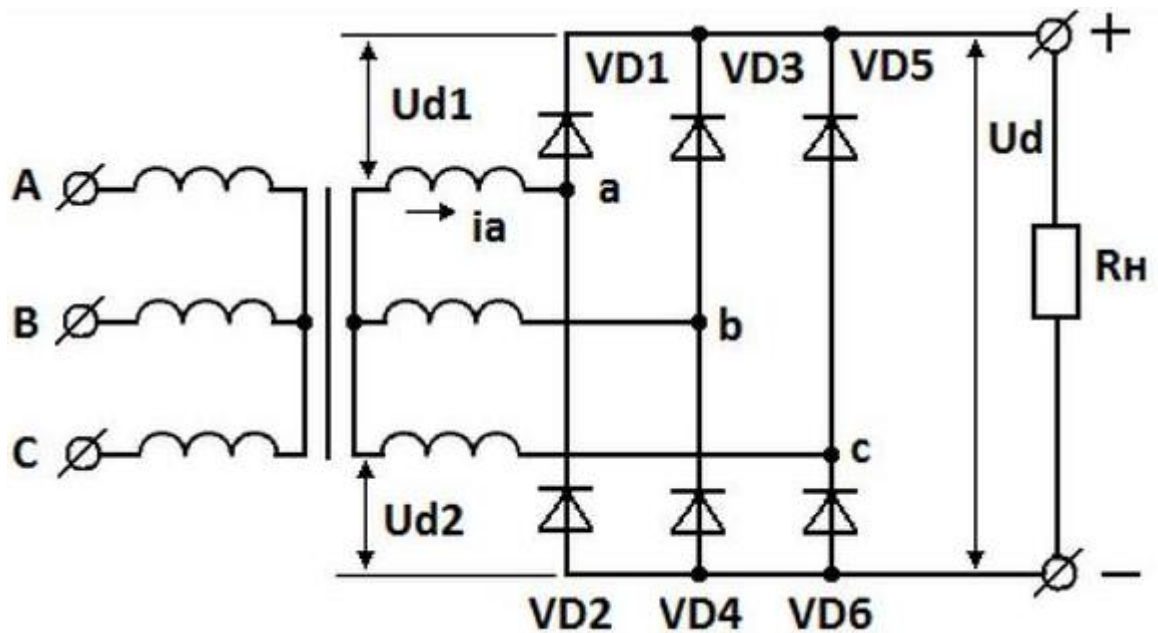


Рисунок 1.8 – Схема Ларионова

Когда полупериод по фазе А будет положительным, то ток протекает через диод VD, не во время всего полупериода, а только в той части, когда U_{2a} будет больше U_{2c} . В течение $1/3$ периода. Ток нагрузки под воздействием линейного напряжения U_{ab} будет протекать по контуру: точка a - VD - R_n - VD₅ - точка b , в момент когда диод t будет открываться и до момента t_2 , а с момента t_2 и до момента t_3 , под воздействием линейного напряжения U_{ac} , ток нагрузки будет протекать по контуру: точка a - VD- R_n - VD₆ - точка c .

В остальную часть полупериода диод VD будет закрыт и к нему в этот момент прикладывается обратное напряжение, которое изменяется по закону текущего изменения линейного напряжения U_{bc} . Максимальное значение обратного напряжения U_0 пропорционально амплитуде линейного напряжения, по фазе линейное напряжение совпадает вначале и с моментом перехода через ноль напряжения U_{2c} , а затем - напряжения U_{2h} .

Коэффициент эффективности для преобразования переменного тока в постоянный или по другому КПД преобразования, это не что иное как отношение мощности постоянного тока к средней мощности нагрузки.

В таблице 1.1 представлены расчеты значения основных выходных показателей, которые используются в типовых схемах выпрямительных устройств, но с учетом синусоидального выходного напряжения и активной нагрузки без использования фильтра.

Таблица 1.1 – Основные выходные показатели

Тип выпрямительного устройства	nVD	$\wedge_{пр}$	$k_{и}$	$k_{ф1}$	$k_{пi}$	КПД
1-фазный, 1-полупериодный	1	0,45	3,14	1,57	1,21	0,405
1-фазный, 2-полупериодный	2	0,90	3,14	1,П	0,482	0,81
1-фазный, мостовой (мост Греца)	4	0,90	1,57	1,П	0,482	0,81
3-фазный, 1-полупериодный	3	1,17	2,09	1,04	0,286	0,97
3-фазный, 2-полупериодный (мост Ларионова)	6	2,34	1,048	1,001	0,005	0,998

Исходя из вышесказанного, данная схема не требует использования выходного фильтра и обладает самыми лучшими показателями по пульсации выпрямленного напряжения и тока, так как выпрямление происходит в обоих полупериодах по каждой фазе.

2 Аналитическая часть

2.1 Описание ведения режима серии электролиза на действующих предприятиях.

Развитие алюминиевой промышленности не стоит на месте, на нее постоянно растет спрос, обуславливается это конечно технологическим прогрессом и развитием промышленности. По этой же причине технологические циклы становления алюминиевой промышленности соотносятся с основными циклами промышленности.

Кремниевые выпрямительные агрегаты являются наиболее совершенными на сегодняшний день из существующих преобразователей тока. За небольшой срок в районе 5-6 лет они стали основными преобразователями на действующих предприятиях и для вновь сооружаемых мощных электролизных установок цветной промышленности.

На предприятии АО «РУСАЛ Саяногорск» используются как раз-таки кремниевые преобразователи, по условиям технологии питаемых установок для них применяются трансформаторы со ступенчатым регулированием под нагрузкой.

Режим серии электролиза ведут Операторы КПП, управляют они коммутационными аппаратами дистанционно с местного щита управления. Так для управления агрегата в работу должны быть включены устройства собственных нужд. В таких условиях при помощи одного ключа управления по сблокированной схеме, осуществляется включение коммутационных аппаратов в заданной последовательности. Следует отметить, что такое управление безусловно необходимо при нахождении оператора удаленно. Существенным элементом в схеме управления выпрямительным агрегатом является трансформатор с переключающим устройством. Переключение ступеней в

пределах каждого диапазона выполняется под нагрузкой, производится данное действие с помощью ключа управления переключения РПН.



Рисунок 2.1 – Шкаф управления КВА

Для переключения на одну ступень достаточно кратковременного замыкания контактов ключа и реле, так как в дальнейшем цепь питания катушек реле сохраняется через контактор. При переключении на одну ступень контактор проворачивается на один оборот и цепь питания катушек реле разрывается. Положение переключающего устройства передается на центральный щит управления с помощью сильсинов. Преобразовательные агрегаты работают параллельно, поэтому ток серии электролиза, равен сумме токов агрегата. При изменении агрегатов, которые находятся в работе, меняют уставки тока отдельных агрегатов, для ведения режима серии электролиза.

В данный момент устройства управления, защиты, сигнализации и измерительных приборов размещены на щитах и в шкафах, устанавливаемых в непосредственной близости от выпрямительных агрегатов.



Рисунок 2.1 – Шкаф сигнализации КВА

Такое размещение значительно увеличивает расширение центрального щитового помещения. Однако только местными щитами управления на обслуживаемой подстанции не обходится, так как при этом значительно усложняется эксплуатация из-за трудностей наблюдения за большим количеством удаленных друг от друга щитов, и обслуживающему персоналу постоянно приходится находиться в помещении выпрямительных подстанций, что конечно же нежелательно. Наиболее бы правильным решением являлось организация центрального щитового помещения с выходами к оборудованию только в случае необходимости.

Сейчас на предприятии АО «РУСАЛ Саяногорск» установлены преобразовательные агрегаты со следующими техническими данными, представленными в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Характеристики действующих выпрямительных агрегатов

Наименование параметра	Технические данные
Номинальное напряжение	20кВ
Номинальное выпрямленное напряжение	450В
Номинальный выпрямленный ток	33000А
КПД	97%

Действующие электролизеры RA-190 неприемлемы для основных целей производства так как имеет высокое энергопотребление, значительное воздействие на окружающую среду, низкая степень автоматизации, выбросы аварийных и вредных для здоровья рабочих операций из-за того, что анодные блоки известных непрерывных анодных систем снабжения имеют боковые контактные ниппели с разъемными анодными штангами. Перенос и повторные присоединения анодных штанг, а также извлечение контактных ниппелей требуют значительных затрат ручного труда. Для таких операций предназначено боковое пространство в электролизере, которое нельзя использовать для других устройств. К тому же токовод в анодных блоках осуществляется через торцовые стороны и относительно высоко расположенные контактные ниппели по длинному токовому пути в анодных блоках. Вследствие этого наблюдается большое падение напряжения в аноде, которое в среднем на 0,5 В выше, чем в прерывных анодных блоках. Для электролизеров с силой тока 190 кА и выше анодные блоки должны быть на 1/3 длиннее, чем применяемые до сих пор, поэтому разница в напряжении в анодных блоках между входным и выходным током будет значительно хуже. Параметры действующих электролизеров RA-190 представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики электролизеров RA-190

Наименование параметров электролизера RA-190	Технические данные
Сечение анода	115000 см ²
Количество анодных блоков	23
Общая длина	4450 мм
Ширина анода	1500 мм
Число пар катодных блоков	16
Среднее напряжение на электролизере	3,1 В
Падение напряжения на подине	0,15 В
Греющие напряжение	1,56 В

Так как компания приняла решения по развитию современного электролитического производства алюминия, а связано это с совершенствованием высокоамперных развивающихся технологий, на которых получении алюминия на электролизерах с обожжёнными анодами происходит при силе тока более 300кА. Действующие преобразовательные агрегаты, проектировались на электролизные серии алюминиевого завода на напряжение 450В, но данное напряжение экономически и технически невозможно применять на высокоамперные электролизеры.

Исходя из этого, целесообразно модернизировать преобразовательные подстанции, автоматизировать рабочее место оператора, с помощью единого интерфейса управления, разработать программу на языке ST для выполнения команд оператора, произвести расчеты новых высокоамперных электролизеров RA-300, данные мероприятия по автоматизации уменьшат затраты на обслуживание устаревшего оборудования, на постоянные отключения в связи с их неисправностью, которые вызывают простой технологического производства алюминия. Сокращение работников, обслуживающих оборудование, так как с модернизацией его, планируется осуществлять управление режима серии электролиза с одного центрального щита управления, с данной задачей имеет возможность справляться один человек. Но для выбора преобразовательного агрегата и его автоматизации управления, необходимы технические параметры высокоамперных электролизеров. Которые будут рассчитаны в практической части.

3 Практическая часть

3.1 Конструктивный расчет высокоамперных электролизеров

Анодный узел. Отечественные электролизеры с обожженными анодами (ОА) на силу тока 295 кА работают с постоянной анодной плотностью 0,71 А/см².

Отсюда следует что площадь сечения анода (S_a , см²) рассчитывается по формуле:

$$S_a = I/i_a = 295000/0,71 = 225352 \text{ см}^2 \quad (3.1)$$

где I – сила тока для проектируемого электролизера, А; i_a – анодная плотность тока, А/см².

Анодное устройство состоит из:

- балки-коллектора;
- секций автоматизированного питания глиноземом.
- обожженных анодов;
- укрытия электролизера;
- механизмов подъема анодов;
- анодной ошиновки;

Несущей конструкцией для анодного устройства, является балка-коллектор, которая представляет собой сварной короб. Нижняя часть состоит из трех частей: крайние это каналы, средняя часть – это сборочный газоходный коллектор. Верхняя часть балки – коллектор. Балка-коллектор имеет опору на металлические упоры, которые устанавливаются на катодном кожухе.

На балке-коллекторе имеются два механизма подъема анодов, отвечающие за включение электроприводов и винтовых домкратов.

При конструктивном расчете высокоамперного электролизера всегда ориентируются на типовые размеры серийно выпускаемых анодов.

Принимаем обожженные аноды конструкции электролизеров с размерами сечения 700 мм × 1450 мм и высотой 600 мм.

Анодные блоки устанавливаются длинной стороной, которая располагается перпендикулярно шахте ванны в два ряда, расстояние между рядами 160 мм, а между анодными блоками – 50 мм.

Количество анодных блоков (n_a , шт) в анодном массиве определяется по формуле:

$$n_a = S_a / (l \cdot b) = 22535200 / (1450 \cdot 700) = 23 \quad (3.2)$$

где l – длина анодного блока, мм; b – ширина анодного блока, мм.

Так как число анодных блоков должно быть четным, поэтому получившееся значение округляем до 24 шт.

Общая длина (L_a , мм) анодного массива определяется по формуле:

$$L_a = (n_a/2) \cdot b + 50 \cdot (n_a/2 - 1) = 24/2 \cdot 700 + 50 \cdot (24/2 - 1) = 8950 \text{ мм} \quad (3.3)$$

Ширина анода (B_a , мм):

$$B_a = 2l + 160 = 2 \cdot 1450 + 160 = 3060 \text{ мм} \quad (3.4)$$

Согласно данным из практики, оптимальное расстояние от продольной стороны анода до:

- боковой футеровки ($b_{ш}$) – 360 мм;
- торцевой футеровки ($l_{ш}$) – 535 мм;

Тогда внутренняя длина шахты ванны будет ($L_{ш}$, мм) составлять:

$$L_{ш} = L_a + 2l_{ш} = 8950 + 2 \cdot 535 = 10020 \text{ мм} \quad (3.5)$$

а ее внутренняя ширина ($B_{ш}$, мм):

$$B_{ш} = B_a + 2b_{ш} = 3060 + 2 \cdot 360 = 3780 \text{ мм} \quad (3.6)$$

Глубина шахты ($H_{ш}$, мм) рассчитывается как сумма высоты металла (h_m , мм), толщины корки электролита со слоем глинозема на ней (h_r , мм) и высоты электролита ($h_э$, мм). Исходя из практики для ванн большой мощности $h_m = 350$ мм; $h_э = 170$ мм; $h_r = 80$ мм.

Отсюда следует:

$$H_{ш} = h_m + h_э + h_r = 350 + 170 + 80 = 600 \quad (3.7)$$

К анодной ошиновке с помощью специальных зажимов прикрепляются обожженные аноды. Каждый анод состоит из предварительно обожженного угольного блока и токопроводящего анододержателя. Анододержатель как правило включает в себя алюминиевую штангу и приваренный к ней стальной кронштейн с четырьмя ниппелями и крепится к нему с помощью чугунной заливки.

Электролизер с обожженными анодами оборудуется укрытием сегментного типа. Данное укрытие состоит из балки-коллектора, съемных сегментных створок-крышек и торцевых щитов. Сегментное укрытие имеет 4 механизма подъема, состоящие из редуктора и электродвигателя. Так же, любая створка укрытия имеет возможность сниматься вручную. При этом балка-коллектор соединена с магистральным газоходом, который как правило располагается за корпусом электролиза.

Для обеспечения эффективности газоотсоса не ниже 97 %, на основании практики работы зарубежных фирм, ТадАЗа, СаАЗа, необходимо обеспечить следующие объемы газоотсоса от укрытия электролизера:

- от закрытого электролизера, м³/ч – 9000;
- при замене анода и при открытой продольной стороне, м³/ч – 13500.

Новые поколения зарубежных электролизеров с обожжёнными анодами, имеющие высокие технико-экономические показатели, характеризуются высоким уровнем автоматизации. Они оборудованы системами автоматического питания глиноземом (АПГ), так же и автоматизация используется для регулирования выходного тока с КПП.

Катодный узел. Расчет основных размеров катодной подины осуществляется исходя из размеров катодных блоков. В условиях экономической реальности, катодные блоки выпускаются отечественной промышленностью, сечением 400 мм × 400 мм и длиной 600 мм, 800 мм, 1200 мм и 1600 мм (нормальные) и сечением 400 мм × 550 мм и длиной 600 мм, 1400 мм, 2000 мм и 2200 мм (укрупненные), выбираем для катодного устройства укрупненные блоки сечением 400 мм × 550 мм и длиной 2200 мм и 1400 мм. Расстояние между блоками принимаем равным 40 мм.

Число пар катодных блоков (n_k , шт) рассчитываем по формуле:

$$n_k = L_{ш} / (550 + 40) = 9645 / (550 + 40) = 16 \text{ шт} \quad (3.8)$$

где 40 – расстояние между блоками, мм.

Расстояние между катодными блоками и боковой футеровкой шахты (C , мм) определяется по формуле:

$$C = (B_{ш} - (B_1 + B_2 + 40)) / 2 = (3780 - (2200 + 1400 + 40)) / 2 = 70 \text{ мм} \quad (3.9)$$

где B_1 и B_2 – длины выбранных блоков, мм.

Ширина шва (d , мм) между катодными блоками и торцевой футеровкой составляет:

$$d = (L_{ш} - (n_k \cdot 550 + (n_k - 1) \cdot 40)) / 2 = (10020 - (16 \cdot 550 + 15 \cdot 40)) / 2 = 310 \text{ мм} \quad (3.10)$$

Схема укладки подовых блоков представлена на рисунке 3.1.

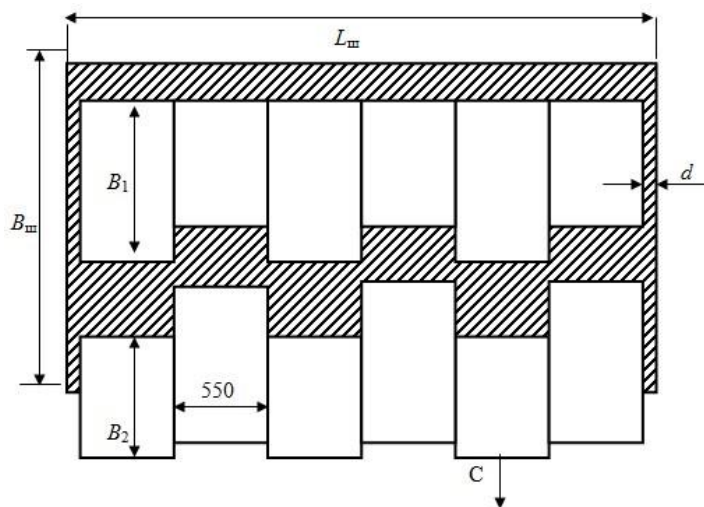


Рисунок 3.1 – Схема укладки подовых блоков

Размеры катодного кожуха определяются в зависимости от толщины слоя футеровочных, теплоизоляционных материалов, геометрических размеров шахты ванны. Для проектируемого электролизера выбираем схему футеровки подины с сухой барьерной смесью, такая схема обеспечивает долговечный срок службы электролизеров.

- асбестовый лист толщиной $\delta_1 = 15$ мм;
- засыпка из шамотной крупки $\delta_2 = 0$ мм, (бортовые плиты клеятся к кожуху);
- 3 слоя диатомитового кирпича $\delta_3 = 3 \times 65 = 195$ мм;
- 2 слоя легковесного шамотного кирпича $\delta_4 = 2 \times 65 = 130$ мм;
- сухая барьерная смесь – 60 мм.

Боковые и торцевые стороны катодного устройства футерованы карбидкремниевыми блоками толщиной 100 мм. Кожух с дном состоит из стального корба толщиной около 10 мм.

Внутренние размеры стального кожуха составляют (мм): длина:

$$L = 10020 + 2 \cdot 100 = 10220 \text{ мм} \quad (3.11)$$

ширина:

$$B = 3780 + 2 \cdot 100 = 3980 \text{ мм} \quad (3.12)$$

высота:

$$H = 600 + 15 + 195 + 130 + 60 + 400 = 1400 \text{ мм} \quad (3.13)$$

где 400 мм – высота подового блока

Кожух с днищем состоит из двух частей: стального короба и контрфорсов, которые крепятся к кожуху с помощью шпилек.

Катодные стержни изготавливаются из стали допустимая плотность тока, которых равна 0,18–0,20 А/мм². Обычно принимают блюмсы сечением 115 мм × 230 мм.

Фактическая плотность тока (А/мм²), приходящаяся на один катодный стержень указанного сечения составляет:

$$I_{\text{ст}} = I / (2 \cdot n_{\text{к}} \cdot 115 \cdot 230) = 160000 / (2 \cdot 16 \cdot 115 \cdot 230) = 0,19 \quad (3.14)$$

3.2 Расчет технологических параметров высокоамперного электролизера.

Самым основным показателем технологической работы высокоамперных электролизеров служит катодный выход по току, который в свою очередь определяет степень полезного использования тока.

Катодный выход по току на электролизерах с обожжёнными анодами на 295 кА составляет 91–92 %. С учетом стабилизации концентрации глинозема в электролите, обеспечиваемой работой АПГ точечного типа, стабилизации силы тока, которая обеспечивается кремниево-преобразовательной подстанцией (КПП), автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) в которой встроены микропроцессорные устройства, исходя из вышесказанного следует принять выход по току равным 92 %.

Суточная производительность проектируемого электролизера (P , кг) составит:

$$P = I \cdot g_{\text{Al}} \cdot \eta_{\text{T}} \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 295000 \cdot 0,3356 \cdot 0,92 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 1186 \quad (3.15)$$

где $g_{\text{Al}} = 0,3356$ – электрохимический эквивалент алюминия, г/А·ч;

η_{T} – выход по току.

Среднее напряжение на электролизере (U_{cp} , В), составляет 4,211 В. Тогда расход электроэнергии (W , кВт·ч) при постоянном токе на 1 тонну алюминия-сырца составит:

$$W = U_{\text{cp}} / (g_{\text{Al}} \cdot \eta_{\text{T}}) \cdot 10^3 = 4,211 / (0,3356 \cdot 0,92) \cdot 10^3 = 13650 \quad (3.16)$$

В таблице 3.1 приведены конструктивные и технологические параметры электролизера на силу тока 295 кА.

Таблица 3.1 – Основные технологические и конструкционные параметры электролизера на силу тока 295кА

№ п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	Проект
1	Сила тока	А	295000
2	Выход по току	%	92
3	Суточная производительность электролизера	кг	1184
4	Среднее напряжение	В	4,211
5	Тип катодного кожуха		Контрфорсный
6	Размеры анодного блока Ш□Д□В:	мм	700*1450*600
7	Анодная плотность тока	А/см ²	0,71
8	Количество анодных блоков	шт	24
9	Размер шахты ванны Ш□Д□В:	мм	3980*10220*1400
10	Расстояние от анода до: <ul style="list-style-type: none"> • продольной стенки шахты • торцевой стенки шахты 	мм мм	360 575
11	Количество подовых секций (блумсов)	шт шт	16 16
12	Сечение блюмсов	мм	115*230
13	Плотность тока в блюмсах	А/мм ²	0,19
14	Тип АПГ		Точечный
15	Срок службы электролизера	год	4,5
16	Частота анодных эффектов	шт	1
17	Длительность анодного эффекта	мин	2
18	Объемы газоотсоса: от закрытого электролизера; при замене анода и при открытой продольной стороне	м ³ /час м ³ /час	9000 13500

3.3 Электрический расчет высокоамперного электролизера

Электрический расчет алюминиевого электролизера заключается в расчете следующих параметров греющего ($U_{гр}$), среднего ($U_{ср}$) и рабочего ($U_{раб}$) напряжений.

Исходные данные для расчета:

- сила тока, А – 295000;
- выход по току, % – 92;
- размер анодного блока, мм: 1450×700 мм.
- количество блоков в анодном массиве, шт – 24;
- анодная плотность тока, А/см², – 0,71;
- размер шахты в плане, мм – 3780×9645;
- глубина шахты, мм – 600;
- расстояние от анода до:
- количество подовых секций, шт – 16;
- количество катодных стержней, шт – 32;
- сечение катодных стержней, мм – 115×230;
- межполюсное расстояние, см – 5,2 см;
- количество анодных эффектов, шт/сут – 1;
- длительность анодных эффектов, мин – 2.

На основании практических данных работы электролизеров лучшие показатели с наименьшим расходом электроэнергии достигаются при работе на межполюсном расстоянии равном 5,0–5,5 см. Поэтому при расчетах принимается среднее расстояние $l = 5,2$ см.

Расчет греющего напряжения:

Расчет $U_{гр}$ (В) производится по формуле:

$$U_{\text{гр}} = E_p + \Delta U_{\text{а.у.}} + \Delta U_{\text{п}} + \Delta U_{\text{эл}} + \Delta U_{\text{аэ}}, \quad (3.17)$$

где E_p – напряжение разложения глинозема плюс катодная и анодная поляризация, В;

$\Delta U_{\text{а.у.}}$ – падение напряжения в анодном узле, В;

$\Delta U_{\text{п}}$ – падение напряжения в подине, В;

$\Delta U_{\text{эл}}$ – падение напряжения в электролите, В;

$\Delta U_{\text{аэ}}$ – падение напряжения от анодных эффектов, В.

Напряжение разложения для температуры 960 °С плюс ЭДС поляризации E_p (В) определяется по эмпирической формуле:

$$E_p = A + 0,37 \cdot i_a, \quad (3.18)$$

где i_a – анодная плотность тока, А/см²; А – коэффициент ($A = 1,13$).

У электролизеров с ОА эта величина выше на 0,15–0,20 В.

Таким образом, $E_p = (1,13 + 0,37 \cdot 0,71) + 0,15 = 1,54$ В.

Падение напряжения в анодном узле $\Delta U_{\text{а.у.}}$ складывается из: потерь напряжения в угольной части анода ($\Delta U_{\text{уг}}$); в контакте «анод-ниппель» ($\Delta U_{\text{а-н}}$); потерь напряжения в ниппеле ($\Delta U_{\text{н}}$); потерь напряжения на участке «ниппелькронштейн-штанга-анодная шина» ($\Delta U_{\text{н-ш}}$).

1) $\Delta U_{\text{уг}}$ (В) рассчитывается по формуле:

$$\Delta U_{\text{уг}} = \varphi \cdot \rho_a \cdot l_{\text{ср}} \cdot I / S_a, \quad (3.19)$$

где φ – форм-фактор электрического поля анода;

ρ_a – удельное электросопротивление угольного анода, Ом.см;

$l_{\text{ср}}$ – среднее расстояние от дна ниппельного гнезда до подошвы анода, см;

S_a – общая площадь анодов, см².

Электросопротивление угольного анода зависит от температуры $\rho_a =$

$= 0,007 \cdot (1 - 0,00025 \cdot T)$; при $T_{\text{анода}} = 640 \text{ }^\circ\text{C}$ оно составляет $\rho_a =$
 $= 0,007(1 - 0,00025 \cdot 640) = 58,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Форм-фактор определяется по выражениям

$$\phi = 1 + 0,142 \cdot K_2,$$

$$K_2 = \frac{a \cdot x \cdot b}{F_{\text{НГ}} \cdot (l_{\text{ср}} + \Delta l)}, \quad (3.20)$$

где $a \cdot x \cdot b$ – площадь подошвы анодного блока, см^2 ;

$F_{\text{НГ}}$ – площадь полной поверхности ниппельного гнезда, см^2 ; $F_{\text{бок.н.г}}$ – площадь боковой поверхности ниппельного гнезда, см^2 ; $h_{\text{НГ}}$ – глубина ниппельного гнезда, см^2 .

$l_{\text{ср}} = (50 + 2)/2 = 26 \text{ см}$ (50 см – расстояние от дна ниппельного гнезда до подошвы нового анода, 2 см – до подошвы огарка);

$h_{\text{НГ}} = 10 \text{ см}$ (диаметр ниппельного гнезда равен 160 мм).

$$\phi = 1 + 0,142 \cdot 0,488 = 1,07$$

Следовательно, $\Delta U_{\text{уг}} = 1,07 \cdot 58,8 \cdot 10^{-4} \cdot 26 \cdot 295000 / (145 \cdot 70 \cdot 24) = 0,107 \text{ В}$.

$\Delta U_{\text{а-н}}$ (В) определяется по формуле:

$$\Delta U_{\text{а-н}} = I \cdot \rho_1 / n_k \cdot F_{\text{НГ}} \cdot n_a, \quad (3.21)$$

где ρ – удельное электросопротивление контакта (принимается равным 0,05 Ом·см);

n_k – количество ниппелей, шт ($n_k = 4 \cdot n_a$);

n_a – количество анодных блоков, шт ($n_a = 24$);

$$F_{\text{НГ}} = 3,14 \cdot 16 \cdot 10 + 3,14 \cdot 16^2 / 4 = 703,36 \text{ см}^2.$$

Тогда: $\Delta U_{\text{а-н}} = 0,05 \cdot 295000 / 703,36 \cdot 4 \cdot 24 = 0,118 \text{ В}$.

$\Delta U_{\text{н}}$ (В) определяется следующим образом:

$$\Delta U_{\text{н}} = I \cdot \rho_2 \cdot l / n_k \cdot S, \quad (3.22)$$

где ρ_2 – удельное электросопротивление ниппеля (принимается по практическим данным равным $68 \cdot 10^{-6}$ Ом·см);

l – длина запеченной части ниппеля, см;

S – сечение ниппеля, см² ;

n_k – количество ниппелей, шт ($n_k = 4 \cdot n_a$).

$$S = 16^2 \cdot 3,14 / 4 = 201,06 \text{ см}^2.$$

$$\text{Тогда } \Delta U_n = 295000 \cdot 68 \cdot 10^{-6} \cdot 10 / 24 \cdot 4 \cdot 201,06 = 0,00564 \text{ В.}$$

$\Delta U_{n-ш}$ принимается по практическим данным равным 0,05 В.

Тогда на проектном электролизере:

$$\Delta U_{a,y} = 0,107 + 0,118 + 0,00564 + 0,05 = 0,281 \text{ В.} \quad (3.23)$$

Падение напряжения на подине $\Delta U_{п}$ (В) рассчитывается по данной формуле:

$$\begin{aligned} \Delta U_n &= \left(0,96 + \frac{2,14 \cdot b_{ш} + 140}{B_{ш}} \right) * \frac{I}{L} * 10^{-3} * 1,098 = \\ &= \left(0,96 + \frac{2,14 \cdot 36 + 140}{378} \right) * \frac{160000}{8950} * 10^{-3} * 1,098 = 0,301 \text{ В} \end{aligned} \quad (3.24)$$

где 1,098 – коэффициент, учитывающий увеличение напряжения по сравнению с практическими данными

$B_{ш}$ – внутренняя ширина шахты, см;

L_a – общая длина анодного массива, см;

$b_{ш}$ – расстояние от анода до боковой футеровки, см.

Падение напряжения в электролите $\Delta U_{эл}$ (В) определяется по уравнению Форсблома-Машовца:

$$\Delta U_{эл} = I \cdot \rho_{эл} \cdot l / [S_a + P_a (1 + 2,5)] = 160000 \cdot 0,56 \cdot 5,2 / [306 \cdot 857 + 2 \cdot (306 + 895) \cdot (5,2 + 2,5)] = 1,59 \quad (3.25)$$

где $\rho_{эл}$ – удельное электросопротивление электролита, Ом·см;

P_a – периметр анода, см;

S_a – площадь анодного массива см²;

l – межполюсное расстояние, см.

Промышленные электролиты имеют $\rho_{эл} = 0,40–0,63$ Ом·см, принимаем $\rho_{эл} = 0,56$ Ом·см.

Составляющая греющего напряжения от анодных эффектов $\Delta U_{аэ}$ (В) определяется по формуле:

$$\Delta U_{аэ} = (U_{аэ} - U_p) \cdot t_{аэ} \cdot 24 , \quad (3.26)$$

где $(U_{аэ} - U_p)$ – превышение напряжения на электролизере во время анодного эффекта, В

Итого: $U_{гр} = 1,54 + 0,281 + 0,301 + 1,594 + 0,0035 = 3,754$ В.

3.4 Расчет среднего напряжения

Определение $U_{ср}$ (В) ведется по следующей формуле:

$$U_{ср} = U_{гр} + \Delta U_{ош} , \quad (3.27)$$

где $\Delta U_{ош}$ – падение напряжения в ошиновке, В; $U_{гр}$ – греющее напряжение, В.

Подвод тока будет осуществляться через 4 стояка, которые расположены на входной стороне электролизера. Все эти 4 стояка расположены за катодным кожухом и выходят из шинного проема. Все стояки как правило равномерно нагружены, то есть на каждый стояк приходится 25 % от общего тока.

Постоянный ток от стояков подводится к анодной шине, а к задней шине – токоведущими перемычками, расположенными у мест подключения стояков.

Половина постоянного тока от катодных стержней направляется под днищем корпуса к двум центральным стоякам следующей ванны. При этом с входной стороны на каждую из двух ветвей ошиновки привариваются 2 спуска и 6 спусков с выходной стороны.

Итого: 32 спуска на 16 пар катодных блоков.

При расчете количества шин и спусков необходимо ориентироваться на следующие размеры, мм:

- сечение алюминиевых шин – 430×60 мм (650×140 мм – для мощных электролизеров);
- сечение катодных шин для спусков – 200×1,5 мм;
- сечение медных лент для спусков – 100×1 мм;
- сечение катодных стальных штырей – 230×115 мм.

Сечение алюминиевых шин рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{ш}} = I/d_{\text{эк}} = 160000/0,4 = 4000000 \text{ мм}^2, \quad (3.28)$$

где $d_{\text{эк}}$ – экономически эффективная плотность тока для алюминиевых шин, А/мм².

Затем определяем число шин в шинопроводе:

$$n_{\text{ш}} = S_{\text{ш}}/S_{\text{ш1}} = 4000000/(430 \cdot 60) = 15,5 \approx 16 \text{ шт} \quad (3.29)$$

где $S_{\text{ш}}$ – сечение алюминиевых шин, мм²;

$S_{\text{ш1}}$ – размер сечения алюминиевых шин, мм·мм.

Находим сечение одного пакета из алюминиевых лент (спусков) по выражению:

$$S_{\text{л}} = I/(d_{\text{эк}} \cdot n_{\text{б}}) = 160000/(0,7 \cdot 32) = 7142,857 \text{ мм}^2 \quad (3.30)$$

где $d_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока для алюминиевых спусков, А/мм²; n_6 – число катодных блоков.

Сечение катодных спусков рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{п}} = I/d_{\text{эк}} = 160000/0,7 = 228571,43 \text{ мм}^2 \quad (3.31)$$

где $d_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока для алюминиевых спусков, А/мм².

3.5 Падение напряжения в катодной ошиновке

Ток по катодной ошиновке протекает по нескольким ветвям. Необходимо рассчитать падение напряжения на каждом участке.

Удельное электросопротивление алюминиевых шин при 150 °С:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ксп}} &= 2,8 \cdot (1 + 0,0038[t_2 - t]) \cdot 10^{-6} = 2,8 \cdot (1 + 0,0038[150 - 20]) \cdot 10^{-6} = \\ &= 4,18 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Определяем электросопротивление в каждой ветви.

В торцевой ветви 1:

$$R_{\text{ТВ1}} = \rho_{\text{т}} \cdot l_{\text{ТВ1}}/S_{\text{ТВ1}} = 4,183 \cdot 10^{-6} \cdot 1000/43 \cdot 6 \cdot 4 = 4,459 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (3.33)$$

В центральной ветви 1:

$$R_{\text{ЦВ1}} = \rho_{\text{т}} \cdot l_{\text{ЦВ1}}/S_{\text{ЦВ1}} = 4,183 \cdot 10^{-6} \cdot 700/43 \cdot 6 \cdot 4 = 2,837 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (3.34)$$

В торцевой ветви 2:

$$R_{\text{ТВ2}} = \rho_{\text{т}} \cdot l_{\text{ТВ2}}/S_{\text{ТВ2}} = 4,183 \cdot 10^{-6} \cdot 1000/43 \cdot 6 \cdot 4 = 4,459 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (3.35)$$

В центральной ветви 2:

$$R_{цв2} = \rho_t \cdot l_{цв2} / S_{цв2} = 4,183 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 / 43 \cdot 6 \cdot 4 = 4,459 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (3.36)$$

где l – длина ветви ошиновки, см;

S – площадь ветви ошиновки (сечение алюминиевых шин, умноженное на количество этих шин в ветви ошиновки), см².

Общее сопротивление ошиновки $R_{общ}$ (Ом):

$$R_{общ} = 1 / (1 / R_{ТВ1} + 1 / R_{цв1} + 1 / R_{ТВ2} + 1 / R_{цв2}) = 8,67 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \quad (3.37)$$

Тогда, общее падение напряжения в катодной ошиновке $\Delta U_{КО}$ (В) без учета потерь в контактах:

$$\Delta U_{КО} = I \cdot R_{общ} = 160000 \cdot 8,67 \cdot 10^{-7} = 0,139 \text{ В} \quad (3.38)$$

Общее падение напряжения в катодной ошиновке с учетом падения напряжения в контактах:

$$\Delta U_{КО} = 0,139 + 0,006 + 0,005 + 0,003 = 0,153 \text{ В} \quad (3.39)$$

где 0,006 – падение напряжения в контакте: катодный стержень-катодный спуск, В;

0,005 – падение напряжения в контакте: катодный спуск-катодная шина

0,003 – падение напряжения в контакте: катодная шина-катодный стояк

3.6 Падение напряжения в общекорпусной ошиновке

Падение напряжения в общекорпусной ошиновке $\Delta U_{корп}$ составляет:

$$\Delta U_{\text{корп}} = 3,33 \cdot 10^{-6} \cdot 160000 \cdot 9050 / (46 \cdot 6 \cdot 16 \cdot 97) = 0,012 \quad (3.40)$$

где 46×6 – сечение шин, см^2 ;

16 – количество шин в пакете;

9050 – длина общекорпусной ошиновки, см;

97 – количество электролизеров в корпусе.

Падение напряжения в катодной, анодной ошиновке с учетом общекорпусной ошиновки для одного электролизера $\Delta U_{\text{ош}}$ (В):

$$\Delta U_{\text{ош}} = 0,150 + 0,02 + 0,0188 + 0,016 + 0,153 + 0,012 = 0,369 \text{ В.} \quad (3.41)$$

Итого: Среднее напряжение составит: $U_{\text{ср}} = 3,753 + 0,369 = 4,123 \text{ В.}$

Рабочее напряжение равно: $U_{\text{раб}} = 4,123 - 0,035 = 4,088 \text{ В.}$

Таблица 3.2 – Технические параметры электролизёра RA-300

№ п/п	Наименование	Обозначение	Значение, В	%
1	Напряжение разложения Al_2O_3	E_p	1,54	37,42
2	Падение напряжения в анодном узле	$U_{\text{а.у.}}$	0,28	6,83
3	Падение напряжения в подине	ΔU_n	0,3	7,3
4	Падение напряжения в электролите	$\Delta U_{\text{эл}}$	1,59	38,65
5	Падение напряжения от анодных эффектов	$\Delta U_{\text{аз}}$	0,03	0,84
6	Греющее напряжение	$U_{\text{гр}}$	3,75	91,05
7	Падение напряжения в ошиновке (с учетом общесерийной ошиновки)	$\Delta U_{\text{ош}}$	0,37	8,95
8	Рабочее напряжение	$U_{\text{раб}}$	4,09	99,16
9	Среднее напряжение	$U_{\text{ср}}$	4,12	100

Согласно расчетам, технических и электрических параметров, наиболее подходящим по расчетным параметрам является высокоамперный электролизер РА-300 с техническими данными, представленными в таблице 3.2. По расчетным параметрам наиболее подходящий по техническому и экономическому обоснованию является преобразовательный агрегат типа АПД-63000/950. Технические данные которого приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические данные АПД – 63000/950

Номинальное напряжение 3-фазной питающей сети, кВ	20
Выпрямленное напряжение, В	950
Кратность допустимых перегрузок по току в течение 20 секунд	1,5
Эквивалентная фазность режима выпрямления	12
Коэффициент сдвига фаз в диодном режиме	0,96
К. П. Д., %	98,5

Для управления агрегата АПД был разработан интерфейс для АРМ оператора, который обеспечивает режим серии электролиза. И также разработана программа на языке ST, которая обеспечивает выполнения команд оператора по управлению серией электролиза. Данный интерфейс, и сама программа преследуют цели интеграции систем локальных систем управления агрегатами в единое цифровое пространство, обеспечивая при этом централизованный сбор и архивирование данных, групповую диагностику и функции управления агрегатами в общесерийных режимах.

На рисунке 3.3 расположена часть интерфейса, на ней можно просматривать основные параметры серии, такие как напряжение, силу тока, мощность.



Рисунок 3.3 – Верхняя часть интерфейса

С помощью этих параметров оператор может отслеживать заданные параметры для серии электролиза и вести необходимый режим.

В центральной правой части верхней области представленной на рисунке 3.4 расположены элементы управления РПН агрегатов в общесерийном режиме.

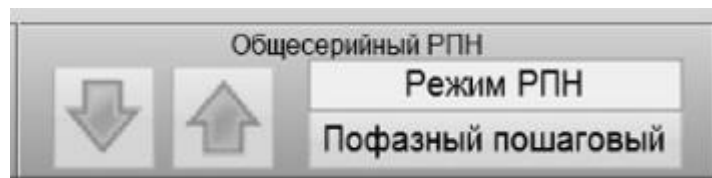




Рисунок 3.4 – Элементы управления общесерийным РПН.

Кнопки  и  формируют соответствующие команды на переключение вниз и вверх РПН агрегатов, которые выбраны для общесерийного управления. Вариативность команд управления агрегата представлена на рисунке 3.5.

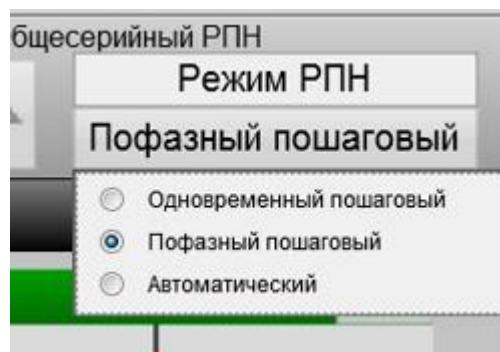


Рисунок 3.5 – Избиратель режима управления общесерийным РПН.

Всего существуют 3 режима управления РПН:

- одновременный пошаговый – режим при котором все выбранные для общесерийного режима агрегаты вместе переключают вверх или вниз всеми РПН всех фаз одновременно;
- пофазный пошаговый - режим при котором все выбранные для общесерийного режима агрегаты переключают вверх или вниз РПН вместе пофазно по алгоритма «А-В-С» вверх и «С-В-А» вниз.
- автоматический – режим при котором система выбирает среди выбранных для общесерийного режима агрегатов агрегат с наибольшим и наименьшим током и в пофазном пошаговом режиме переключает РПН вниз для агрегата с наибольшим током или вверх для агрегата с наименьшим током.

С помощью разных режимов оператор имеет возможность регулировать ток каждого агрегата по отдельности, так и всеми агрегатами вместе.

Выбранные агрегаты управляются по общесерийному алгоритму, а невыбранные по индивидуальному, который можно установить локально.

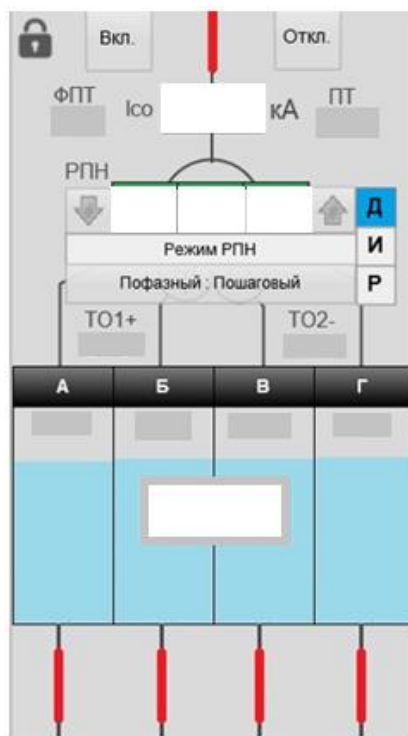


Рисунок 3.6 – Шаблон отображения основных параметров агрегата.

В верхней части шаблона приведенного на рисунке 3.7 расположена индикация предаварийной и аварийной сигнализации. Это необходимо для оперативного контроля за параметрами оборудования и незамедлительного действия обслуживающего персонала при аварийных ситуациях.

На рисунке 3.9 расположены элементы управления и индикации состояния высоковольтного выключателя. В отключенном состоянии индикатор в виде горизонтальной линии окрашен зеленым цветом, а во включенном в виде вертикальной линии, окрашенной красным цветом. Так с АРМ оператор может управлять высоковольтным выключателем дистанционно с главного щита управления.

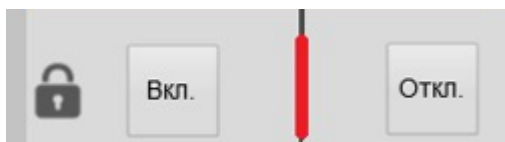


Рисунок 3.7 – Элементы управления и индикации состояния высоковольтного выключателя.

Индикатор в виде черного замка рядом с ВВ информирует о наличии блокировки реле включения ВВ. По обе стороны от индикатора ВВ расположены кнопки управления выключателем. При нажатии кнопки включения или отключения на экране появляется всплывающее окно для подтверждения действия оператора. Данное действие необходимо для предупреждения ошибочных действий персонала.

Для работы данной команды создается переменная «btnON» которая отвечает за отслеживание состояния кнопки «Включить», переменная «btnOff» которая отвечает за отслеживание состояния кнопки «Отключить». Для агрегата кнопка «Включить» будет доступна, только тогда, когда все 4 разъединителя постоянного тока включены. А отключаться агрегат будет по нажатию кнопки «Отключить». Алгоритм программы представлен на рисунке 3.10.

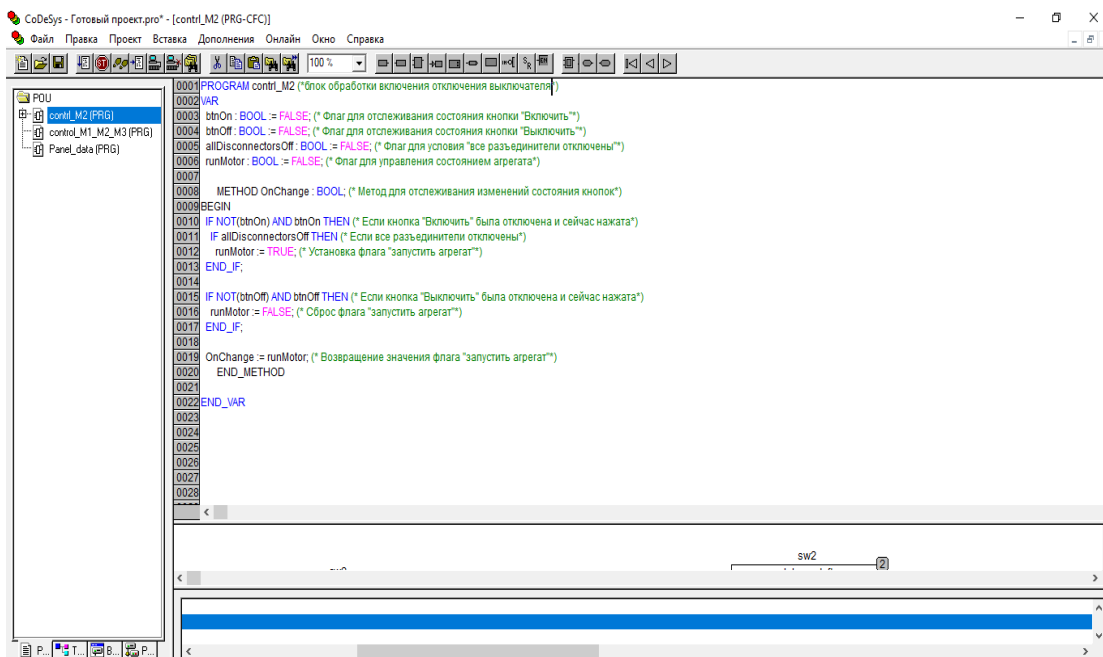


Рисунок 3.8 – Код программы для отключения и включения агрегата

На рисунке 3.9 приведены индикаторы измерений тока сетевой обмотки и температур масла фазоповоротного и преобразовательного трансформаторов. Данные параметры фиксируются оператором на АРМ, так как раньше оператор должна была согласно инструкции, делать обход каждого агрегата по отдельности.

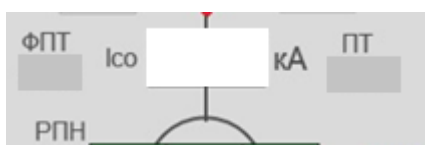


Рисунок 3.9 – Индикаторы тока сетевой обмотки и температур масла трансформаторов.

На рисунке 3.10 расположены индикаторы и элементы управления РПН агрегата. В центральной части отображены числовые индикаторы текущих ступеней РПН по фазам А, В и С, над которыми изображены дискретные индикаторы состояния реле переключения РПН.

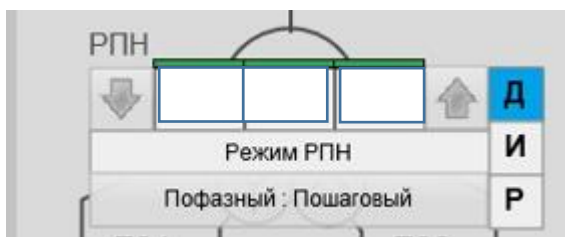


Рисунок 3.10 – Индикаторы и элементы управления РПН.

Справа и слева от числовых указателей ступеней РПН расположены кнопки повышения и понижения ступеней РПН в индивидуальном режиме. При нажатии этих кнопок команда уходит на агрегат без подтверждения и РПН переключается согласно выбранного режима.

```

CoDeSys - Готовый проект.pro* - [control_M1_M2_M3 (PRG-CFC)]
Файл  Правка  Проект  Вставка  Дополнения  Онлайн  Окно  Справка
[Icons] 75% [Icons]
0001 PROGRAM control_M1_M2_M3 (* управления приводами*)
0002 VAR
0003 Phase1: INT := 0; (* Число ступеней для фазы 1*)
0004 Phase2: INT := 0; (* Число ступеней для фазы 2*)
0005 Phase3: INT := 0; (* Число ступеней для фазы 3*)
0006 Current: INT := 0; (* Сила тока*)
0007
0008 IncreaseButton: BOOL := FALSE; (* Кнопка "Повысить силу тока")
0009 DecreaseButton: BOOL := FALSE; (* Кнопка "Понизить силу тока")
0010 END_VAR
0011
0012 METHOD ChangePhase(INOUT phase: INT; IN increase: BOOL) : INT
0013 VAR
0014 minPhase: INT := 100; (* Минимальное число ступеней*)
0015 maxPhase: INT := 0; (* Максимальное число ступеней*)
0016 minPhaseIndex: INT := 0; (* Индекс фазы с минимальным числом ступеней*)
0017 maxPhaseIndex: INT := 0; (* Индекс фазы с максимальным числом ступеней*)
0018 BEGIN
0019 (* Находим фазу с минимальным числом ступеней*)
0020 FOR i := 1 TO 3 DO
0021 IF phase[i] < minPhase THEN
0022 minPhase := phase[i];
0023 minPhaseIndex := i;
0024 END_IF
0025 END_FOR
0026
0027 (* Находим фазу с максимальным числом ступеней*)
0028 FOR i := 1 TO 3 DO
0029 IF phase[i] > maxPhase THEN
0030 maxPhase := phase[i];
0031 maxPhaseIndex := i;
0032 END_IF
0033 END_FOR
0034
0035 (* Повышаем или понижаем число ступеней в выбранной фазе*)
0036 IF increase THEN
0037 phase[minPhaseIndex] := phase[minPhaseIndex] + 1;
0038 RETURN minPhaseIndex; (* Возвращаем индекс фазы для обновления силы тока*)
0039 ELSE
0040 phase[maxPhaseIndex] := phase[maxPhaseIndex] - 1;
0041 RETURN maxPhaseIndex; (* Возвращаем индекс фазы для обновления силы тока*)
0042 END_IF
0043 END_METHOD
0044
0045 METHOD UpdateCurrent(IN phaseIndex: INT; IN increase: BOOL; OUT current: INT)
0046 VAR
0047 delta: INT := 4; (* Изменение силы тока на 4 Ампера*)
0048 BEGIN
0049 IF increase THEN
0050 current := current + delta;
0051 ELSE
0052 current := current - delta;
0053 END_IF
0054 END_METHOD
0055
0056 METHOD MainCycle
0057 VAR
0058 phaseIndex: INT := 0;
0059 BEGIN
0060 (* Определение действия при нажатии кнопки "Повысить силу тока")
0061 IF IncreaseButton THEN
0062 phaseIndex := ChangePhase([Phase1, Phase2, Phase3], TRUE);
0063 UpdateCurrent(phaseIndex, TRUE, Current);
0064 END_IF
0065
0066 (* Определение действия при нажатии кнопки "Понизить силу тока")
0067 IF DecreaseButton THEN
0068 phaseIndex := ChangePhase([Phase1, Phase2, Phase3], FALSE);
0069 UpdateCurrent(phaseIndex, FALSE, Current);
0070 END_IF
0071 END_METHOD

```

Рисунок 3.11 – Код программы для повышения и понижения силы тока агрегата

В данном коде описывается логика повышения и понижения силы тока для трех фаз. Фаза с минимальным числом ступеней выбирается для повышения силы тока при нажатии кнопки «Повысить силу тока», а фаза с максимальным числом ступеней выбирается для понижения силы тока при нажатии «Понизить силу тока».

Всего возможно 5 режимов работы РПН:

- индивидуальный пофазный пошаговый – в этом режиме ступени РПН переключаются индивидуально пофазно по алгоритму «А-В-С» вверх и «С-В-А» вниз;

- индивидуальный пофазный непрерывный – в этом режиме при подаче и удерживании команды на повышение или понижение ступени происходит непрерывное переключение РПН пофазно по алгоритму «А-В-С» вверх и «С-В-А» вниз;

- индивидуальный одновременный пошаговый – в этом режиме при подаче команды происходит одновременное переключение РПН на всех фазах трансформатора;

- индивидуальный одновременный непрерывный (только при местном управлении с ШУ-С) в этом режиме при подаче и удерживании команды на повышение или понижение ступени происходит непрерывное одновременное переключение РПН на всех фазах трансформатора;

- общесерийный – выбор агрегата для общесерийного управления. Если агрегат выбран для общесерийного управления, то управлять индивидуально невозможно.

На рисунке 3.12 расположены индикаторы температур выходной дистиллированной воды на выходе из теплообменников и на входе в ШВДВ.

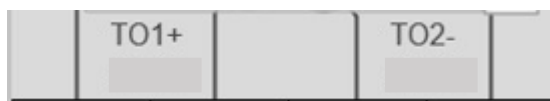


Рисунок 3.12 – Индикаторы температур выходной дистиллированной воды теплообменников.

```
Panel_data (PRG-CFC)
-----
язык Дополнения Онлайн Окно Справка
-----
0001 PROGRAM Main
0002 VAR
0003   temperature: INT; (*переменная для хранения температуры*)
0004   warningLamp: BOOL; (*переменная состояния лампочки предупреждения*)
0005   coolingSystem: BOOL; (*переменная состояния системы охлаждения*)
0006 END_VAR
0007
0008 (*Обновление значения температуры*)
0009 temperature := GetTemperature();
0010
0011 (*Проверка, требует ли включить лампочку предупреждения*)
0012 IF temperature >= 40 THEN
0013   warningLamp := TRUE;
0014 ELSE
0015   warningLamp := FALSE;
0016 END_IF;
0017
0018 (*Проверка, требуется ли выключить агрегат*)
0019 IF temperature > 45 THEN
0020   coolingSystem := FALSE;
0021 ELSE
0022   coolingSystem := TRUE;
0023 END_IF;
0024
0025 END_PROGRAM
0026
0027
```

Рисунок 3.13 – Код программы для отключения агрегата при повышении температуры дистиллированной воды

В данном коде используются три переменные:

temperature - переменная для хранения текущего значения температуры
warningLamp - переменная состояния лампочки предупреждения, которая будет устанавливаться в значение TRUE в том случае, если температура будет больше или равна 40 градусам;

coolingSystem - переменная состояния системы охлаждения, которая будет устанавливаться в значение FALSE в том случае, если температура будет больше 45 градусов

Если температура дистиллированной воды повышается до 40 градусов, то загорается лампочка предупреждения. Если температура повышается более 45 градусов, то агрегат отключается.

Ниже, на рисунке 3.14 расположена область индикаторов состояния диодного выпрямителя. В верхней части расположены числовые индикаторы температуры воздуха внутри блоков. В нижней части расположены индикаторы токов блоков агрегата.

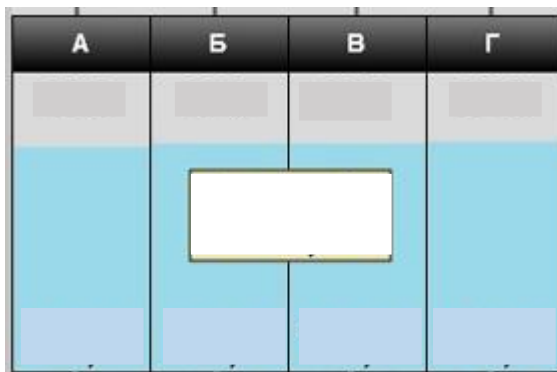


Рисунок 3.14 – Индикация работы диодного выпрямителя.

На рисунке 3.15 расположена индикация состояния РПТ агрегата. Вертикальное положение соответствует включенному состоянию, а горизонтальное положение соответствует отключенному положению.

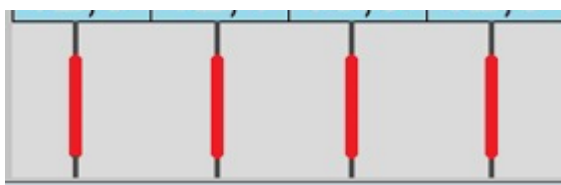


Рисунок 3.15 – Индикация состояния РПТ

Таким образом, автоматизировано рабочее место оператора, с помощью единого интерфейса управления, она ведет режим управления серии электролиза с одного центрального щита управления. Может контролировать технические параметры электрооборудования, осуществлять управление коммутационным высоковольтным выключателем, вовремя реагировать на отклонение от нормально режима работы оборудования, тем самым предотвращать аварийные ситуации и простои производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе, проведен анализ литературных источников и выполнены теоретические и практические исследования в следствие чего получены следующие научно-практические результаты:

- Проведена аналитическая оценка работы современных выпрямительных агрегатов для электролиза цветных металлов и выявлены недостатки, мешающие их стабильному функционированию и быстрой адаптации в условиях изменения технологической ситуации и энергетического баланса серии;

- Исследована взаимосвязь основных и косвенных величин, определяющих электрический режим работы электролизера с концентрационным состоянием электролизной ванны, что позволило создать алгоритм оценивания целесообразности модернизации на высокоамперные электролизеры;

- Произведены расчеты технических параметров электролитических установок, которые выдают высокоамперные характеристики и обоснована целесообразность их внедрения.

- Предложен дополнительный контроль за номинальными параметрами преобразовательной подстанции с центрального щита управления по средствам автоматизированного рабочего места;

- Разработана система контроля и управления электролизной серии при согласовании токовой нагрузки от кремниево-преобразовательной подстанции.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

РПТ – разъединитель постоянного тока.

АПД – агрегат преобразовательный диодный.

АРМ – автоматизированное рабочее место.

ЩУП – щит управления подстанции.

КВА – кремниевый-выпрямительный агрегат.

ВЛ – высоковольтная линия.

ГРУ – главное распределительное устройство.

ЛЭП – линии электропередач.

ПС – подстанция.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баймаков Ю.В. Справочник металлурга по цветным металлам. Производство алюминия / под ред. Ю.В. Баймакова, Я.Е. Конторовича. – Металлургия, 2008. – 560 с.
2. Электрический режим работы серии электролизных ванн и регулирование тока преобразовательными подстанциями. Эксплуатация мощных электролизеров на повышенной силе тока. // материалы конференции КрАЗА. – Красноярск : КрАЗ, 2012. – С.107 – 114.
3. Эффективные системы электроснабжения предприятий цветной металлургии / В.Г. Сальников, В.В. Шевченко. – М. : Metallurgia, 2009. – 319 с.
4. Электрические измерения и электроизмерительные приборы / В.И. Котур, М.А. Скомская, Н.Н. Храмова – М. : Энергоатомиздат, 2013. – 400 с.
5. Измерение и оптимизация параметров алюминиевых электролизеров / В.П. Кадричев, М.Я. Минцис – Челябинск : Металл, 2011. - 135 с.
6. Оптимизация работы мощных электрометаллургических установок / В.К. Гарнов, А.М. Вишневецкий, А.Г. Левин. – М. : Metallurgia, 2001. – 335 с.
7. Современные системы измерения больших величин постоянного тока на кремниевом-преобразовательных подстанциях алюминиевых заводов / В.П. Шамшев, Л.П. Кругляшов, В.Ф. Прислонов // Цветные металлы. – 2014. – № 9. – С. 48 – 49.
8. Физические величины. Справочник / Н.А. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. ; под ред. И.С. Григорьева. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 1232 с.
9. Проблемы измерения больших постоянных токов в алюминиевом производстве и пути их решения / Ф.А. Зыкин, М.К. Казаков // Сборник докладов Международного семинара «Алюминий Сибири – 97». – Красноярск : КрАЗ, 2012. – С. 292 – 300.
10. Футеровочные материалы в алюминиевом производстве // VIII высшие российские алюминиевые курсы. – Красноярск : 2005. – 19 с.

11. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е.Н. Панов [и др.] ; под ред. Б.С. Громова. – М. : Руды и металлы. 2021. – 256 с.
12. Liu Ye-xiang, Chen Xiang-tao, Zhang Geng-rong, et al. Application of mining algorithm based on gray association rule in aluminum electrolysis control. The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2020.
13. Управление гибкими производственными системами / Ю.М. Соломенцев, В.Л. Сосонкин – М.: Машиностроение, 2001. — 352 с. 126. Физические величины: Справочник /Под ред. И.С. Григорьева. М.: Энергоатомиздат, 2001. – 1232 с.
14. Meijer M. New logistic concept for 400 and 500kA smelters // Light metals. 2010. P. 343-348.
15. ANSYS в руках инженера / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М.А. Олферова. – М.: УРСС, 2003. 270 с.
16. Severo D. Modelling Approach to Estimate Bath and Metal Heat Transfer Coefficients / D. Severo, and V. Gusberti // Light Metals 2020 P. 557-562.
17. The Impact of Cell Ventilation on the Top Heat Losses and Fugitive Emissions in an Aluminium Smelting Cell / H. Abbas, M. Taylor, M. Farid, and J. Chen // Light Metals. 2021. P. 551-556.
18. Многоуровневое управление технологическими параметрами высокоамперных электролизеров для производства алюминия / В.Ю. Бажин, И.М. Шанин // XLII научно-практическая конференция с международным участием «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ». Сборник трудов. Часть 2. – СПб. – 2013. – С 28-30.
19. Междунар. науч.-практ. конференция «Алюминий Сибири – 2006», Красноярск: 2006. С. 97–101. 134. Berezin A.I. Neural Network Qualifier of Noises of Aluminium Reduction Cell / P.V. Polyakov, O.O. Rodnov // Light Metals. 2003. P. 437.
20. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. В.Д.Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 153 с.

21. Многомерные статистические методы и основы эконометрики: Учеб. пособие / А. М. Дубров, В. С. Мхитарян, Л. И. Трошин . – М.: МЭСИ, 2002. – 79 с.
22. ANSYS Electromagnetic Field Analysis Guide, Chapter 5. 138. Potocnik, V. Modeling of Metal-Bath Interface Waves in Hall-Heroult Cells Using ESTER/PHOENICS / Light Metals. 2015. P. 227-235.
23. The Next Step to the AP3X-HALE Technology: Higher Amperage, Lower Energy and Economical Performances / O Martin, J. Jolas, B. Benkahla, O.Rebouillat, C.Richard, C.Ritter // Light metals. 2015. P. 249-252.
24. Martin O. Development of the AP39 the new flagship of AP technology / O.Martin, X.Berne, P.Bon, L.Fiot // Light metal. 2010. P. 333-338.
25. New Cathodes in Aluminum Reduction Cells / F. Naixiang¹, T. Yingfu, P.Jianping, W.Yaowu // Light metal. 2010. P. 405-412.
26. Шанин, И. М. Диагностика процесса работы электролизной серии и определение формы рабочего пространства в ванне при помощи измерения наружной стенки / И. М. Шанин // Наука и образование: проблемы и стратегии развития: Материалы Международной научно-практической конференции – Уфа. – 2015. – С. 167-169.
27. АСУТП для управления процессом электролиза / В.Ю Бажин, И.М. Шанин // ХЛІ научно-практическая конференция с международным участием «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ». Сборник трудов. – СПб. – 2012. – С 37-39
28. Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение: Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. - М.: РадиоСофт, 2013. – 328 с.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт

Электроэнергетики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

 В.И. Пантелеев
инициалы, фамилия
« 19 » 12 2023г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Автоматизация режима управления серии электролиза

наименование темы

13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование направления

13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»

код и наименование магистерской программы

Руководитель	 11.12.23 подпись, дата	доц. каф ЭМиАТ, к.э.н. должность, ученая степень	Н. В. Дулесова инициалы, фамилия
Выпускник	 11.12.23 подпись, дата		С. С. Лебедев инициалы, фамилия
Рецензент	 11.12.23 подпись, дата	Начальник ПСО МУП АЭС должность, ученая степень	И.А. Кычакова инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 11.12.23 подпись, дата	доц. каф ЭМиАТ, к.т.н. должность, ученая степень	А. В. Коловский инициалы, фамилия

Красноярск 2023