

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Разработка силового выключателя на ток 150 кА для системы электроснабжения электролизного производства алюминия

Обучающийся

И. А. Яшин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н, И. В. Горохов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2023

## Аннотация

В современном мире, человечество настолько привыкло к электроэнергии, что уже не смыслит без неё своего существования. «Мы живём в современном мире, насыщенном многочисленными устройствами, облегчающими нашу жизнь. К ним относятся изделия бытовой техники, мобильные телефоны, различного типа электродвигатели, установленные в трамваях, троллейбусах, метро» [5]. Привычка-«зашёл-щёлкнул выключатель-зажегся свет» у него уже на уровне рефлексов. И, если свет не зажегся-то человека возьмёт оторопь-«Как это так?» Не говоря уже об отсутствии связи в телефоне или Wi-Fi. А ведь это всё благодаря электроэнергии. Всё, начиная от лампочки и заканчивая торжеством человеческой мысли в виде космического аппарата, который будет бороздить просторы вселенной или атомного подводного крейсера.

Хотя, начали массового применять электроэнергию стали относительно недавно, к текущему моменту уже создана с нуля целое физико-математическое направление исследований связанные с её производством, передачей и потреблением, не теряющее свою актуальность и сегодня развитие технологий, связанных с электроэнергетикой, такие, как передача электроэнергии без проводников или проблема сверхпроводимости.

Если брать Союз Советских Социалистических Республик, только молодая Советская власть занялась электрификацией страны осознавая всю важность в дальнейшем развитии страны. «СССР прошла начальный этап электрификации и накануне Октябрьской революции 1917 г. имела производственный и научно-технический потенциал, достаточный для опережающего развития электроэнергетики и реализации комплексных проектов освоения природных энергетических ресурсов» [17]. Этим архиважным проектам не помешала, ни гражданская война, не делящаяся на тот момент первая мировая. Итогом этого стал проект Государственной комиссии по электрификации России, представляющий собой план электрификации

страны и строительства множества электростанций самого разнообразного характера, а также многокилометровой паутины линии электропередач, бесчисленное количество распределительных подстанций, понижающих подстанций и так далее. А также множестве Научно-Исследовательских Институтов и иных образовательных учреждений, занимающихся перспективными разработками в области электроэнергетики, а также обеспечивающих подготовку обслуживающего персонала и научных работников.

С развалом прошлой экономической формации и потерей финансирования, многие перспективные разработки, колоссальные постройки в области электроэнергетики были «задвинуты в долгий ящик», проданы или потеряны для будущих поколений. Ведь основополагающие открытия были совершены в 19-20 веке.

В России ныне эксплуатируется то, что осталось от Великого наследия прошлой, более развитой в научной и технической сфере цивилизации, сами практически ничего не закладывая на будущее, лишь добавляя кое какие улучшения. Годы идут, в коммерческо-технологических сферах прогресс за последние 30 лет колоссальный, его паритует недофинансирование всех долгосрочных проектов, которые не могут принести краткосрочной выгоды. Сама система душит прогресс, если ваш проект не будет приносить прибыль, от него откажутся еще на стадии грантов. По логике периферийного капитализма, электрификация и удешевление производства не приносит краткосрочной прибыли, соответственно даже базис исследований с заделом на будущее не может появиться, что по итогу выражается в критическом отставании и технологической зависимости. Сейчас выгодно строить торговые центры и жилые комплексы, которые окупаются сразу же, а не электростанции, окупающиеся в х году х века. Либо торговать своими «недрами» — то есть полезными ископаемыми или экспортировать электроэнергию— «В 2010 г. Россия экспортировала 19,3 млрд кВт·ч и импортировала около 3 млрд кВт·ч электроэнергии» [16].

Данная выпускная квалификационная работа относится в некоторой степени к оборонной промышленности, поскольку алюминий весьма важный металл, который используется в большинстве технологических, промышленных и научных сфер. А его производство затратный и трудоёмкий и технологически очень сложный процесс. Для производства одной тонны алюминия—сырца необходимо затратить 13500 кВт·ч электроэнергии. И всё это происходит при температуре 700—800 °С. Помимо этого, его необходимо в дальнейшем рафинировать, то есть очистить от примесей металлов, неметаллов и газов. При рафинировании получают алюминий чистотой 99,996%. Разработка же выключателя для электролизного получения алюминия позволит удешевить его производство и, как следствие, удешевит сам конечный продукт производства.

## Содержание

Введение.....	7
1 Концепция разрабатываемого шунтирующего выключателя.....	10
1.1 Анализ существующего оборудования.....	10
1.2 Возможные варианты исполнения.....	11
1.3 Организация работ с применением шунтирующего выключателя.....	14
2 Расчёт технических характеристик шунтирующего выключателя.....	17
2.1 Выбор основных сечений и размеров токоведущих элементов шунтирующего выключателя.....	17
2.2 Описание выбранной конструкции.....	21
2.3 Тепловой расчёт шунтирующего выключателя на ток 150 кА.....	27
2.4 Формуляр теплового расчёта шунтирующего выключателя на ток 150 кА.....	32
2.5 Проверочный тепловой расчёт шунтирующего выключателя на ток 150 кА.....	36
3 Расчёт электродинамической стойкости шунтирующего выключателя на ток 150 кА.....	42
3.1 Основные соотношения.....	42
3.2 Расчётный формуляр.....	42
Заключение.....	47
Список используемой литературы.....	49

## Введение

«Всё нарастающие темпы применения электрических аппаратов требуют их большего количества, однако простое увеличение их числа тоже не решает вопроса. С ростом потребности в них увеличивается требования к их характеристикам: уровню напряжений и рабочих токов, уменьшению габаритов и весов, повышению быстродействия коммутационных и релейных аппаратов (убыстрения отключения повреждённых участков цепи), устойчивости и надёжности в эксплуатации при увеличении срока службы.

Совокупность всех этих требований ставит перед конструкторами и научными работниками всё новые требования к пересмотру существующих типов аппаратов и созданию более совершенных. Такая работа может успешно проводиться только на базе достаточно ясных представлений о физической сущности явлений, протекающих в электрических аппаратах, и умении применять законы электротехники при расчётах и проектировании элементов аппаратов» [7].

«Исходным сырьём для электрохимического получения металлического алюминия в промышленных масштабах служит оксид алюминия» [9]

На химических и металлургических предприятиях для получения алюминия и другой продукции используются электролизёры с номинальным током 150 кА, которые соединены в последовательную электрическую цепь (Чертёж 4). Такая электрическая цепь может состоять из нескольких десятков или сотен электролизных установок. «Измерение электрического тока, протекающего через замкнутую электрическую цепь, выполняется с помощью амперметра. Амперметр применяется при проверке электрической цепи под напряжением, причём он подключается последовательно с измеряемой цепью» [2]

В процессе эксплуатации электролизёры требуют замены. Чтобы заменить вышедший из строя электролизёр, его необходимо обесточить. Для этого снимают токовую нагрузку всего цеха, то есть отключают выпрямительную подстанцию. Затем электролизёр шунтируют ошиновкой и включают нагрузку вновь.

Такой способ замены электролизёра приводит к снижению производительности цеха, так как во время операции шунтирования электролизёра непрерывность технологического процесса нарушается.

Чтобы не нарушать технологический процесс, необходимо зашунтировать электролизёр, требующий замены, не отключая ток нагрузки остальных электролизёров. С этой целью используется шунтирующий выключатель (Чертёж 5).

«Выключатели и переключатели служат для ручного включения и отключения, переключения цепей бытовых и промышленных электроустановок» [13]

При подключении такого выключателя параллельно электролизёру ток нагрузки пойдёт через него, так как сопротивление выключателя в 20 раз меньше, чем самого электролизёра. После ремонта электролизёра его опять включают в цепь, а шунтирующий выключатель отключают, и ток нагрузки пойдёт через электролизёр.

Технологический процесс получения алюминия невозможен без применения больших токов (до 150 кА), поэтому и шунтирующий выключатель, который мог бы быть использован в этом случае, также должен быть рассчитан «на ток нагрузки 150 кА» [21].

Поэтому была поставлена задача о разработке шунтирующего выключателя на номинальный ток 150 кА для применения его на химических предприятиях по получению алюминия и хлора.

«Разработка электрической, технологической, строительной и санитарно—технической частей проекта ведётся совместно, с соблюдением всех действующих нормативов по каждому направлению. Электрическое

оборудование устанавливается таким образом, чтобы его эксплуатация и обслуживание не вызвали затруднений, при этом обеспечивалось эффективное энергоснабжение технологических установок» [8].

Кроме того, разрабатываемый шунтирующий выключатель должен быть с воздушным охлаждением, поскольку применение воды на химических предприятиях по электролизному производству алюминия может в высокой степени привести к аварии на предприятии.

Помимо этого, массогабаритные характеристики выключателя должны быть достаточно приемлемы для перемещения данного устройства в цеху силами личного состава предприятия. «Эксплуатацию электроустановок должен осуществлять подготовленный электротехнический персонал» [3] При этом шунтирующий выключатель должен быть полностью безопасен при эксплуатации при условии абсолютного соблюдения правил техники безопасности.



## **1 Концепция разрабатываемого шунтирующего выключателя.**

### **1.1 Анализ существующего оборудования**

Дабы не утруждать себя расчётом и разработкой нового оборудования и не «изобретать велосипед», давайте оглянемся на наше отечественное производство высоковольтных выключателей, которое может подойти для установки в качестве шунта на электролизном производстве.

В настоящее время в нашей стране серийно выпускается лишь один тип шунтирующих выключателей Ульяновским заводом «Контактор».

Такой выключатель В – 61 имеет номинальный ток 63 кА, главные серебряные роликовые контакты, водяное принудительное охлаждение главных неподвижных контактов и масляную защиту контактов от агрессивной среды. Выключатель В-61 имеет сложную конструкцию, небольшой ресурс работы. Вопрос получения аппаратов с большим током нагрузки можно решить применением нескольких таких серийных выключателей, соединенных параллельно [19],[20].

Но при этом получается весьма громоздкая конструкция, использование которой непосредственно в химических цехах затруднено из-за недостатка свободного места. Габариты одного аппарата 480×620×815 мм, так же этот выключатель должен быть с естественным охлаждением, так как применение водяного охлаждения при производстве алюминия не допускается из соображений пожарной безопасности и большой вероятности взрыва при появлении паров воды в цехе. Кроме того, такая установка сложна и небезопасна в обслуживании.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что отечественное электролизное производство нуждается в существенном улучшении применяемого оборудования и для этого требуется разработка специального оборудования, которое будет соответствовать требованиям, предъявляемым к нему на производстве.

## 1.2 Возможные варианты выполнения выключателя

«Электрическая схема электролизного цеха выполнена таким образом, что каждый электролизёр может шунтироваться десятью алюминиевыми ножами сечением 60×430 мм без токовой нагрузки. Поэтому наиболее рациональным решением является то, при котором шунтирующий выключатель устанавливался бы в месте расположения ножей» [22].

Исходя из опыта проектирования и эксплуатации шунтирующих выключателей в электролизных цехах химических предприятий, такие выключатели должны «иметь две системы контактов: основные» [21] контакты, предназначенные для пропускания электрического тока и дугогасительные контакты, «предназначенные для защиты основных контактов от» [21] воздействия на них мощной электрической дуги. «Дугогасительная система выключения состоит из дугогасительных (подвижных и неподвижных) контактов и камеры с решёткой. Эта система служит для ограничения размеров и быстрого гашения электрической дуги, возникающей между расходящимися контактами при разрыве ими электрической дуги» [14]

Относительно «коммутирующих контактов было замечено, что их условия работы определяются двумя возможными состояниями: контакты замкнуты и разомкнуты. Что касается разомкнутого состояния, то основная функция, которую они выполняют—создание изоляционного промежутка. Следовательно, разомкнутое состояние контактов должно характеризоваться теми максимальными напряжениями, которые выдерживает изоляционный меж контактный промежуток без пробоя. Очевидно, что напряжение пробоя меж контактного промежутка в целях надёжности должно быть выше, чем максимальное напряжение, которое может появиться в цепи при разомкнутом положении контактов.

Кроме двух указанных состояний, работоспособность коммутирующих контактов характеризуется ещё процессами замыкания и размыкания (иногда называемыми включением и отключением).

В процессе замыкания расстояние между контактными поверхностями уменьшается. При достижении некоторого расстояния создаются условия для электрического пробоя и в результате между электродами загорается дуга замыкания. Под действием этой дуги происходит износ контактов. При большой силе тока в дуге металл контактов испаряется весьма быстро и межконтактного промежутка создаётся давление порядка 100—1000 атм. Это давление может тормозить движение контактов (плавление). Однако под действием включающего механизма, в конце концов, происходит соприкосновение контактов, и дуга замыкания гаснет. Но в большинстве случаев процесс замыкания на этом не заканчивается, так как соприкосновение контактов носит ударный характер и после первого удара возможен отброс подвижного контакта. После отброса контакты вновь начинают сближаться, вновь происходит удар и так далее, до тех пор, пока вся кинетическая энергия не рассеется в виде тепла в окружающем пространстве. Иными словами, при замыкании контактов может иметь место их вибрация. При вибрации контактов возможно повторное возникновение дуги или появление искры, которые также ведут к износу контактов.

При замыкании контактов возможно проскальзывание их друг относительно друга. При этом часть кинетической энергии расходуется на преодоление сил трения. В результате проскальзывания происходит истирание контактов, которым пользуются для самоочистки контактных поверхностей от посторонних плёнок.

При правильном конструировании механической системы, движущей контакты и создающей нажатия на них возможно устранение вибраций

Ещё следует отметить, что дуга замыкания нагревает контакты до высоких температур. Если эти температуры достаточны для плавления металла контактов, то после размыкания, когда начинается остывание

контактов, возможно их сваривание» [7]. «При плавлении объём твёрдого тела увеличивается максимум на несколько процентов, следовательно, среднее межатомное расстояние также увеличится на несколько процентов. Этому соответствует существенно большая величина энтальпии испарения по сравнению с энтальпией плавления» [4].

Учитывая то обстоятельство, что разрабатываемый шунтирующий выключатель должен иметь естественное охлаждение, эффективность которого в 5 раз меньше водного, можно предположить, что «выключатель на ток 150 кА» [21] будет иметь массу порядка 1,5-2 тонны и большие габаритные размеры.

В техническом задании на разработку шунтирующего выключателя указано, что желательнее его подключать параллельно уже существующим ножам, то есть «время работы шунтирующего выключателя может быть уменьшено до» [21] 20-30 минут до тех пор, пока не будут «зашунтированы все алюминиевые ножи.

Известно, что переходной тепловой процесс имеет длительность 3-4 часа при естественном охлаждении. За это время температура контактов выключателя достигает установившейся температуры, которая не должна превышать значений, указанных в ГОСТ 403-73.

Например: для серебряных контактов допустимая температура нагрева составляет 200°C, а для медных – 120°C.

Если время нагрева шунтирующего выключателя ограничить до 30 минут, то вполне допустимо снизить массу и размеры аппарата, но при этом температура нагрева контактов не должна превысить допустимых значений» [23].

Исходя из существующих размеров «шунтирующих ножей, шунтирующий выключатель должен иметь один из габаритных размеров равный ширине пакета шин с шунтирующими ножами.

Шунтирующие выключатели имеют, как правило, модульную конструкцию, то есть имеют несколько одинаковых токоподводов, которые переключаются подвижными контактами, с общим приводным механизмом.

Можно рассмотреть два варианта выполнения шунтирующего выключателя:

- устанавливающийся параллельно всем десяти шунтирующим ножам,
- устанавливающийся вместо пяти шунтирующих ножей, остальные ножи остаются на своих местах.

В первом варианте порядок шунтирования, следующий: вначале включается шунтирующий выключатель, затем шунтируются все алюминиевые ножи. Шунтирующий выключатель» [23] «может быть отключен.

Во втором варианте – вначале включается шунтирующий выключатель, затем шунтируются 5 ножей. Шунтирующий выключатель отключается» [22] «и переносится к другому электролизёру, а на его место» [21] монтируются остальные 5 ножей и шунтируются. Отключение шунтирующего выключателя в обоих вариантах происходит в обратном порядке.

При первом варианте шунтирующий выключатель может иметь большее число модулей, т.е. может пропускать больший ток нагрузки в течении большего времени. Однако масса и габариты шунтирующего выключателя при первом варианте исполнения будут больше, чем при втором варианте исполнения.

В связи с этим предпочтительнее для разработки, второй вариант с меньшим числом модулей, однако при втором варианте исполнения шунтирующего выключателя «будет работать в более тяжёлых условиях по токовой и тепловой нагрузке» [21].

### **1.3 Организация работ с применением шунтирующего выключателя**

Шунтирующее устройство предназначено для шунтирования электролизных ванн в момент снятия или установки постоянных шунтов.

Предполагаются следующие этапы работ, выполняемые при использовании шунтирующего устройства в момент выключения и включения электролизной ванны.

Выключение электролизной ванны:

— шунтирующее устройство с разомкнутыми контактами устанавливается на место блока пяти постоянных шунтов. При этом его выводы размещаются между контактными поверхностями постоянных шин и обжимаются стяжками,

— включают шунтирующее устройство,

— устанавливается блок пяти постоянных шунтов на оставшиеся пять выводов,

— шунтирующее устройство выключается и снимается,

— на место шунтирующего выключателя устанавливается блок пяти постоянных шунтов.

Включение электролизной ванны:

— снимается блок пяти постоянных шунтов,

— шунтирующее устройство с разомкнутыми контактами устанавливается на место блока пяти постоянных шунтов. При этом его выводы размещаются между контактными поверхностями постоянных шин и обжимаются стяжками,

— включается шунтирующее устройство,

— снимается блок пяти постоянных шунтов,

— шунтирующее устройство выключается и снимается.

Вывод:

Как видно из описания порядка установки и снятия выключателя, последовательность установки производится в обратном порядке последовательности снятия шунта.

Таким образом можно ввести в действие или вывести из работы, зашунтировав электролизную ванну специальными шунтирующими ножами. В дальнейшем шунтирующий выключатель перемещается к следующей электролизной ванне и вся операция по шунтированию, согласно вышеизложенным пунктам, повторяется вновь для очередной электролизной установки.

Так же предусматривается обслуживание шунтирующего выключателя.

«Сопротивление токоведущего контура должно измеряться по частям, то есть для каждого дугогасительного устройства (модуля), элемента (разрыва) гасительной камеры и отделителя, внутривольной ошиновки и т.п. в отдельности» [15].

«Техническое обслуживание находящегося в эксплуатации оборудования состоит в выполнении комплекса операций по поддержанию его работоспособного или исправного состояния, которые предусмотрены в конструкторских эксплуатационных или нормативных документах, а также необходимость которых выявлена по опыту эксплуатации» [6].

Далее производим расчёт технических параметров шунтирующего выключателя. Определяем размеры контактной системы, рассчитываем ее тепловую стойкость.

## 2 Расчёт технических характеристик шунтирующего выключателя

### 2.1 Выбор основных сечений и размеров токоведущих элементов шунтирующего выключателя

«Уже в начальной стадии проектирования аппарата необходимо выбрать конструктивные формы проводников токоведущего контура и ориентировочно определить их длины. Одновременно следует выбрать конструктивные формы контактных соединений проводников. При этом следует стремиться принимать как можно меньшее число контактных соединений. Каждое контактное соединение создаёт переходное сопротивление, а следовательно, потери энергии. Кроме того, каждое соединение может вызвать нарушение работы аппарата в процессе эксплуатации» [11].

Считаем, что шунтирующий выключатель будет «устанавливаться вместо пяти шунтирующих ножей» [21]. В этом случае шунтирующий выключатель может иметь пять модулей с общим приводным механизмом. Общий ток нагрузки по техническому заданию составляет  $I = 150$  кА, тогда ток нагрузки, который будет протекать по одному модулю шунтирующего выключателя составит:

$$I_m = I/5 = 150/5 = 30 \text{ кА} \quad (1)$$

Из [1] следует, что сечение токоведущего контура может быть определено согласно выражению:

$$S \cdot P = \frac{I^2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_y)}{K_T \cdot (\theta_y - \theta_0)} \quad (2)$$

где  $S$ -сечение токоведущей детали, м<sup>2</sup>;

$P$ -периметр сечения токоведущей детали, м;



I-ток, А;

$\rho_0$ -удельное электросопротивление меди, равное  $1,58 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;

$\alpha$ -температурный коэффициент металла контактов, для меди равное 0,004;

$K_T$  -температурный коэффициент, Вт/м<sup>2</sup> °С;

$\theta_0$  и  $\theta_y$ -температура окружающей среды и устанавливаемая температура токоведущей детали, °С.

Из формулы 2 следует:

$$\rho_0 = 1,58 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad \text{при } \theta_0 = \theta^\circ \text{С}$$

$$\alpha = 0,004$$

$$K_T = 10 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^\circ \text{С}$$

Принимаем:

$$\theta_0 = 40^\circ \text{С}, \theta_y = 200^\circ \text{С}.$$

Тогда:

$$S \cdot P = \frac{30000^2 \cdot 1,58 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004 \cdot 200)}{10 \cdot (200 - 40)} = 0,016 \text{ м}^3 = 16 \cdot 10^3 \text{ см}^3 \quad (3)$$

Исходя из габаритных размеров шунтирующих ножей, можно разработать шунтирующего выключателя (эскизный проект). Возможная конструкция шунтирующего выключателя представлена на рисунке 1.

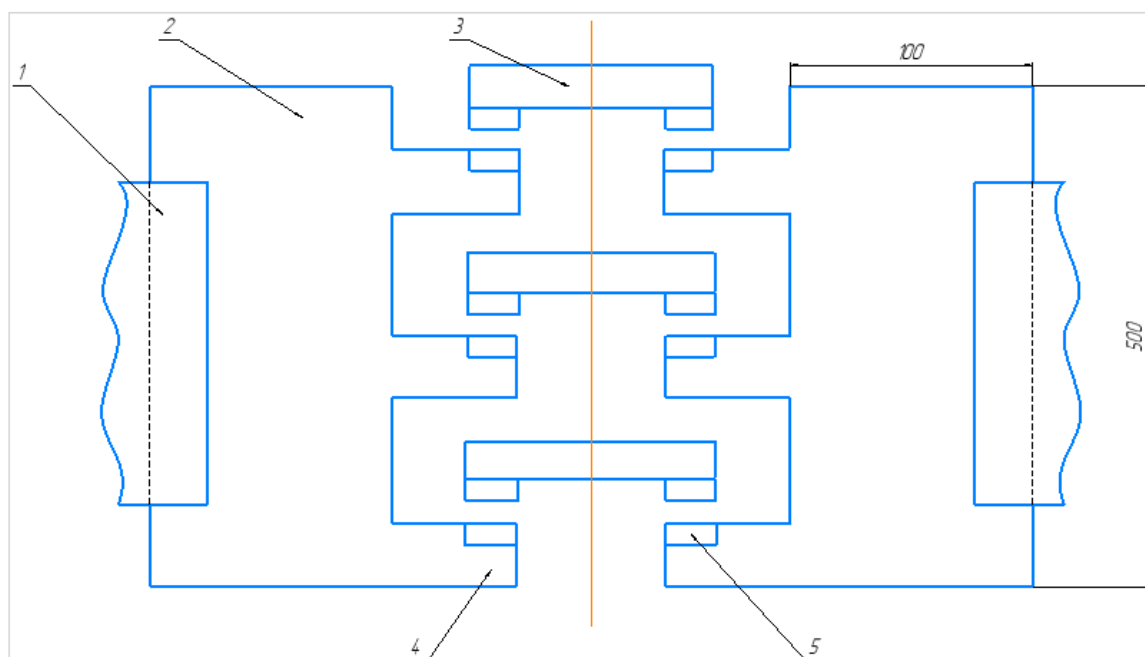


Рисунок 1-Схема контактной системы шунтирующего выключателя

Между двух соседних алюминиевых шунтирующих шин электролизёра (1) закрепляются медные полюса – токоподводы шунтирующего выключателя (2), которые имеют неподвижные главные контакты (4). Неподвижные контакты (4) при коммутации переключаются «подвижными контактными мостиками (3). Главные медные контакты снабжены серебряными напайками (5) для уменьшения» [22] контактного сопротивления.

Каждый модуль шунтирующего выключателя может иметь два полюса – токопровода (2). К каждому токопроводу крепятся с двух сторон шесть неподвижных контактов (4). Неподвижные контакты переключаются шестью мостиками (3).

Таким образом, сечение одного неподвижного контакта и подвижного мостика составит:

$$S_M \cdot P_M = S \cdot P / 6 = 16 \cdot 10^3 / 6 = 2,6 \cdot 10^3 \text{ см}^3 \quad (4)$$

Из практики эксплуатации силовых выключателей известно, что «время нагрева аппарата до установившейся температуры при естественном охлаждении составляет порядка  $t = 3-4$  часов. По техническому заданию время работы шунтирующего выключателя» [23] составляет порядка 20-30 минут, то есть в 6-8 раз меньше, чем время нагрева аппарата до установившейся температуры. Режим работы шунтирующего выключателя в этом случае будет кратковременный.

Коэффициент перегрузки по мощности потерь для кратковременного режима определяются из соотношения [3]:

$$K_p = 1 / (1 - e^{-t_n/m}) \quad (5)$$

где  $t_n$  - время протекания тока нагрузки,  
 $T$  - постоянная времени нагрева.

Из технического задания  $t_n = 20$  минут

Известно, что  $t_{np} = 3 \cdot T$ , тогда:

$$T = t_{np} / 3 = 4 / 3 = 1,3 \text{ часа} \quad (6)$$

Принимаем  $T = 1,5$  часа:

$$K_p = \frac{1}{1 - \frac{0,3}{0,5}} = 5,5 \quad (7)$$

То есть сечение токоведущей детали может быть уменьшено при таком кратковременном режиме в 5,5 раз, тогда:

$$S_m \cdot P_n = 2,6 \cdot 10^3 / 5,5 \approx 0,5 \cdot 10^3 \text{ см}^3 \quad (8)$$

Толщина шунтирующей алюминиевой шины составляет 60 мм, следовательно, один из размеров сечения мостика шунтирующего выключателя должен составлять 60 мм, тогда другой размер сечения составит:

$$S_m \cdot P_n = a \cdot b \cdot (2 \cdot a \cdot 2 \cdot b) = b \cdot b \cdot (12 + 2 \cdot b) = 0,5 \cdot 10^3 \text{ см}^3 \quad (9)$$

где  $b = 4 \text{ см} = 40 \text{ мм}$ .

Таким образом, предварительный расчёт теплового кратковременного режима работы шунтирующего выключателя показал, что сечение неподвижных контактов и контактного мостика может быть выбрано 40×60 мм. Длина контактного мостика может быть принята – 120 мм, а неподвижного контакта – 70 мм. Для уменьшения габаритов шунтирующего выключателя в ширину, толщина неподвижного контакта и контактного мостика может быть выбрана 30 мм, а высота 60 мм. При этом габаритные размеры токоподвода шунтирующего выключателя могут составить: 60×50×100 мм.

## 2.2 Описание выбранной конструкции

«Многоамперный выключатель типа БШВС-1500 на ток нагрузки 150 кА с естественным охлаждением применяется для шунтирования электролизных установок на предприятиях металлургической промышленности в технологическом процессе получения алюминия, магния и других металлов электролизным методом.

Электрическая схема электролизного цеха производства алюминия выполнена таким образом, что каждый электролизёр может шунтироваться десятью алюминиевыми ножами сечением 60×430 мм без токовой нагрузки при отключении выпрямительной подстанции. При этом обесточиваются все электролизёры в цехе и производительность предприятия снижается. Поэтому также, как и на предприятиях химической промышленности, в цехах

электролиза металлургических предприятий наиболее рациональным является решение применения шунтирующего выключателя и его установки в месте расположения ножей.

Учитывая большую величину тока нагрузки 150 кА и невозможность применения искусственного водяного охлаждения, шунтирующий выключатель может иметь огромные массу (1,5 – 2 тонны) и габаритные размеры.

Многоамперный выключатель, как правило, имеет модульную конструкцию. Модули соединены параллельно и имеют общий приводной механизм.

Поэтому при разработке шунтирующего выключателя для электролизного цеха производства алюминия рассматривались два варианта выполнения выключателя:

- шунтирующий выключатель, который устанавливается параллельно всем десяти шунтирующим ножам электролизера;
- шунтирующий выключатель, который устанавливается вместо пяти шунтирующих ножей, а остальные ножи остаются на своих местах.

При первом варианте порядок шунтирования электролизера, следующий: вначале включается шунтирующий выключатель, затем шунтируются все десять алюминиевых ножей, шунтирующий выключатель отключается.

При этом варианте выключатель имеет большое число модулей (10 модулей). Он способен длительно пропускать ток нагрузки 150 кА. Однако, как отмечалось выше, его масса и габариты будут очень большими.

При втором варианте порядок шунтирования электролизера, следующий: вначале включается шунтирующий выключатель, имеющий пять модулей, затем монтируют пять шунтирующих ножей, шунтирующий выключатель отключается и переносится к другому электролизеру, а на его место устанавливают остальные пять ножей и электролизер становится зашунтированным.

При этом варианте выключатель имеет в два раза меньше массу и габаритные размеры, но при этом он будет работать в более тяжелых условиях по токовой и тепловой нагрузке, чем выключатель, выполненный по первому варианту.

Однако следует учесть то обстоятельство, что операция по шунтированию электролизера в цеху производства алюминия длится сравнительно недолго, то есть время работы шунтирующего выключателя может быть уменьшено до 20 – 30 минут до» [23] тех пор, пока не будут «зашунтированы все алюминиевые ножи.

Известно, что переходной тепловой процесс шунтирования ванны при естественном охлаждении имеет длительность несколько часов. За это время температура контактов выключателя достигает установившейся температуры.

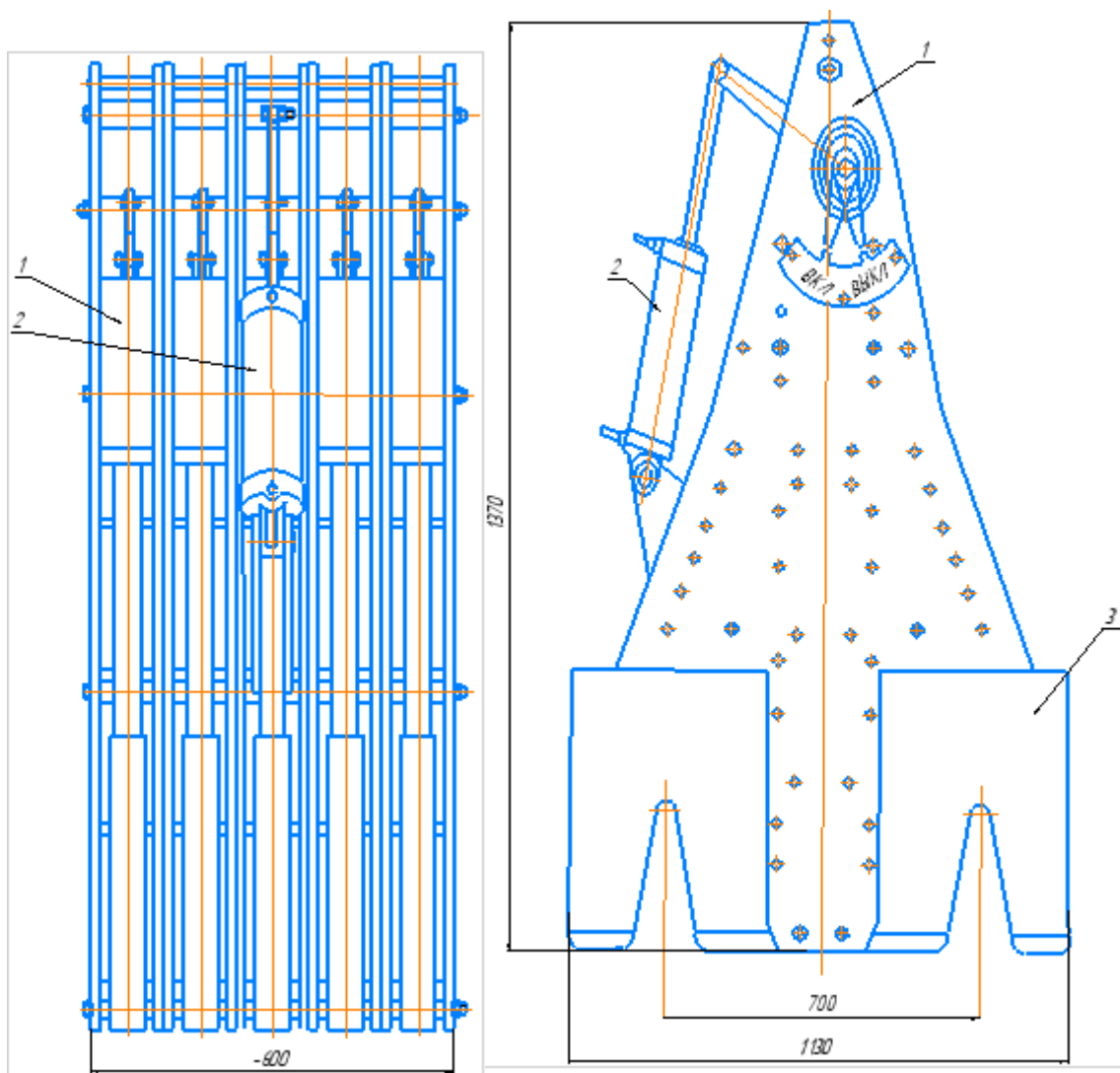
Если время работы шунтирующего выключателя ограничить, то есть сделать режим его работы кратковременным, то вполне допустимо снижение массы и размеров аппарата, но при этом температура нагрева контактов и токоведущих элементов не должна превысить допустимых значений.

На рисунке 2 представлен общий вид многоамперного выключателя на ток нагрузки 150 кА типа БШВС-1500.

На рисунке 3 представлена конструкция контактной системы многоамперного выключателя БШВС-1500.

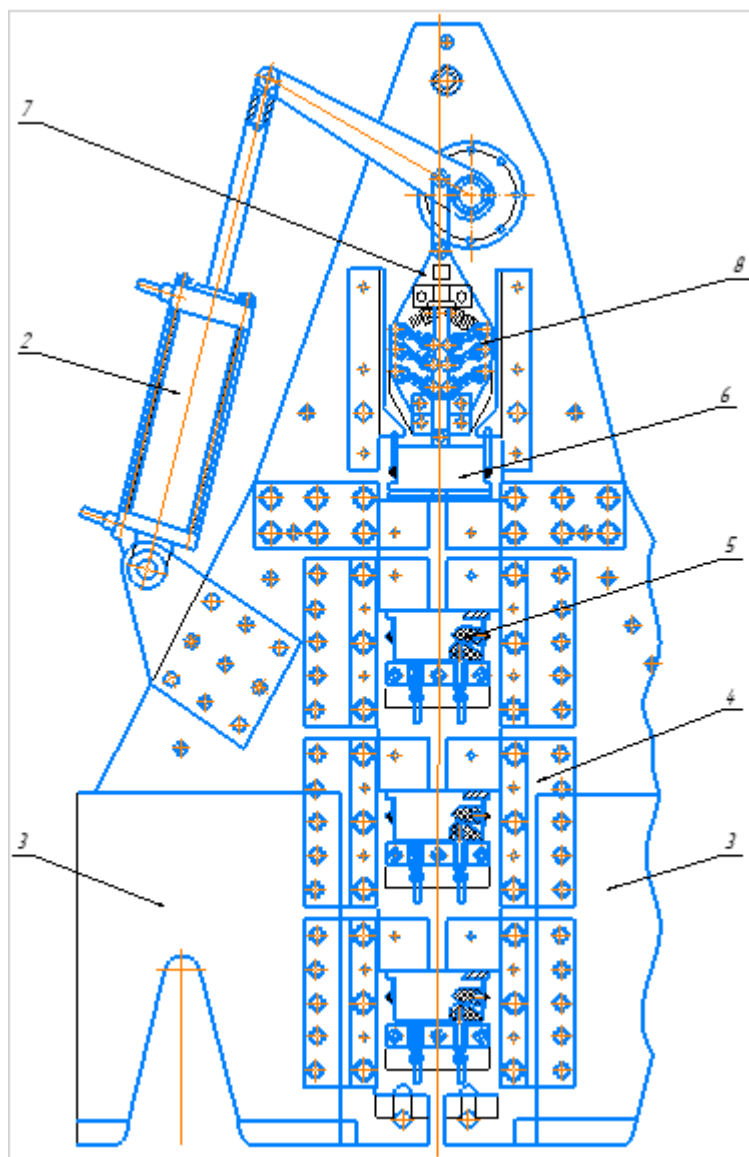
Многоамперный шунтирующий выключатель БШВС-1500 состоит из пяти модулей (рисунок 2), соединенных стяжками, и имеет общий пневматический приводной механизм 2, который синхронно приводит в действие контактные системы всех модулей.

Контактная система модуля включает в себя два вывода 3 (рисунки 2 и 3), блоки основных медных неподвижных контактов 4 в количестве четырех штук, подвижные медные мостики главных контактов 5 в количестве шести штук и блок дугогасительных медных контактов 6 в количестве двух штук. Все подвижные контактные мостики установлены на подвижной текстолитовой траверсе 7» [23].



1 – модуль выключателя; 2 – пневмопривод; 3 – выводы выключателя.

Рисунок 2— Выключатель БШВС-1500 на ток нагрузки 150 кА



4 – основной неподвижный контакт; 5 – основной подвижный контакт мостик; 6 – дугогасительные контакты; 7 – траверса подвижных контактов; 8 – пружины дугогасительных контактов.

Рисунок 3—Выключатель БШВС-1500 на ток нагрузки 150 кА  
(контактная система)

«Неподвижные и подвижные медные главные контакты имеют серебряные напайки толщиной 1 мм и шириной 10 мм. Дугогасительные медные контакты имеют напайки из дугостойкого металлокерамического материала.



Кинематика приводного механизма аппарата такова, что при включении аппарата вначале включаются дугогасительные контакты, затем главные. При отключении – вначале отключаются главные контакты, а потом дугогасительные. При этом механизм аппарата блокируется в крайних положениях.

Самопроизвольное отключение и включение шунтирующего выключателя при падении давления в воздушной магистрали пневмопривода исключается.

Модули выключателя имеют возможность перемещаться и самоустанавливаться при монтаже на выводах электролизной установки, что обеспечивает необходимое обжатие контактных поверхностей токоподводов выключателя и выводов электролизера.

Дугогасительные контакты 6 (рисунок 3) перемещаются пружинами 8 и могут находиться в двух фиксированных положениях «включено» и «отключено».

Скорость движения главных контактов зависит от скорости перемещения траверсы 7 под действием поршня пневмоцилиндра 2.

Скорость движения дугогасительных контактов не зависит от динамических характеристик пневмопривода. Размыкание и замыкание дугогасительных контактов происходит практически мгновенно под действием пружин 8, что увеличивает их эрозионную стойкость.

Конструкция шунтирующего выключателя типа БШВС-1500 является ремонтнопригодной, легко разбирается и собирается, а контактные системы доступны для осмотра и замены при необходимости» [23].

По итогам данной главы можно сделать вывод, что данный шунтирующий выключатель БШВС—1500 вполне реален к разработке. Был произведён массогабаритный расчёт токоведущих частей выключателя, а также шунтирующих шин. Их размер достаточен для расчётного времени прохождения тока, пока не будет произведена замена шунтирующего выключателя на алюминиевые шины. Так же был выполнен примерный

чертёж самого выключателя и его контактной системы с описанием основных частей выключателя.

Следующим этапом расчёта шунтирующего выключателя будет тепловой расчёт.

### **2.3 Тепловой расчёт шунтирующего выключателя на ток 150 кА**

«Тепловой расчёт является неотъемлемой составной частью проектирования любой электрической машины. Результаты теплового расчёта по определению нагрева наиболее важных частей электрической машины, регламентируемого гостандартами и техническими условиями, в конечном счёте определяют правомерность выбора величин электромагнитных нагрузок, материалов активного ядра, конструктивных решений и так далее при проектировании электрической машины с обеспечением максимально возможного уровня технико—экономических показателей» [12]

«Пусть известно сопротивление  $R$  участка, длиной  $l$ . Разрежем его перпендикулярно оси. Получившиеся торцевые поверхности обработаем любым способом и после этого приведём их в соприкосновение. Если после этого измерить сопротивление участка проводника той же длины  $l$ , то оно окажется больше прежнего на некоторую величину  $R_k$ , которая называется сопротивлением контакта.

Появление этого сопротивления связано с 2 обстоятельствами. Первое является следствием загрязнённости или окисленности поверхности, и тогда в цепь вводится дополнительное сопротивление различных плёнок, образующихся на поверхности контактирующих тел. Второе, не менее важное обстоятельство, заключается в том, что при сжатии двух проводников, обращённых друг к другу плоскостями, гранями, касание будет происходить не по всей длине плоскости, а отдельными площадками, расположенными по плоскостям в соответствии с микрогеометрией

сдавливаемых граней. При этом картина протекания тока резко изменится, так как ток должен пройти не через всё сечение, а лишь через его часть, по сравнению со сплошным проводником, будет использовано не всё поперечное сечение, то есть сопротивление протеканию тока возрастёт. Величина этого сопротивления, появляющегося в результате стягивания линий тока к истинное площадке соприкосновения, называется сопротивлением стягивания  $R_c$ .

Таким образом, сопротивление контакта может быть представлено как сумма сопротивлений стягивания  $R_c$  и сопротивления посторонних слоёв или плёнок  $R_{пл}$ .

$$R_k = R_c + R_{пл}$$

Сопротивление плёнок может меняться в процессе эксплуатации в очень широких пределах.

Сопротивление стягивания зависит в первую очередь от материала контактов, числа площадок и силы сжатия» [7].

В «современных сильноточных электрических аппаратах находят широкое применение контакты мостикового типа. Общая схема такого контактного соединения приведена на рисунке 4. Здесь неподвижные контакты 2 переключаются подвижным контактом 1, который и называется контактный мостик. Во многих аппаратах контактный мостик является наиболее нагретой деталью, и его температура определяет предельно допустимый для аппарата ток» [24]. В связи с этим важное «значение приобретает вопрос о распределении температур в описываемом контактном соединении и выяснение причин, влияющих на это распределение.

Общий характер распределения температур вдоль токопроводов и контактного мостика можно проследить по кривой рисунке 4. При протекании тока через рассматриваемое устройство приходится учитывать потери энергии как токоведущих частей 1 и 2, так и в контактных соединениях А и В.

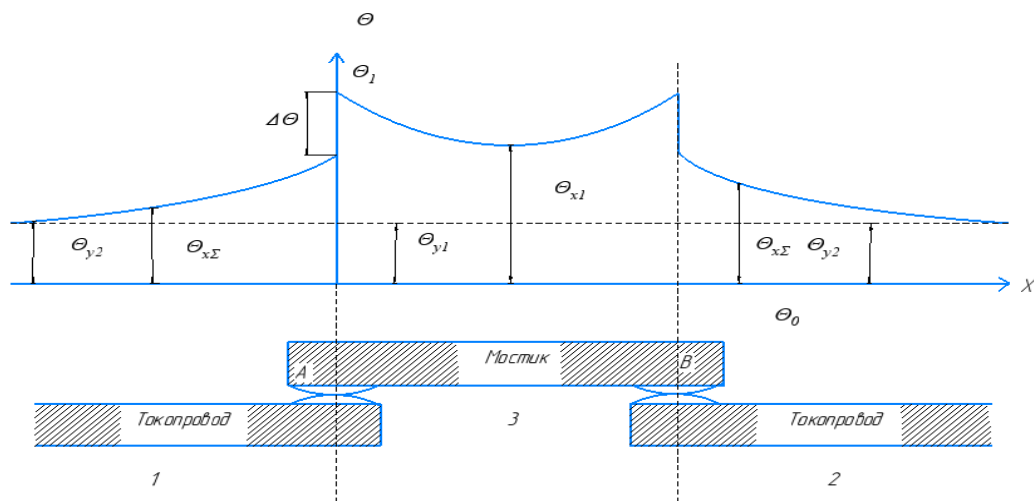


Рисунок 4—Схема распределения температур

Наиболее высокая температура наблюдается именно в этих местах. Кроме этого, мостик оказывается обычно нагретым сильнее, чем токоподводы. Поэтому между ними происходит теплообмен. Тепловой поток проходит через контакты А и В, которые обладают тепловым сопротивлением более высоким, чем другие токоведущие части. Поэтому в местах соприкосновения контактного мостика с токоподводами наблюдается резкое изменение температур.

Наиболее нагретым обычно оказывается контакт, принадлежащий мостику. Его температура  $\theta_1$ . Соответствующий контакт токоподвода имеет более низкую температуру  $\theta_2$ . Перепад температур в контактном переходе:

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 \quad (10)$$

По мере удаления от контактного соединения температура токоподвода падает и стремится к значению  $\theta_{y2}$ , которое имел бы токоподвод при отсутствии контактного мостика. При отсутствии контактов А и В температура мостика была бы более низкой, равной  $\theta_{y1}$ , как это показано на рисунке 4. На этом рисунке отмечена и температура окружающей среды  $\theta_0$ . Для расчёта температур рассматриваемого устройства необходимо знать ряд геометрических и теплофизических параметров [3,4]. В общем случае

параметры, относящиеся к мостику и токоподводам, могут быть разными. В связи с этим, величины, относящиеся к мостику, будут снабжены индексом 1, а с токоподводами – индексом 2. Будем считать заданными:  $S_1$  и  $S_2$  – периметры сечения,  $F_1$  и  $F_2$  – площадь сечения,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи с поверхности» [25], « $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – теплопроводность материала,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельное электрическое сопротивление,  $V$  – длина мостика,  $R_k$  – электрическое сопротивление контактов,  $R_T$  – тепловое сопротивление контактов.

Температура  $\theta_{y1}$  и  $\theta_{y2}$  связаны с приведёнными параметрами следующими соотношениями:

$$\theta_{y1} = \frac{I^2 \cdot \rho_1}{\alpha_1 \cdot S_1 \cdot F_1}, \quad (11)$$

$$\theta_{y2} = \frac{I^2 \cdot \rho_2}{\alpha_2 \cdot S_2 \cdot F_2}. \quad (12)$$

Далее в целях сокращения расчётов введём следующие обозначения» [23]:

$$a_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 \cdot S_1}{\lambda_1 \cdot F_1}}, \quad (13)$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2 \cdot S_2}{\lambda_2 \cdot F_2}}, \quad (14)$$

$$b_1 = \sqrt{\alpha_1 \cdot S_1 \cdot \lambda_1 \cdot F_1}, \quad (15)$$

$$b_2 = \sqrt{\alpha_2 \cdot S_2 \cdot \lambda_2 \cdot F_2}, \quad (16)$$

$$C_1 = \frac{(1 - e^{-a_1 l_1})}{(1 + e^{-a_1 l_1})}. \quad (17)$$

Тогда:

$$\theta_1 = \frac{I^2 \cdot R_k \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot R_T + \frac{1}{b^2}\right) + \theta_{y1} \cdot \left(R_T + \frac{1}{b^2}\right) \cdot b_1 \cdot C_1 + \theta_{y2}}{1 + b_1 \cdot \left(R_T + \frac{1}{b^2}\right) \cdot C_1}, \quad (18)$$

$$\theta_1 = \frac{I^2 \cdot R_k + b_1 \cdot C_1 + \theta_{y1} \cdot K}{b_2} + \theta_{y2} - \frac{b_1 \cdot C_1 + \theta_{y1}}{b_2}, \quad (19)$$

$$R_k = P \cdot 0,5, \quad (20)$$

$$R_m = \rho \cdot \lambda \cdot R_k. \quad (21)$$

где  $K = 0,16 \cdot 10^{-3}$ -для серебра –коэффициент, зависящий от материала контакта, Н·Ом;

$P$ -усилие нажатия на контактный мостик, Н.

Кривая нагрева электрического аппарата определяется соотношением [ 3 ]:

$$\theta = \theta_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (22)$$

где  $\theta_{уст}$ -установившаяся температура нагрева аппарата, °С;

$\theta_0$ -начальная температура окружающей среды, °С;

$T$ -постоянная времени нагрева.

Постоянная времени нагрева определяется выражением:

$$T = \frac{G \cdot C}{S \cdot \alpha} \quad (23)$$

где  $G$ -масса контактной системы, кг;

$C$ -удельная теплоёмкость материала контактов, Дж/(кг·К);

$S$ -площадь поверхности, с которой отдаётся теплота, мм<sup>2</sup>;

$\alpha$ - коэффициент теплоотдачи.

Задача расчёта сводится к определению температуры нагрева контактов шунтирующего выключателя в установившемся режиме постоянной времени

его нагрева, построению кривой и определению по этой кривой, исходя из заданного времени работы выключателя по техническому заданию, температуры контактов аппарата.

Эти температуры не должны превышать допустимых пределов: для серебряных контактов-200°С.

Исходя из требований техники безопасности электроустановок и эксплуатации силовых шунтирующих выключателей, следует, что нагрев токоведущих элементов выключателя можно ограничить до 100°С.

#### 2.4 Формуляр теплового расчёта шунтирующего выключателя на ток 150 кА

«Каждый электрический аппарат можно рассматривать как физическое тело со многими источниками теплоты и различными условиями ее отвода в окружающую среду. Если нагрев, которому подвергается во время работы различные элементы аппарата, превышает определённый предел, это может вызвать их повреждение, вывести из строя другие элементы конструкции» [1].

С этой целью проводится тепловой расчёт электрооборудования. Дабы не допустить работы прибора в критических условиях (Таблица 1).

Таблица 1— Данные по рассчитываемому выключателю (исходные данные)

Определяемая величина	Обозначение	Числовое значение	Размерность
Величина тока через один контактный мостик	$I_1$	5	кА
Площадь сечения контактного мостика	$F_1$	18	см <sup>2</sup>
Периметр сечения контактного мостика	$S_1$	18	см
Длина контактного мостика	$l_1$	8	см
Площадь сечения неподвижного контакта, прилегающего к мостику	$F_2$	18	см <sup>2</sup>
Периметр сечения контакта	$S_2$	18	см
Длина неподвижного контакта	$l_2$	6	см

Продолжение таблицы 1

Определяемая величина	Обозначение	Числовое значение	Размерность
Величина нажатия на один контактный мостик	P	100	H
Коэффициент теплоотдачи с поверхности токоподводов и мостика	$\alpha$	$1 \cdot 10^{-3}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
Теплопроводность: меди сплава Ga-In-Sn	$\lambda_M$ $\lambda_{\text{СПЛ}}$	3,9 3,73	$\frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot ^\circ\text{C}}$ -«-
Температура окружающей среды	$\theta_0$	40	$^\circ\text{C}$
Удельное электросопротивление: меди при: $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ $\theta_1 = 100^\circ\text{C}$ сплава Ga-In-Sn при: $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ $\theta_1 = 100^\circ\text{C}$	$\rho_{0M}$ $\rho_{1M}$ $\rho_{0\text{СПЛ}}$ $\rho_{1\text{СПЛ}}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$ $2,34 \cdot 10^{-6}$ $28,2 \cdot 10^{-6}$ $32,0 \cdot 10^{-6}$	Ом·см то же -«- -«-
Теплоемкость меди	$C_M$	370	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
Площадь поверхности мостикового контактного соединения	$S_2$	500	$\text{см}^2$
Масса мостикового контактного соединения	G	6	кг

Далее производим расчёт величин и продолжаем заполнение таблицы рассчитанными параметрами (Таблица 2).

Таблица 2— Данные по рассчитываемому выключателю (расчётные данные)

Определяемая величина	Обозначение	Числовое значение	Размерность
Вспомогательные соотношения			
$a_1 = \sqrt{\frac{\alpha \cdot S_1}{\lambda_M \cdot F_1}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 18}{3,9 \cdot 18}}$	$a_1$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$\text{см}^{-1}$
$a_2 = \sqrt{\frac{\alpha \cdot S_2}{\lambda_M \cdot F_2}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 18}{3,9 \cdot 18}}$	$a_2$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$\text{см}^{-1}$
$b_1 = \sqrt{\alpha \cdot S_1 \cdot \lambda_M \cdot F_1}$	$b_1$	1,12	Вт/ $^\circ\text{C}$
$b_2 = \sqrt{\alpha \cdot S_2 \cdot \lambda_M \cdot F_2}$	$b_2$	1,12	Вт/ $^\circ\text{C}$
$c_1 = \frac{1 - e^{-a_1 \cdot l_1}}{1 + e^{-a_1 \cdot l_1}} = \frac{1 - e^{-1,6 \cdot 10^{-2} \cdot 8}}{1 + e^{-1,6 \cdot 10^{-2} \cdot 8}}$	$c_1$	0,066	
Теплоемкость меди	$C_M$	370	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{сек}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$



Продолжение таблицы 2

Определяемая величина	Обозначение	Числовое значение	Размерность
Площадь поверхности мостикового контактного соединения	$S_2$	500	$\text{см}^2$
Масса мостикового контактного соединения	$G$	6	кг
Установившаяся температура контактного мостика $\theta'_{y1} = \frac{I_1^2 \cdot \rho_{1M}}{\alpha \cdot S_1 \cdot F_1} + \theta_0$	$\theta'_{y1}$	220	$^{\circ}\text{C}$
Установившаяся температура неподвижного контакта-токоподвода $\theta'_{y2} = \frac{I_1^2 \cdot \rho_{1M}}{\alpha \cdot S_2 \cdot F_2} + \theta_0$	$\theta'_{y2}$	220	$^{\circ}\text{C}$
Электрическое сопротивление контакта $R_K = \frac{K}{0,102 \cdot \rho^{0,5}} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot \theta\right)$	$R_K$	$1,27 \cdot 10^{-6}$	Ом
Тепловое сопротивление контакта $R_T = \frac{1}{\rho_K \cdot \lambda_{СПЛ}} \cdot R_K$	$R_T$	0,01	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$
Средняя температура контактного мостика $\theta'_1 = \frac{I_1^2 \cdot R_K \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot R_T + \frac{1}{b_2}\right)}{1 + b_1 \cdot \left(R_T + \frac{1}{b_2}\right) \cdot c_1} + \frac{\theta'_{y2} \cdot \left(R_T + \frac{1}{b_2}\right) \cdot b_1 \cdot c_1 + \theta_{y2}}{1 + b_1 \cdot \left(R_T + \frac{1}{b_2}\right) \cdot c_1} =$ $= \frac{5000^2 \cdot 1,27 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 0,01 + \frac{1}{1,12}\right)}{1 + 1,12 \cdot \left(0,01 + \frac{1}{1,12}\right) \cdot 0,066} +$ $+ \frac{220 \cdot \left(0,01 + \frac{1}{1,12}\right) \cdot 1,12 \cdot 0,066 + 220}{1 + 1,12 \cdot \left(0,01 + \frac{1}{1,12}\right) \cdot 0,066} =$ $= 248^{\circ}\text{C}$	$\theta'_1$	248	$^{\circ}\text{C}$

Продолжение таблицы 2

Определяемая величина	Обозначение	Числовое значение	Размерность
Средняя температура неподвижных контактов-токоподводов $\theta'_2 = \frac{I^2 \cdot R_K + b_1 \cdot c_1 \cdot \theta'_{y2}}{b_2} + \theta'_{y2} - \frac{b_1 \cdot c_1}{b_2} \theta'_1 =$ $= \frac{5000^2 \cdot 1,27 \cdot 10^{-6} + 1,12 \cdot 0,066 \cdot 220}{1,12} +$ $+ 220 - \frac{1,12 \cdot 0,066}{1,12} \cdot 248 = 244^\circ\text{C}$	$\theta'_2$	244	$^\circ\text{C}$
Перепад температур между мостиком и токоподводами $\Delta\theta' = \theta'_1 - \theta'_2 = 248 - 244 = 4^\circ\text{C}$	$\Delta\theta'$	4	$^\circ\text{C}$
Постоянная времени нагрева $T_1 = \frac{G_1 \cdot C_M}{S_\Sigma \cdot \alpha} = \frac{6 \cdot 370}{500 \cdot 10^{-3}} = 1,25\text{час}$	$T_1$	1,25	час.
На графике (рисунок 5) откладываем среднюю температуру контакта и строим прямую нагрева 1 (без учета теплоотдачи в окружающую среду) и кривую нагрева 2 (с учетом теплоотдачи в окружающую среду). До температуры $100^\circ\text{C}$ контакты нагреваются за время $t_1 = 20$ мин.	$t_1$	20	мин.

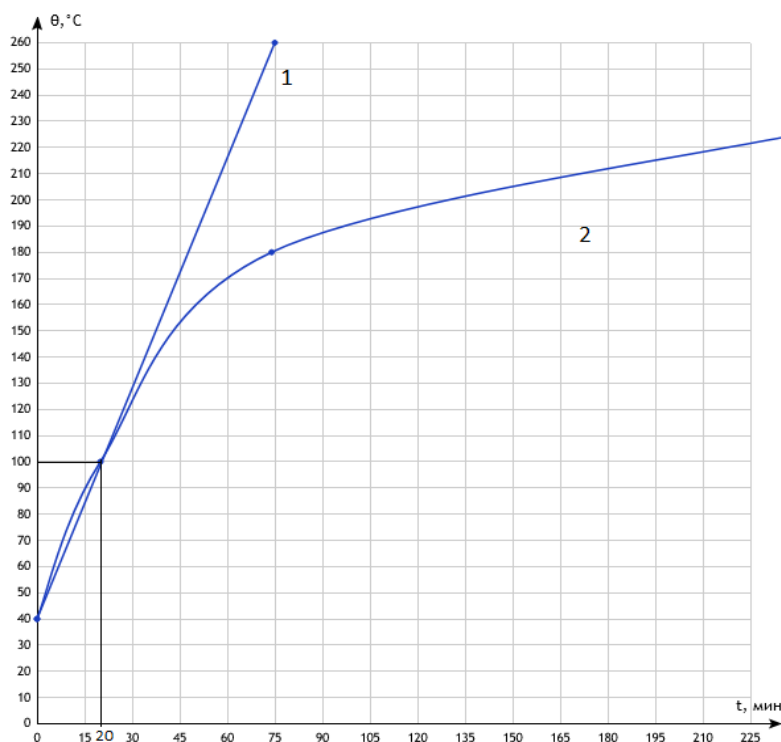


Рисунок 5—Кривые нагрева контактного мостика  
 1—кривая нагрева контактного мостика, 2—токоподвода шунтирующего выключателя

На рисунке 5 приведена кривая нагрева контактного мостика шунтирующего выключателя по выражению (11). Из кривой нагрева следует, что температура контактов шунтирующего выключателя после его включения достигает 100°С за время  $t=20$  минут.

## 2.5 Проверочный тепловой расчёт шунтирующего выключателя на ток 150 кА

Известно, что электрическая мощность, которая выделяется в проводнике при протекании по нему электрического тока, отдаётся в окружающую среду с поверхности этого проводника. Источниками тепла по мимо самих деталей являются места контактирования деталей.

Этот процесс определяется формулой Ньютона [ 3 ]:

$$P = I^2 \cdot R = \alpha \cdot S \cdot \tau, \quad (24)$$

$$\tau = \theta_y - \theta_0. \quad (25)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;

$S$  – площадь поверхности проводника, мм<sup>2</sup>;

$\tau$  – превышение температуры нагрева проводника над температурой окружающей среды, °С.

Отсюда:

$$\tau = \frac{P}{\alpha_1 \cdot S_1} \quad (26)$$

Процесс нагрева определяется соотношением [14]:

$$\theta = \frac{P}{\alpha \cdot S} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (27)$$

Суммарные тепловые потери ШВ определяются:

$$P_{\Sigma} = 2P_I + 6P_M + 12P_{нк} + 24P_c + 24P_k \quad (28)$$

где  $P_I$  – потери в токопроводах,

$P_M$  - потери в неподвижном контактном мостике,

$P_{нк}$  – потери в неподвижном контакте,

$P_c$  - потери в серебряных напайках,

$P_k$  – потери в контактном переходе.

Потери в токопроводах:

$$P_I = I^2 \cdot R_m = 30000^2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-8} = 70 \text{ Вт},$$

$$R_m = \rho \cdot (l_m / S_m) = 2,34 \cdot 10^{-8} \cdot (0,1 / 0,5 \cdot 0,06) = 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}.$$

где  $I_{\Sigma}$  – ток через 1 модуль шунтирующего выключателя, А;

$l_m$  —длинна сечения токопровода, м;

$S_m$  – площадь сечения токопровода, м<sup>2</sup>.

Потери в контактных мостиках:

$$P_M = I_1^2 \cdot R_M = 5000^2 \cdot 10^{-6} = 26 \text{ Вт},$$

$$R_M = \rho \cdot (l_M / S_M) = 2,34 \cdot 10^{-8} \cdot (0,08 / 18 \cdot 10^{-4}) = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

$$S_M = 0,03 \cdot 0,06 = 18 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

где  $I_1$  – ток через 1 мостик, А;

$l_M$  —длинна мостика, м;

$S_M$  —площадь мостика, м<sup>2</sup> (раздел 1).

Потери в неподвижном контакте:

$$P_{нк} = I_1^2 \cdot R_{нк} = 5000^2 \cdot 0,78 \cdot 10^{-6} = 20 \text{ Вт},$$

$$R_{нк} = \rho \cdot (l_{нк} / S_{нк}) = 2,34 \cdot 10^{-8} \cdot (0,06 / 18 \cdot 10^{-4}) = 0,78 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

$$S_{нк} = 0,03 \cdot 0,06 = 18 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

где  $I_I$  – ток через неподвижный контакт, А;

$l_{нк}$  — длина неподвижного контакта, м;

$S_{нк}$  — площадь неподвижного контакта, м<sup>2</sup> (раздел 1).

Потери в серебряных напайках:

$$P_c = I_I^2 \cdot R_c = 5000^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,3 \text{ Вт},$$

$$R_c = \rho_c \cdot (\Delta c / S_c) = 2,09 \cdot 10^{-8} \cdot (10 \cdot 10^{-4} / 18 \cdot 10^{-4}) = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

$$S_c = 0,03 \cdot 0,06 = 18 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

где  $I_I$  – ток через контактный переход, А,

$\Delta c$  — толщина серебряной напайки, мм;

$S_c$  — площадь серебряной напайки, м<sup>2</sup>.

Потери в контактном переходе:

$$P_k = I_I^2 \cdot R_k = 5000^2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6} = 47,5 \text{ Вт},$$

$$P_k = K / 0,102 \cdot F^m = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (29)$$

где  $I_I$  – ток через контактный переход, А (раздел 2.2).

Суммарные тепловые потери:

$$P_{\Sigma} = 2 \cdot 70 + 6 \cdot 26 + 12 \cdot 20 + 29 \cdot 0,3 + 24 \cdot 47,5 =$$

$$= 140 + 156 + 240 + 7,2 + 1140 = 1683,2 \text{ Вт} \approx 1,7 \text{ кВт} \quad (30)$$

Постоянная времени нагрева 1 модуля шунтирующего выключателя:

$$T = (G_{\Sigma} \cdot C) / (S_{\Sigma} \cdot \alpha) \quad (31)$$

где  $G_{\Sigma}$  - масса 1 модуля шунтирующего выключателя, кг;  
 $S_{\Sigma}$  - площадь поверхности 1 модуля выключателя, м<sup>2</sup>;  
 $C$  – теплоёмкость меди, 370 (Вт·с)/(кг·°С);  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, 10 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

$$G_{\Sigma} = 2G_I + 6G_M + 12G_{HK}, \quad (32)$$

$$G = g \cdot (a \cdot b \cdot h) \quad (33)$$

$$G_I = 8,8 \cdot (6 \cdot 50 \cdot 10) = 26400 \text{ г} = 26 \text{ кг},$$

$$G_M = 8,8 \cdot (3 \cdot 6 \cdot 12) = 1900 \text{ г} = 1,9 \text{ кг},$$

$$G_{HK} = 8,8 \cdot (3 \cdot 6 \cdot 7,5) = 1200 \text{ г} = 1,2 \text{ кг},$$

$$G_{\Sigma} = 2 \cdot 26,4 + 6 \cdot 1,9 + 12 \cdot 1,2 = 78,6 \text{ кг}.$$

где  $G_I$  – вес токоподвода, кг;

$G_M$  – вес контактного мостика, кг;

$G_{HK}$  – вес неподвижного контакта, кг;

$g$  – удельный вес меди, 8,8 г/см<sup>3</sup>;

$a$  – длина мостика, см;

$b$  – ширина мостика, см;

$h$  – высота мостика, см.

$$S_{\Sigma} = 2S_I + 6S_M + 12S_{HK} \quad (34)$$

$$S = (a \cdot b) \cdot 2 + (b \cdot h) \cdot 2 + (a \cdot h) \cdot 2 \quad (35)$$

$$S_I = (50 \cdot 6) \cdot 2 + (10 \cdot 50) \cdot 2 + (6 \cdot 10) \cdot 2 = 1720 \text{ см}^2 = 0,172 \text{ м}^2$$

$$S_M = (3 \cdot 6) \cdot 2 + (3 \cdot 12) \cdot 2 + (6 \cdot 12) \cdot 2 = 252 \text{ см}^2 = 0,0252 \text{ м}^2$$

$$S_{HK} = (3 \cdot 6) + (3 \cdot 7,5) + (6 \cdot 7,5) \cdot 2 = 130 \text{ см}^2 = 0,013 \text{ м}^2$$

$$S_{\Sigma} = 2 \cdot 0,172 + 6 \cdot 0,0252 + 12 \cdot 0,013 = 0,651 \text{ м}^2$$

$$T = (78,6 \cdot 370) / (0,651 \cdot 10) = 4467 \text{ сек} = 1,25 \text{ час}. \quad (36)$$

где  $S_I$  – площадь поверхности токоподвода шунтирующего выключателя, м<sup>2</sup>;

$S_M$  – площадь поверхности подвижного мостика, м<sup>2</sup>;

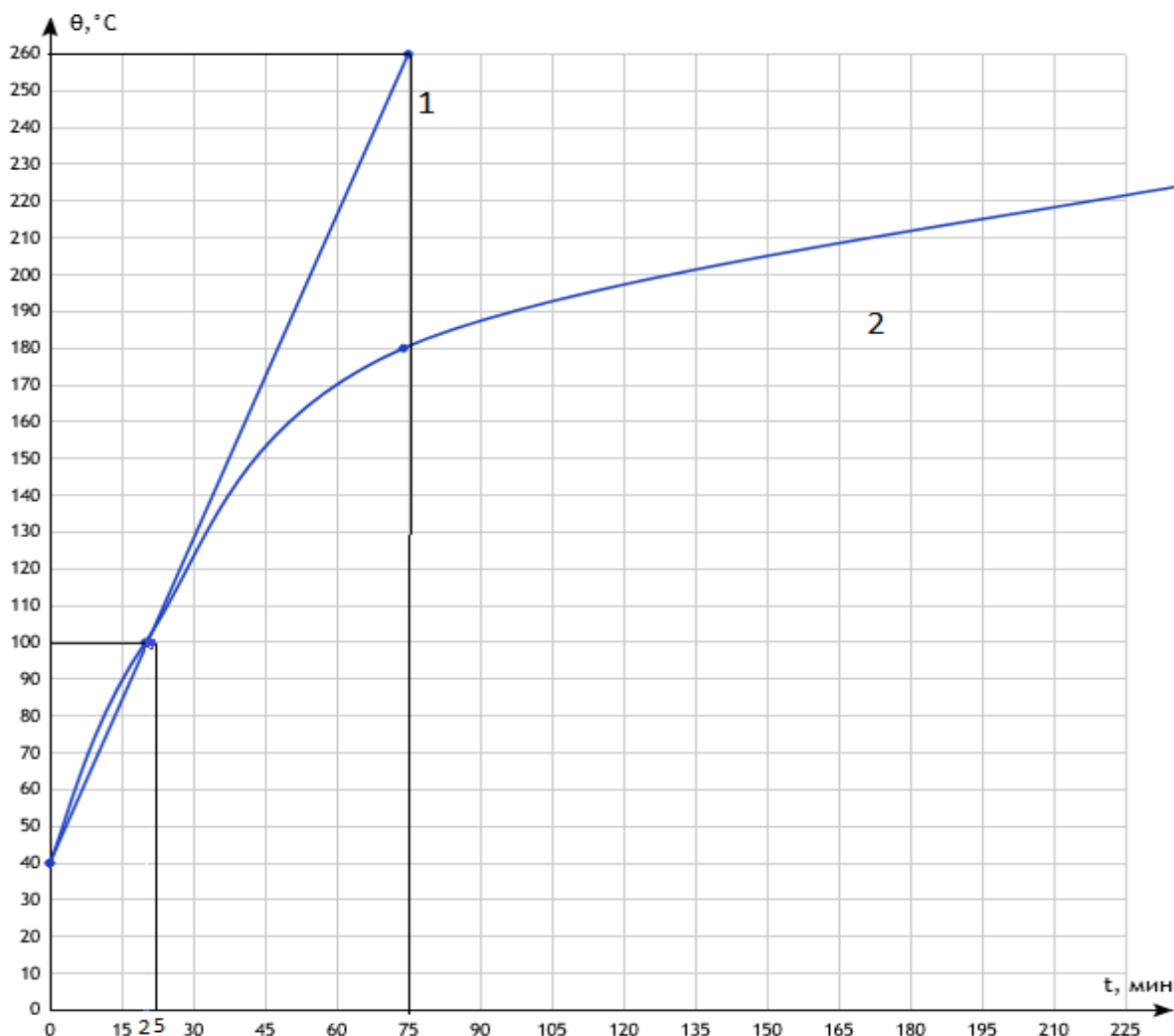
$S_{HK}$  – площадь поверхности неподвижного контакта, м<sup>2</sup>.

На рисунке 6 приведена кривая нагрева одного модуля шунтирующего выключателя по выражению (27).

Из кривой нагрева следует, что температура модуля шунтирующего выключателя после его включения достигает  $100^{\circ}\text{C}$  за время  $t = 25$  мин.

Из сравнения рисунков 5 и 6 следует, что обе кривые нагрева (контактного мостика и модуля шунтирующего выключателя) практически совпадают.

Таким образом проверочный тепловой расчёт подтвердил правильность теплового расчёта нагрева контактов шунтирующего выключателя.



1—кривая нагрева контактного мостика, 2—одного модуля шунтирующего выключателя

Рисунок 6—Кривые нагрева одного модуля шунтирующего выключателя

Вывод:

Предварительный расчёт сечений токоведущих контуров и тепловой расчёт контактов «шунтирующего выключателя на ток 150 кА» [21] показал:

— «шунтирующий выключатель на ток 150 кА» [21] может быть выполнен из пяти параллельно соединённых модулей, имеющих общий приводной механизм;

— каждый модуль шунтирующего выключателя имеет два полюса – токоподвода сечением  $60 \times 500$  мм, каждый из которых имеет шесть неподвижных контактов с сечением  $30 \times 60$  мм;

— шунтирующий выключатель подключается параллельно шунтирующим ножам в местах соединения пяти ножей с шунтирующей электролизёр ошиновкой;

— шунтирующий выключатель находится под токовой нагрузкой в течении 20 – 30 мин. За это время подключаются оставшиеся 5 ножей шунтирующей ошиновки.

Шунтирующий выключатель может быть отключён и на его место устанавливаются остальные 5 ножей шунтирующей ошиновки. За время 20 – 30 мин. контакты шунтирующего выключателя нагреваются до температуры 100 – 120 °С, что допустимо по ГОСТ и технике безопасности.



### **3 Расчёт электродинамической стойкости шунтирующего выключателя на ток 150 кА**

#### **3.1 Основные соотношения**

«Электрический ток — это направленное движение зарядов. Носителями тока в проводниках первого рода (металлах) являются электроны, в проводниках второго рода (электролитах, то есть водных растворах солей, кислот и оснований, а также расплавов солей) — положительные и отрицательные ионы. Прохождение тока по металлам не сопровождается химическими изменениями, в электролитах ток вызывает явление электролиза» [10]

Электродинамические силы между токоведущими элементами электрического аппарата «возникают при протекании по ним» [21] электрического тока (закон Био – Савара – Лапласа).

В шунтирующем выключателе электродинамические силы возникают как между главными контактами, так и между дугогасительными контактами.

Поскольку число параллельно включённых главных контактов шунтирующего выключателя составляет – 30, а дугогасительных – 10, то в худшем положении с точки зрения электродинамической устойчивости оказываются дугогасительные контакты, так как через один дугогасительный контактный мостик протекает ток в момент коммутации в три раза больший, чем через контактный мостик главных контактов.

В следствии этого, расчёт электродинамической устойчивости проводится для дугогасительной контактной системы, (рисунок 9).

На рисунке 7 изображены силы, «воздействующие на контактные мостики» [23].

$I$  – токоподводы шунтирующего выключателя;

$2$  – контактный мостик;

$P$  – вес подвижного контактного мостика, Н;

$F_{кп}$  – усилие контактной пружины, Н;

$F_{эдo}$  – электродинамическое усилие (ЭДУ) отброса контактов, Н;

$F_{рез}$  – электродинамическое усилие (ЭДУ) результирующее, Н.

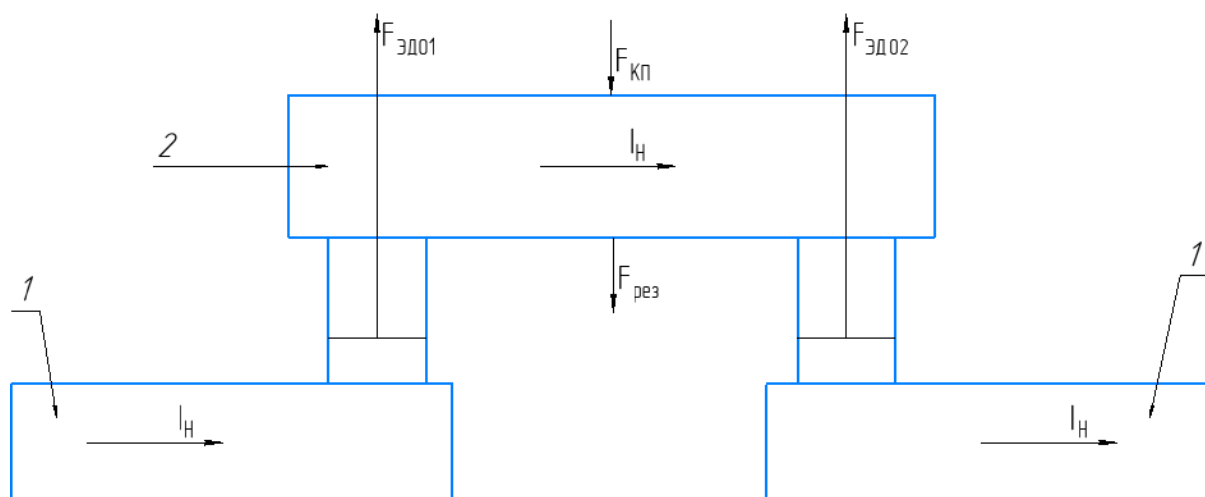


Рисунок 7—Схема сил, действующих на контакты дугогасительной системы шунтирующего выключателя.

«Исходя из конструкции дугогасительной контактной системы» [25], шунтирующего выключателя, формула для определения результирующей силы будет иметь вид:

$$F_{рез} = F_{кп} - 2 \cdot F_{эдo} + P, \quad (37)$$

$$F_{эдo} = [(10^{-7}/2 \cdot n) \cdot I_1^2] \cdot [\ln (S_k \cdot \sigma) / F_{кп}], \quad (38)$$

$$P = [g \cdot (S_m \cdot a)] \cdot k. \quad (39)$$

где  $I_1$  – ток, протекающий через один контактный мостик, А,

$n$  – число контактных площадок,

$S_k$  – кажущаяся площадь контактной поверхности, м<sup>2</sup>,

$\sigma$  – предел прочности материала контакта смятию, Н/м<sup>2</sup>,

$g = 880$  кг/м<sup>3</sup> – плотность материала, меди,

$S_m$  – площадь сечения контактного мостика, м<sup>2</sup>,

$k = 9,8$  – коэффициент перевода кг в Н.

При плоскостном контакте число контактных площадок будет равняться трём. Далее производим расчёт силы ЭДО контактов и результирующих сил, действующих на контактный мостик по приведённой выше формуле.

### 3.2 Расчётный формуляр

Посчитаем электродинамическую стойкость шунтирующего выключателя и подведём итоги по данной главе. Для этого сведём все полученные данные в расчётный формуляр (Таблица 3) для удобства восприятия и обработки информации.

Таблица 3 — Расчётный формуляр

Наименование величины	Обозначение	Числовое значение	Размерность
Исходные данные			
Сила нажатия на контакты	$F_{кп}$	400	Н
Кажущаяся контактная площадь	$S_k$	600	мм <sup>2</sup>
Коэффициент смятия материала контакта	$\sigma$	$3,5 \cdot 10^4$	мм <sup>2</sup>
Ток, протекающий через один контактный модуль выключателя	$I_M$	30000	А
Вес контактного мостика	$P$	20	Н
Расчётные величины			
Ток, протекающий через один дугогасительный контактный мостик $I_1 = I_M/2 = 15000 \text{ А}$	$I_1$	15000	А

Действительная площадь контактной площадки:

$$S_D = \sqrt{\frac{F_{КП} \cdot \pi}{\sigma}} = \sqrt{\frac{400 \cdot 3,14}{3,5 \cdot 10^4}} = 19 \cdot 10^{-2} = 0,19 \text{ см}^2 \quad (40)$$

Электродинамическая сила отброса контактов:

$$F_{ЭДО} = 10^{-7} \cdot \frac{I_1^2}{n} \cdot \ln \frac{S_K}{S_D} = 10^{-7} \cdot \frac{15000^2}{3} \cdot \ln \frac{6}{0,19} = 25,9 \text{ Н} \quad (41)$$

Результирующая сила, действующая на контактный мостик:

$$F_{РЕЗ} = F_{КП} + P - 2 \cdot F_{ЭДО} = 400 + 20 - 2 \cdot 25,9 = 368,2 \text{ Н} \quad (42)$$

Из расчета видно, что результирующая сила  $F_{РЕЗ}$  превышает нулевое значение ( $F_{РЕЗ} = 368,2 \text{ Н}$ ).

Вывод:

Таким образом, можно сделать вывод о том, что «шунтирующий выключатель на ток 150 кА» [21] обладает достаточной электродинамической стойкостью.

«Однако, рассматривая электродинамические силы в контактах, следует иметь в виду, что эти силы не всегда определяются достаточно точно. Площадь соприкосновения в месте контакта в процессе прохождения тока, а уменьшается при увеличении электродинамических сил.

При коротком замыкании в сети через токоведущую часть аппарата могут протекать токи, в десятки раз, превышающие номинальные. Эти токи, взаимодействуя с магнитным полем, создают электродинамические усилия, которые стремятся деформировать проводники и изоляторы, на которых они

крепятся. В некоторых случаях величина электродинамического усилия может достигать десятков тонн, при этом возможно разрушение аппарата.

Кроме продольных сил на контактный перешеек действуют радиальные силы. Согласно положениям теории упругости материалов, возможные радиальные деформации перешейка вызывают появление дополнительных осевых сил. В результате сложная деформация перешейка во взаимно перпендикулярных направлениях в сочетании со значительными тепловыми нагрузками может привести к его разрушению. Таким образом, возникающие в зоне контакта силы находятся в сложном взаимодействии и получаемые расчётные значения электродинамических сил в контакте следует рассматривать как приближённые» [18].

## Заключение

В результате не большого анализа, проведённого с целью выявить недостатки Российской производства высоковольтных приборов и аппаратов для нужд промышленного производства металлов путём электролиза, был разработан, рассчитан и спроектирован БШВС—1500—Большой Шунтирующий Выключатель Сильноточный на ток 150 кА.

Преимущества шунтирующего выключателя:

— все детали шунтирующего выключателя имеют простую конструкцию, технологичны в изготовлении и не требуют сложного производственного оборудования, то есть шунтирующий выключатель можно изготовить непосредственно в механических цехах самих химических предприятий,

— шунтирующий выключатель имеет небольшие габаритные размеры и требует небольшие усилия на включение и отключение, что упрощает работу обслуживающего персонала,

— в конструкции шунтирующего выключателя не предусмотрено применение трансформаторного масла и водяного охлаждения, что исключает его пожароопасность и решает вопрос о применении его при получении алюминия, так как при получении алюминия применение использование воды не допускается из-за возможности взрыва.

Помимо этого, электролизный цех по производству алюминия будет запитываться от действующей электроэнергетической системы согласно следующей схеме—Чертёж 6. Даная схема является принципиальной и так же требует расчёта, согласно установочных данных.

В шунтирующем выключателе предусматривается применение пневматического устройства для замыкания и размыкания контактов устройства. Пневматическое устройство имеет простую конструкцию и высокое быстродействие. Из любой полости пневматического устройства можно обеспечить истечение сжатого воздуха в атмосферу. Недостатки

пневматического устройства связаны со сжимаемостью газа, как рабочей среды.

Помимо этого, выключатель предусматривает наличие предохранительных систем, обеспечивающих надёжную установку в двух крайних положениях—включённом или выключенном, и не допускающим самопроизвольного перевода из одного положения в другое.

В процессе разработки выключателя был произведен короткий обзор существующего высоковольтного оборудования (в том числе и зарубежного) с целью использования его в процессе электролизного производства алюминия. Было выявлено, что аналогов у данного выключателя не имеется.

Так же был произведён расчёт основных технических характеристик выключателя, выбор концепции изготовления, произведён тепловой расчёт основных токоведущих частей выключателя и выполнен расчёт электродинамической стойкости прибора.

По результатам вышеперечисленных расчётов данный выключатель имеет удовлетворительные характеристики и может быть предложен для создания и применения по прямому назначению.

## Список используемой литературы

1. Александров Г.Н. Учебник для вузов/, В. В. Борисов, Г. С. Каплан и др.; Под ред. Г. Н. Александрова. — Л.: Энергоатомиздат. Ле-нингр. отд-ние, 1985г. — 448 с, ил.
2. Алексеева Б.А. Объём и нормы испытаний электрооборудования/под общ. Ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. -6—е изд., с изм. И доп.-М.: ЭНАНС, 2014.-256 с. ISBN 978—4248—0032—0
3. Алиев И.И. Электроника и электрооборудование. Справочник: Учеб. Пособие для вузов/И.И, Алиев.-Саратов: Издательство «Вузовское образование», 2014. -(Высшее образование). -1199 с. Док. опубл. не был.-Доступ с сайта ЭБС IPRbooks.
4. Буткевич Г.В. Основы теории электрических аппаратов Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. — 116 с. — ISBN 978-5-7638-3024-8
5. Дрозд В.В. Релейная защита и автоматика в электрических сетях. /—М.: «Издательство «Альвис», Москва 2012 632 с ISBN 978—5—904098—21—6
6. Ейльман Л.С. Проводниковые материалы в электротехнике. «Энергия» 1974 г.
7. Коростелев Ю.С. Электродинамика — это просто: учебное пособие для самостоятельной работы студентов/Ю.С. Коростелев, А.В. Пашин; Самарск. гос. арх.- строит. ун—т.-Самара, 2010.-137 с.
8. Павлович С.Н. Ремонт и обслуживание электрооборудования: учеб. Пособие / С.Н. Павлович, Б.И. Фигаро. — 4—е изд. — Минск: Выш. Шк., 2009.-245 с.; ил.-опубл. 31.04.2014.-Электрон. Версия печ. Публ.-Доступ с сайта ЭБС IPRbooks ISBN 978—985—06—1688—3
9. Петренко Ю.В. Теоретические основы электротехники. Физические основы теории электрических цепей и методы их расчёта: учебное пособие/



Ю.В. Петренко.-Новосибирск: Издательство НГТУ, 2022.-132 с. ISBN 978—5—7782—4677—5.

10. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 18, [1] с. – ISBN 978-5-16-101150-8.

11. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей. СО 34.04.181—2003—М.: ООО «Издательство «Альвис», 2013.-200 с. ISBN 978—5—98908—105—9.

12. Разумовская И.В. Физика твёрдого тела. Ч.2. Динамика кристаллической решётки. Тепловые свойства решётки.-М.: МПГУ, 2011.- 64 с ISBN 978—5—4263—0032—3.

13. Симонов. Н.С. Начало электроэнергетики Российской Империи и СССР, как проблема техноценоза / Н.С. Симонов.-Москва: Инфра—Инженерия, 2017.-640 с. ISBN 978—5—9729—0143—2

14. Синюкова Т.В. Проектирование систем электроснабжения: учебное пособие—Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2020.-49 с. ISBN 978—5—00175—025—3

15. Тюков В.А. Теплопередача, вентиляционные и тепловые расчёты в электромеханике: учеб. Пособие / А.В. Тюков, Т.В. Честюнина, Ю.Г. Бухтольц.-Новосибирск: Изд—во НГТУ, 2013.-248 с. ISBN 978—7782—2333—2

16. Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики: учебное пособие/В.Я. Ушаков; Томский политехнический университет.-Томск: Изд—во Томского политехнического университета, 2014.-447 с. ISBN 978—5—4387—0521—5

17. Шустов М.А. Основы силовой электротехники. «Наука и техника» 2019 г. ISBN 978-5-94387-890-9

18. Яблоков В.А. Химия. Получение и превращение вещества и энергии: учебное пособие/В.А. Яблоков, Нижегород. Гос. архитектур.-строит. Ун—т.-Н. Новгород: ННГАСУ, 2011.-192 с. ISBN 978—8114—0829—0.

19. Сайт завода—изготовителя выключателя В—61 URL: <https://www.kontaktor.ru/production/elektroapparatura-spetsialnogo-naznacheniya/elektroapparatura-tipa-v61/.html> (дата обращения 20.03.2023)

20. Технические характеристики выключателя В—16 URL: [https://ngv.ru/news/v61\\_unikalnyy\\_vyklyuchatel\\_dlya\\_khimicheskoy\\_promyshlennosti/.html](https://ngv.ru/news/v61_unikalnyy_vyklyuchatel_dlya_khimicheskoy_promyshlennosti/.html) (дата обращения 07.03.2023).

21. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкций многоамперных электрических аппаратов: Учебное пособие. - СПб.: СЗТУ, 2005. - 274 с. URL: <http://window.edu.ru/resource/969/24969/files/nwpi056.pdf>. (Дата обращения 17.02. 2023).

22. Беляев В.Л. Многоамперные электрические аппараты и токоведущие системы постоянного тока. Разработка основ теории и проектирования : диссертация ... доктора технических наук : 05.09.01 URL:<http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002636000/rsl01002636298/rsl01002636298.pdf>. (Дата обращения 7.12.2022).

23. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкций многоамперных электрических аппаратов: Учеб.пособие. – СПб.: СЗТУ, 2005. – с. URL: <http://window.edu.ru/resource/969/24969/files/nwpi056.pdf>. (Дата обращения 13.04.2023).

24. Особенности работы и конструкций многоамперных электрических аппаратов: Учебное пособие \* Единое окно доступа к образовательным ресурсам. URL: <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/969/24969/7582/page7>. (Дата обращения 29.03.2023).

25. Беляев В. Л. Многоамперные электрические аппараты и токоведущие системы постоянного тока. Разработка основ теории и проектирования : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.01 : Москва, 2003 440 с. РГБ ОД, 71:05-5/101 URL: <http://www.dslib.net/elektro-mashyny/mnogoampernye-elektricheskie-apparaty-i-tokoveduwie-sistemy-postojannogo-toka.html#2> (Дата обращения 12.04.2023).