

Аннотация

В выпускной квалификационной работе разработан высоковольтный статический электромагнитный преобразователь электроэнергии ТДН-10000/220. В пояснительной записке произведен расчет всех основных параметров электромагнитного преобразователя энергии. Электромагнитный расчет включает в себя: расчет сечения стержня, количества витков, напряжений и токов, произведен выбор основных типов обмоток и рассчитаны их основные параметры. В разделе «Тепловой расчет» рассчитаны превышения температуры центров электромагнитного преобразователя энергии над воздухом и маслом, произведен выбор охладителей и вентиляторов, а также произведен электродинамический расчет.

Объем пояснительной записки 51 лист. Графическая часть проекта представлена 6 чертежами формата А1.

Содержание

Введение	5
1 Состояние вопроса	8
2 Техничко-экономический расчет оптимального варианта	14
3 Электромагнитный расчет	20
3.1 Построение и расчет активного сечения стержня магнитопровода	20
3.2 Расчет напряжения одного витка, количества витков, напряжений и токов на всех ответвлениях центра РО	23
3.3 Выбор типа и расчет параметров концентров электромагнитного преобразователя энергии	26
3.4 Расчет потерь короткого замыкания	32
3.5 Расчет напряжения короткого замыкания	38
3.6 Расчет потерь и тока холостого хода	38
4 Тепловой расчет электромагнитного преобразователя энергии	40
4.1 Расчет превышения температуры катушки над маслом	40
4.2 Расчет превышения температуры масла над воздухом	41
4.3 Расчет количества радиаторов охлаждения	42
4.4 Выбор вентиляторов	43
5 Расчет динамической стойкости электромагнитного преобразователя энергии при коротком замыкании	44
5.1 Кратности амплитуды ударного тока короткого замыкания по отношению к номиналу	44
5.2 Ударный ток короткого замыкания, проходящий через каждый виток в катушки концентров ВН и НН	44
5.3 Расчет механических напряжений в концентрах от радиальных сил	44
5.4 Расчет механических напряжений в концентрах от осевых сил	45
5.5 Проверка механической прочности концентров	46
5.6 Расчет заземления участка сборки остова электромагнитного преобразователя энергии	47

Заключение	49
Список использованных источников	50

Введение

В наши дни электроэнергия для промышленных предприятий и электроснабжения производится на ТЭЦ, ГЭС и АЭС в виде трехфазной системы переменного тока частотой 50Гц.

Основная часть энергопотребления – в основном, это огромные производственные центры по всей России, чаще всего такие производственные предприятия удалены от электростанций на огромные расстояния особенно в такой большой, по площади, стране. Однако, в системе: производство - доставка - потребление энергии, есть и промежуточные этапы, необходимо распределять и преобразовать электроэнергию, чтобы она подошла каждому потребителю, будь то гигантские станки на производстве, или самые маленькие бытовые электроприборы. В этих промежуточных этапах преобразования и распределения электроэнергии важную часть занимают трансформаторы.

Высоковольтный статический электромагнитный преобразователь электроэнергии (трансформатор) имеет широкое применение в текущих энергетических сетях. Транспортировка электроэнергии на большие дистанции от источников до потребителей, в текущих средствах передачи электроэнергии, необходимо 500-600% трансформации напряжения в повышающих или понижающих статических электромагнитных преобразователях электроэнергии.

Для уменьшения потерь при работе электрической сети и при этом получения необходимых характеристик электроэнергии, используемой потребителями, а точнее для поддержания установившегося значения напряжения в разные периоды времени, появилась нужда в создании ряда трансформаторов с изменением напряжения без отключения питания самого устройства. Сформировавшимися эталонами и ГОСТами предусматривается производство всех понижающих статических преобразователей энергии разных классов напряжения с изменением напряжения без отключения питания самого устройства. В трансформаторах, где 2 или 3 катушечных концентра, зачастую,

коэффициент трансформации изменяется посредством переходу к другим ответвлениям в линии нейтрали катушечного центра высшего напряжения.

Отношение полезной мощности к затраченной трансформатора очень велико по сравнению с другими устройствами особенно механическими и составляет около 96-99%, но потребность в большом коэффициенте трансформации электроэнергии и применение ее в энергосетях, рабочая мощность которых, в разы больше мощности подаваемых от источника, часто заканчивается тем, что общие потери электроэнергии в системе из нескольких таких преобразователей могут быть существенными. Из-за чего очень важной задачей на данный момент является снижение затрат электроэнергии в статических электромагнитных преобразователях электроэнергии, следовательно, надо уменьшить потери от холостого хода в стали устройства и потерь на короткое замыкание в катушечных центрах устройства.

Потери в стали преобразовательного устройства - это статические потери энергии, которые присутствуют в устройстве при его работе. Потери в катушечных центрах (нагрузочные) зависят от величины тока нагрузки и времени работы трансформатора в разное время дня, недели, месяца и т.д.

Снижение затрат энергии в стали за все время развития электромагнитных преобразователей энергии, в основном, производили за счет развития материалов, на данный момент все более широкое применение находит специально произведенная сталь с улучшенными характеристиками – малыми и особо малыми удельными потерями и небольшой удельной намагничивающей мощностью. Для снижения затрат энергии в стали трансформатора используется схема шихтовки «Step Lap», где все листы укладываются со скошенными соединениями в углах, со смещением стыков пластин. Для уменьшения трудоёмкости нарезка пластин осуществляется на автоматической линии «Georg», что также улучшает качество среза и уменьшает потери.

Современные структуры магнитных систем характеризуются применением скошенных соединений листов в углах системы, стяжкой

стержней и ярм кольцевыми бандажами вместо сквозных шпилек в старых конструкциях и многоступенчатой формой сечения ярма в плоских магнитных системах. Прямоугольный бак позволяет автоматизировать раскрой и сварку бака, сократить время его изготовления в разы и повысить надёжность. Использование панельных радиаторов позволяет уменьшить объём заливного масла, снизить уровень шума.

Целью выпускной квалификационной работы является проектирование электромагнитного преобразователя энергии ТДН-10000/220-У1 с меньшим расходом активных материалов и более низким уровнем основных видов потерь.

1 Состояние вопроса

Усовершенствование создания электромагнитных преобразователей, всех электромеханических преобразователей и устройствах очень связаны с улучшением материалов и их промышленного применения, проводящих и изолирующих материалов. При этом проблемы, поставленные перед производителями электромагнитных преобразователей, обязывают от связанных направлений промышленности проработки и создания, современных улучшенных материалов специального назначения.

Розыск будущих материалов обычно необходим для улучшения характеристик электромеханических преобразователей энергии, снижения габаритов устройства, улучшение показателей надежности. Например, в середине 20 века на потери в электромеханических преобразователях энергии использовалось примерно до 5-7% всей энергии, получаемой источниками. В сериях электромеханических преобразователей энергии, произведенных в наше время, потери х.х. уменьшились до 50%, а потери К.З. не более 30% , но так как происходит увеличение количества этапов переходов энергии в энергоструктурах, а так же увеличение потребление энергии, итоговые потери в электромеханических преобразователях энергии практически не изменились.

В конструктивном отношении на данный момент электромеханический преобразователь энергии, используемый для изменения характеристик электроэнергии, называемый силовым, возможно схематично изобразить в виде трех основных структур: магнитопровода, концентроров, включая изоляцию и систему охлаждения, а также дополнительных структур, например, аппараты изменения напряжения, измерительных приспособлений датчиков, САУ, и предохраняющих аппаратов, различных частей, и др.

Материалы, используемые при производстве электромеханических преобразователей энергии, выделяют на активные, т.е. металл магнитопровода, провода концентроров, вводы и отводы; и изоляционные, используемые при создании изоляции концентроров, а также прочих элементов

электромеханических преобразователей энергии, типа электроизоляционного картона, фарфора, дерева, специальные масла и др. Конструкционные элементы, используемые при производстве бака, большого количества фиксирующих элементов и т.д., другие материалы, используются в относительно скудных объемах. Использование материала способно влиять на план производства электромеханических преобразователей энергии и их структуры. Замена активных или изоляционных элементов прочими обычно приводит к заметной перестройке структуры и технологии производства электромеханических преобразователей энергии.

Исследования современных типов электромеханических преобразователей энергии с уменьшенными потерями х.х. происходит с помощью использования электротехнической, холодной прокатки, магнитоориентированной листовой рулонной стали марок 3408, 3409 и др. по гос. стандарту, позволяющий использовать магнитную индукцию до 1,6-1,7Тл.

Тонколистовая электротехническая сталь получается одним из самых важных активных материалов электромеханических преобразователей энергии.

В прошлом довольно долго для магнитных элементов электромеханических преобразователей энергии использовали листовую сталь горячей прокатки с толщиной листов 0,5 или 0,35мм. Характеристики такого материала со временем развивали, но потери в ней по-прежнему оставались высокими.

Создание в конце 40-х годов холоднокатаной текстурованной стали, т.е. стали с заранее направленной ориентацией зерен (кристаллов), получают гораздо меньшие удельные потери и более значимую магнитную проницаемость, открыло возможность увеличить индукцию в магнитной системе до 1,6 – 1,7 Тл против 1,4 – 1,45 Тл для горячекатаной стали и значительно снизить расход активных материалов при этом так же сокращая затраты энергии в электромеханических преобразователях энергии. Так же одновременно происходит сокращение использования материалов в остальных частях электромеханических преобразователей энергии: в изолирующих,

конструкционных, уменьшается использование жидкого или газообразного диэлектрика и т.д.

Использование стали холодной прокатки влечет за собой уменьшение размеров бака, а также есть возможность нарастить мощность электромагнитного преобразователя энергии на одну единицу, что очень важно для электромагнитного преобразователя энергии высоких классов мощностей и напряжений, габариты и граничные размеры которых, устанавливаются заказчиками в связи с условиями транспортировки.

Очень важное свойство стали холодной прокатки – это изменение ее магнитной ориентации, т.е. явно выраженная ориентация магнитных моментов во многих путях внутри стальной пластины. Лучшими магнитными показателями (малые потери на единицу мощности и максимальную магнитную проницаемость) такая сталь обладает только в направлении прокатки. Магнитные свойства заметно уменьшаются, если вектор индукции магнитного поля будет отклонен от угла прокатки, на значительную величину, и проявляются, наименьший показатель будет, при угле в 90.

Схема магнитопровода электромагнитного преобразователя энергии с учетом направления прокатки магнитных свойств стали холодной прокатки обязана быть собрана при соблюдении условия что, во всех ее магнитных элементах вектор индукции магнитного поля совпадал, с направлением ориентации магнитных моментов в стали. Данная проблема не может быть решена только с помощью использования стали с ограничениями размеров листов. Поставка большинства производимой стали холодной прокатки в рулонах с длиной полосы от 1000 до 2000 м может позволить сделать на специальных станках пластины нужной длины и производить магнитопровод электромагнитных преобразователей энергии, соответствующие данным требованиям.

Применение вместо листовой стали, рулонной, оказала большое влияние на технологию создания пластин магнитопровода с заметным сокращением использования ручного труда в данном технологическом процессе. Некоторые

части магнитопровода могут создаваться из рулонной стали с помощью навивки из ленты. Использование данной стали позволяет так же сократить отходы при нарезке стальных пластин до 4-5% по сравнению с отходами стали листовой, составляющими 15-20%.

Магнитные свойства стали холодной прокатки значительно изменяются при различных механических воздействиях: при разделке стали на пластины, удалении неровностей, перегибы пластин, случайных ударах при перемещении, слабых ударах при производстве магнитопровода и т.д. Особое влияние имеет на магнитные свойства, навивка частей магнитной системы из лент. Изменение в плохую сторону магнитных свойств при данных воздействиях возможно убрать при восстановительном отжиге при температуре 8000С, который производится до того как магнитопровод соберут окончательно, а для навитых частей после навивки. Механические воздействия, которые появляются при сборке, необходимо ограничить с помощью специального перемещения магнитных элементов, аккуратного их использования при производстве магнитопровода и т.д.

Однако при таких сложностях проблемах магнитоориентированной стали и ее значительную цену, электромагнитные преобразователи энергии с правильно сконструированном магнитопроводе из этой стали при правильной технологии ее производства получают сравнительно уменьшенные потери, а также токи холостого хода, что позволяет сэкономить в использовании активных и других. Именно из-за этого в течение 40 лет все создаваемые в СССР, а затем в РФ серии электромагнитных преобразователей энергии проектируются из расчета применения магнитоориентированной стали лучших марок с толщиной 0,35; 0,30 и 0,27мм.

Второй активный материал электромагнитного преобразователя энергии, из которого изготавливаются концентры – это медь. Очень низкое удельное электрическое сопротивление, легкость обработки (намотки, пайки), коррозионная устойчивость и удовлетворяющая механическая прочность

электрической меди оставили ее почти без конкурентов при выборе материалов для электрических концентроров электромагнитного преобразователя энергии.

В электромагнитном преобразователе энергии, рассматриваемом в данной работе, используется непрерывный тип катушек, являющихся более современной. Концентр данного типа получил свое именование от способа ее производства без разрыва, т.е. переход между секциями производится непрерывно, без паяк. Достигается это переключением витков половины итогового числа витков (чаще всего нечетных) так, чтобы один переход из секции в секцию был наружный, а второй внутренний.

В непрерывном концентре бывает 1 - 6 параллельных идущих проводов в секции. Использование такой связки проводов уменьшает вихревые токи в концентрорах, а также упрощает намотку проводов т. к. вместо одного большого провода используется некоторое количество тонких.

В непрерывном концентре нижняя часть наиболее большая по площади по сравнению с верхней. Делается это потому, что в нижней части более высокая стойкость по отношению к осевым усилиям к.з. При этом в непрерывных катушках больше поверхность охлаждения. Также охлаждение электромагнитного преобразователя улучшается с помощью использования радиаторов.

При конструировании электромагнитных преобразователей энергии обычно ставится ограничение добавочных потерь, которые появляются от вихревых токов, которые создаются в маслобарьерном промежутке вблизи концентроров их магнитным полем, а также в учет идут потери в конструкциях и гистерезиса, появляющихся в частях электромагнитного преобразователя энергии. Данные потери в итоге, получаются около 30% полных потерь к.з.

В качестве самых значительных средств для снижения добавочных потерь используют метод специального размещения витков концентроров, чтобы снизить поперечную (рациональную) часть поля рассеяния, специальное ограничение поля рассеяния с применением магнитных экранов из специальной стали и использования вместо части стальных деталей, элементами из

немагнитных материалов. Позже часто значительное решение данного недостатка может быть сделано с помощью замены стальных деталей, в которых появляются потери от гистерезиса, а также от вихревых токов, немагнитными или элементами из диа или парамагнетиков.

Таким образом, для достижения поставленной цели в выпускной квалификационной работе решить следующие задачи:

- Провести анализ аналогичных трансформаторов
- Использовать холоднокатаную рулонную электротехническую сталь марки 3409, толщиной 0,3мм, с улучшенными магнитными свойствами.
- Применить схему шихтовки магнитопровода «Step-Lap»
- Выполнить электромагнитный, тепловой и другие расчеты

2 Технико-экономический расчет оптимального варианта

Заданным номинальным данным трансформатора могут удовлетворять несколько технически возможных вариантов конструкции, отличающихся друг от друга разными вложениями активных материалов и разным уровнем потерь в электромагнитном преобразователе энергии.

Целью технико-экономического расчета является выбор среди нескольких технически возможных вариантов такого, который имеет оптимальное соотношение между уровнем затрат на изготовление электромагнитного преобразователя энергии и уровнем затрат при эксплуатации.

Критерием при выборе оптимального варианта является минимум приведенных затрат, рассчитанных по определенной формуле, для различных значений β - коэффициента, определяющего соотношение основных размеров в трансформаторе.

Коэффициент β в электромагнитных преобразователях энергии изменяется в пределах 0,5...4. Определение минимума приведенных затрат проводится в результате расчета нескольких вариантов с различными значениями β . Результаты расчета сводятся в таблице 2.1. Выбор оптимального варианта, соответствующего $Z_{прив.мин}$ проводится по графику $Z_{прив} = f(\beta)$ (см. рисунок 2.1). Для выбранного по графику $\beta_{опт}$ проводится повторный расчет, который и приведен ниже.

Таблица 2.1 - Результаты расчетных $Z_{\text{прив}} = f(\beta)$

Наименование параметра	РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА						
	β	0,63	1	1,6	2,5	4	$\beta_{\text{опт}}=2,31$
$D_{\text{ст}}, \text{ м}$	0,325	0,365	0,41	0,459	0,516	0,45	
$D_{\text{н-в}}, \text{ м}$	0,54	0,581	0,628	0,678	0,737	0,669	
$L_{\text{м-о}}, \text{ м}$	0,99	1,031	1,078	1,127	1,186	1,118	
$H_{\text{обм}}, \text{ м}$	2,695	1,827	1,234	0,852	0,579	0,983	
$H_{\text{окн}}, \text{ м}$	3,005	2,137	1,544	1,162	0,918	1,293	
$G_{\text{см}}, \text{ кг}$	$7,697 \cdot 10^3$	$8,029 \cdot 10^3$	$8,816 \cdot 10^3$	$10,080 \cdot 10^3$	$12,090 \cdot 10^3$	$9,824 \cdot 10^3$	
$P_{\text{xx}}, \text{ Вт}$	$11,970 \cdot 10^3$	$12,480 \cdot 10^3$	$13,7 \cdot 10^3$	$15,66 \cdot 10^3$	$18,79 \cdot 10^3$	$15,27 \cdot 10^3$	
$Q_{\text{xx}}, \text{ ВАР}$	$34,77 \cdot 10^3$	$40,35 \cdot 10^3$	$48,26 \cdot 10^3$	$58,37 \cdot 10^3$	$72,47 \cdot 10^3$	$56,43 \cdot 10^3$	
$i_{\text{xx}}, \%$	0,348	0,403	0,483	0,584	0,725	0,564	
$j, \text{ А/м}^2$	$1,701 \cdot 10^6$	$1,992 \cdot 10^6$	$2,332 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^6$	$3,143 \cdot 10^6$	$2,633 \cdot 10^6$	
$Z_{\text{пр руб/год}}$	$39,2 \cdot 10^3$	$33,15 \cdot 10^3$	$29,85 \cdot 10^3$	$29,98 \cdot 10^3$	$30,26 \cdot 10^3$	$28,99 \cdot 10^3$	

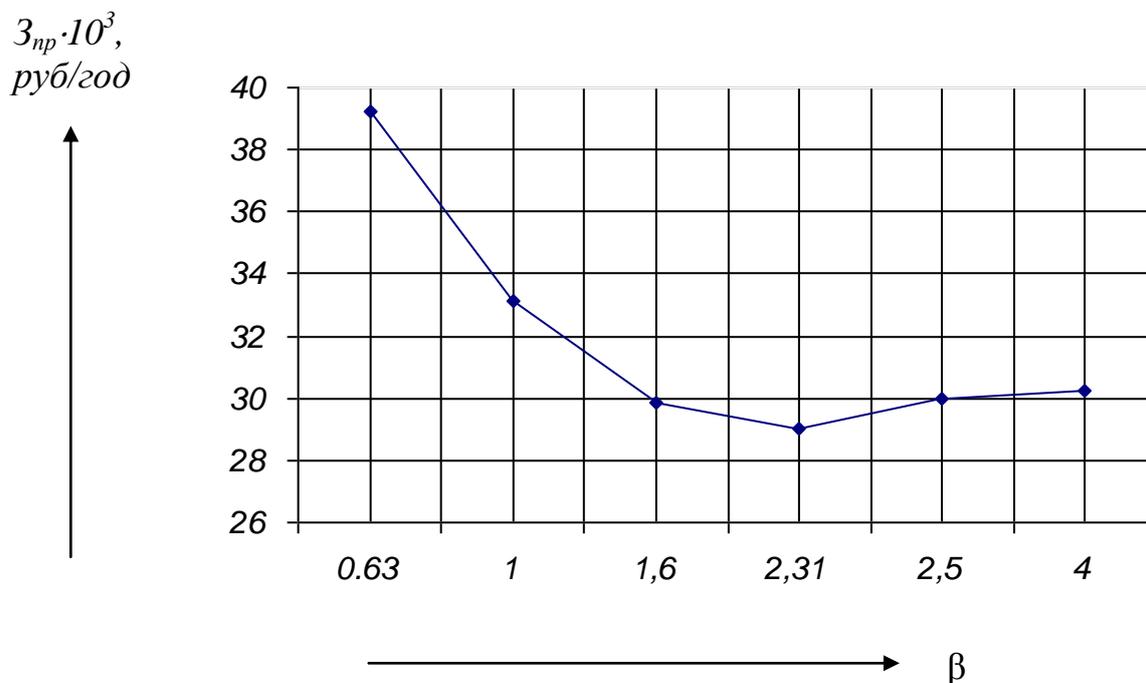


Рисунок 2.1 - Определение минимума приведенных затрат по графику

$$Z_{\text{прив}} = f(\beta_{\text{опт}})$$

2.1 Предварительная ширина концентратора НН, м:

$$e_H \cong \kappa_{B1} \cdot \kappa_{B2} \cdot (S_{НОМ} \cdot 10^{-6})^{\alpha_B} = 0,12 \cdot 0,4 \cdot (10 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6})^{0,0577} = 0,035 \quad (2.1)$$

где κ_{B1} , κ_{B2} , α_B – коэффициенты, определяемые на основе анализа геометрических соотношений в изготавливаемых электромагнитных преобразователях энергии $\alpha_B = 0,0577$, $\kappa_{B1} = 0,12$ для электромагнитных преобразователей энергии с концентраторами из медного провода, $\kappa_{B2} = 0,4$.

2.2 Предварительная ширина концентратора ВН, м:

$$e_B \cong \kappa_{B1} \cdot (S_{НОМ} \cdot 10^{-6})^{\alpha_B} - e_H = 0,12 \cdot (10 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6})^{0,0577} - 0,035 = 0,131 \quad (2.2)$$

2.3 Приведенная ширина главного канала рассеяния (между концентраторами ВН и НН), м:

$$e_{K_{H-B}} = \frac{e_H + e_B}{3} + e_{H-B} = \frac{0,035 + 0,131}{3} + 0,06 = 0,115 \quad (2.3)$$

где e_{H-B} – ширина канала между концентраторами ВН и НН

2.4 Диаметр стержня магнитопровода, м:

$$D_{CT} = 0,0682 \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{НОМ} \cdot \beta \cdot e_{K_{H-B}} \cdot K_{ос}}{f \cdot B_{CT}^2 \cdot K_{зап.кр}^2 \cdot U_{кз}}} = \quad (2.4)$$

$$= 0,0682 \cdot \sqrt[4]{\frac{10 \cdot 10^6 \cdot 2,31 \cdot 0,115 \cdot 0,95}{50 \cdot 1,65^2 \cdot 0,885 \cdot 11,5}} = 0,45$$

где $K_{зап.кр} = 0,885$ – коэффициент заполнения площади круга стержня магнитопровода активной сталью; $K_{ос} = 0,95$ – коэффициент осевого поля рассеяния; $B_{CT} = 1,65$ Тл – индукция в стержне.

2.5 Средний диаметр канала между концентраторами м:

$$D_{H-B} = (1 + 2 \cdot K_{CT-O}) \cdot D_{CT} + 2 \cdot (e_{O-H} + e_H) + e_{H-B} = \quad (2.5)$$

$$= (1 + 2 \cdot 0,015) \cdot 0,45 + 2 \cdot (0,018 + 0,035) + 0,06 = 0,669$$

где $K_{CT-O} = 0,015$ – коэффициент, учитывающий толщину бандажей, прессующих стержень магнитопровода; $e_{O-H} = 0,018$ – изоляционное расстояние от стержня до концентратора НН.

2.6 Межосевое расстояние между центрами разных фаз, м:

$$L_{MO} = D_{H-B} + v_{H-B} + 2 \cdot (v_B + v_{B-P} + v_P) + v_{M-\Phi} = \quad (2.6)$$

$$= 0,669 + 0,06 + 2 \cdot (0,131 + 0,06 + 0,0175) + 0,05 = 1,118$$

где $v_P = 0,5 \cdot v_H$ – ширина регулировочного концентратора, м; $v_{M-\Phi}$ – межфазное расстояние, м; v_{B-P} – ширина канала между ВН и РО, м.

2.7 Высота концентратора, м:

$$H_{обм} = \frac{\pi}{\beta} D_{H-B} = \frac{3,14}{2,31} \cdot 0,669 = 0,983 \quad (2.7)$$

2.8 Высота окна магнитопровода, м:

$$H_{окн} = H_{обм} + h_{ЕК} + h_{обм-в.я} + h_{обм-н.я} + h_{прес} = \quad (2.8)$$

$$= 0,983 + 0,03 + 0,11 + 0,1 + 0,07 = 1,293$$

где $h_{ЕК} = 0,03$ м – высота емкостного кольца концентратора ВН совместно с прилегающим к обмотке каналом; $h_{обм-в.я}$, $h_{обм-н.я}$ – изоляционный промежуток от концентратора до верхнего и нижнего ярма магнитопровода; $h_{прес} = 0,07$ м – высота, необходимая для размещения устройств, прессующих концентры.

2.9 Масса электротехнической стали магнитопровода, кг:

$$G_{ст} = (3 \cdot H_{окн} + 2 \cdot D_{ст} + 4 \cdot K_{ус.яр} \cdot L_{MO}) \cdot \gamma_{ст} \cdot K_{зАП.КР} \cdot \pi \cdot D_{ст}^2 / 4 = \quad (2.9)$$

$$= (3 \cdot 1,293 + 2 \cdot 0,45 + 4 \cdot 1,02 \cdot 1,118) \cdot 7,65 \cdot 10^3 \cdot 0,885 \cdot 3,14 \cdot 0,45^2 / 4 = 9,824 \cdot 10^3$$

где $\gamma_{ст} = 7,65 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность электротехнической стали; $K_{ус.яр} = 1,02$ – коэффициент увеличения площади сечения ярма по сравнению с площадью сечения стержня.

2.10 Удельные потери в стали магнитопровода, Вт/кг:

$$P_{XX} = K_p \cdot B_{ст}^{K_{ep}} = 0,296 \cdot 1,65^{2,64} = 1,11 \quad (2.10)$$

где $K_p = 0,296$, $K_{ep} = 2,64$ – коэффициенты, определенные для стали марки 3409 толщиной 0,3 мм для диапазона индукции в стали $B_{ст} = 1,5 \dots 1,7$ Тл.

2.11 Активные потери холостого хода электромагнитного преобразователя энергии (полные потери в стали магнитопровода), Вт:

$$P_{xx} = p_{xx} \cdot K_{ув.р} \cdot G_{ст} = 1,11 \cdot 1,4 \cdot 9,824 \cdot 10^3 = 15,270 \cdot 10^3 \quad (2.11)$$

где $K_{ув,р}=1,4$ – коэффициент, учитывающий увеличение активных потерь в стали в зависимости от конструкции и технологии изготовления магнитопровода.

2.12 Удельная намагничивающая мощность в стали, ВАР/кг:

$$q_{xx}=K_q \cdot B_{ст}^{K_{вq}}=0,137 \cdot 1,65^{5,06}=1,727 \quad (2.12)$$

где $K_q=0,137$, $K_{вq}=5,06$

2.13 Удельная намагничивающая мощность в стыках, ВАР/м²:

$$q_{стык}=K_{стык} \cdot B_{ст}^{K_{в,стык}}=2620 \cdot 1,65^5=32,04 \cdot 10^3 \quad (2.13)$$

где $K_{стык}=2620$, $K_{в,стык}=5$.

Величина коэффициентов K_p , $K_{вр}$, K_q , $K_{вq}$, $K_{стык}$, $K_{в,стык}$ зависит от марки стали и индукции в стержне магнитопровода и в зоне рабочей индукции может быть принята постоянной и равной указанным значением.

2.14 Реактивные потери холостого хода электромагнитного преобразователя энергии (полная намагничивающая мощность) ВАР:

$$Q_{xx}=K_{ув, Q} \cdot q_{xx} \cdot G_{ст} + \sqrt{2} \cdot n_{стык} \cdot q_{стык} \cdot K_{зап. КР} \cdot \pi \cdot D_{ст}^2 / 4 = \quad (2.14)$$

$$=1,2 \cdot 1,727 \cdot 9,824 \cdot 10^3 + \sqrt{2} \cdot 8 \cdot 32,04 \cdot 10^3 \cdot 0,885 \cdot 3,14 \cdot 0,45^2 / 4 = 56,430 \cdot 10^3$$

где $K_{ув, Q} = 1,2$ – коэффициент, учитывающий увеличение реактивных потерь в стали в зависимости от конструкции и технологии изготовления магнитопровода; $n_{стык} = 8$ – количество стыков в схеме шихтовки трехфазных электромагнитных преобразователей энергии плоской стержневой конструкции с косым стыком.

2.15 Ток холостого хода электромагнитного преобразователя энергии, %:

$$i_{xx} = \frac{Q_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100 = \frac{56,43 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,564 \quad (2.15)$$

2.16 Средняя плотность тока в концентраторах, А/м²:

$$j = \frac{1,67 \cdot K_{зап. КР} \cdot f \cdot B_{ст} \cdot D_{ст}^2 \cdot P_{кз}}{K_{доб} \cdot \rho_{пр} \cdot m_{\phi} \cdot D_{H-B} \cdot S_{ном}} = 9 \quad (2.16)$$

$$= \frac{1,67 \cdot 0,885 \cdot 50 \cdot 1,65 \cdot 0,45^2 \cdot 57 \cdot 10^3}{1,25 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 0,669 \cdot 10 \cdot 10^6} = 2,633 \cdot 10^6$$

где $\rho_{\text{пр}}$ – удельное сопротивление провода при 75°C ; $\rho_{\text{пр}} = 2,13 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – для медного провода; $K_{\text{доб}} = 1,25$ – коэффициент, учитывающий добавочные потери короткого замыкания, создаваемые магнитным полем рассеивания электромагнитного преобразователя энергии.

2.17 Масса обмоточного провода, кг:

$$G_{\text{пр}} = \frac{\gamma_{\text{пр}} \cdot P_{\text{кз}} \cdot K_{\text{рег}}}{K_{\text{доб}} \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot j^2} = \frac{8,89 \cdot 10^3 \cdot 57 \cdot 10^3 \cdot 1,05}{1,25 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot (2,633 \cdot 10^6)^2} = 2,883 \cdot 10^3 \quad (2.17)$$

где $\gamma_{\text{пр}}$ – плотность обмоточного провода; $\gamma_{\text{пр}} = 8,89 \cdot 10^3$ кг/м³ – для медного провода; $K_{\text{рег}} = 1,05$ – коэффициент, учитывающий увеличение массы обмоточного провода за счет регулировочного концентратора (РО).

2.18 Экономически приведенная к стали масса активных материалов, кг:

$$G_{\text{прив}} = G_{\text{СТ}} + \frac{Ц_{\text{пр}}}{Ц_{\text{СТ}}} \cdot K_{\text{из}} \cdot G_{\text{пр}} = 9,824 \cdot 10^3 + \frac{500}{92} \cdot 1,065 \cdot 2,883 \cdot 10^3 = 26,51 \cdot 10^3 \quad (2.18)$$

где $Ц_{\text{пр}}$ – оптовая цена провода; $Ц_{\text{пр}} = 500$ руб/кг – для медного провода; $Ц_{\text{СТ}} = 92$ руб/кг для электротехнической стали; $K_{\text{из}}$ – коэффициент увеличения массы обмоточного провода за счет изоляции; $K_{\text{из}} = 1,065$ для медного провода.

2.19 Удельная оптовая цена электромагнитного преобразователя энергии, руб/кг,:

$$C_0 = k_{\text{C1}} \cdot (S_{\text{ном}} \cdot 10^{-6})^{-k_{\text{C2}}} = 6,03 \cdot (10 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6})^{-0,284} = 3,136 \quad (2.19)$$

где $k_{\text{C1}} = 6,03$; $k_{\text{C2}} = 0,284$.

2.20 Цена электромагнитного преобразователя энергии, руб:

$$Ц_{\text{тр}} = C_0 \cdot G_{\text{прив}} = 3,136 \cdot 26,51 \cdot 10^3 = 83,11 \cdot 10^3 \quad (2.20)$$

2.21 Приведенные затраты, руб/год:

$$\begin{aligned} Z_{\text{прив}} &= (\epsilon_{\text{H}} + a_{\text{тр}}) \cdot Ц_{\text{тр}} + y_{\text{э}} \cdot T_{\text{вкл}} \cdot P_{\text{ХХ}} + \frac{y_{\text{э}} \cdot T_{\text{вкл}} \cdot i_{\text{ХХ}}}{100} \cdot S_{\text{ном}} = \quad (2.21) \\ &= (0,15 + 0,063) \cdot 83,11 \cdot 10^3 + 0,0183 \cdot 10^{-3} \cdot 8600 \cdot 15,27 \cdot 10^3 + \\ &\quad + \frac{0,0183 \cdot 10^{-3} \cdot 8600 \cdot 0,564}{100} \cdot 10 \cdot 10^6 = 28,99 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

где $a_{mp} = 0,063$ – норма амортизационных отчислений от стоимости электромагнитного преобразователя энергии; $y_{\text{э}} = 0,0183 \cdot 10^{-3}$ руб/Вт·час – стоимость электроэнергии, рассчитанная для двухставочного тарифа при средней продолжительности максимальной нагрузки для понижающих электромагнитных преобразователей энергии 5300 час/год; $T_{\text{вкл}} = 8600$ час/год – продолжительность включения.

3 Электромагнитный расчет электромагнитного преобразователя энергии

3.1 Построение и расчет активного сечения стержня магнитопровода

Магнитопровод шихтуется из листов холоднокатаной электротехнической стали. Поперечное сечение стержня – вписанная в окружность диаметром $D_{ст}$ симметричная многоступенчатая фигура, образуемая сечениями пакетов пластин (стойкой пластин одного размера) B_k – ширина пакета, t_k – толщина пакета.

Размеры пакетов стали, выбираются так, чтобы обеспечить максимальный коэффициент заполнения площади круга. Построение многоступенчатого сечения стержня магнитопровода на рисунке 3.1.

3.1.1 Геометрическое сечение стержня, равное площади многоступенчатой фигуры, m^2 :

$$F_{ст.геом} = 2 \cdot 0,075917 = 0,151833 \quad (3.1)$$

3.1.2 Активное сечение стержня, m^2 :

$$F_{ст} = k_{зап} \cdot F_{ст.геом} = 0,96 \cdot 0,151833 = 0,14576 \quad (3.2)$$

где $k_{зап.}$ – коэффициент заполнения пакета сталью, зависящий от толщины изоляционного покрытия стали, принимаем $k_{зап.} = 0,96$.

3.1.3 Коэффициент заполнения площади круга:

$$K_{зап.кр.} = \frac{F_{ст}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{ст}^2} = \frac{0,14576}{\frac{3,14}{4} \cdot 0,45^2} = 0,945 \quad (3.3)$$

Так как $K_{зап.кр.} \geq 0,885$ сечение стержня спроектировано рационально.

Таблица 3.1 - Расчёт геометрического сечения стержня

№ пакета	Ширина пакета B_k , м	Толщина пакета t_k , м	Площадь пакета, m^2
1	0,440	0,044	0,01936
2	0,425	0,027	0,011475
3	0,410	0,019	0,00779
4	0,385	0,023	0,008855
5	0,368	0,013	0,004784
6	0,350	0,012	0,0042
7	0,325	0,015	0,004875
8	0,310	0,007	0,00217
9	0,295	0,007	0,002065
10	0,270	0,010	0,0027
11	0,250	0,007	0,00175
12	0,230	0,006	0,00138
13	0,195	0,010	0,00195
14	0,155	0,008	0,00124
15	0,135	0,004	0,00054
Сумма:			0,075917

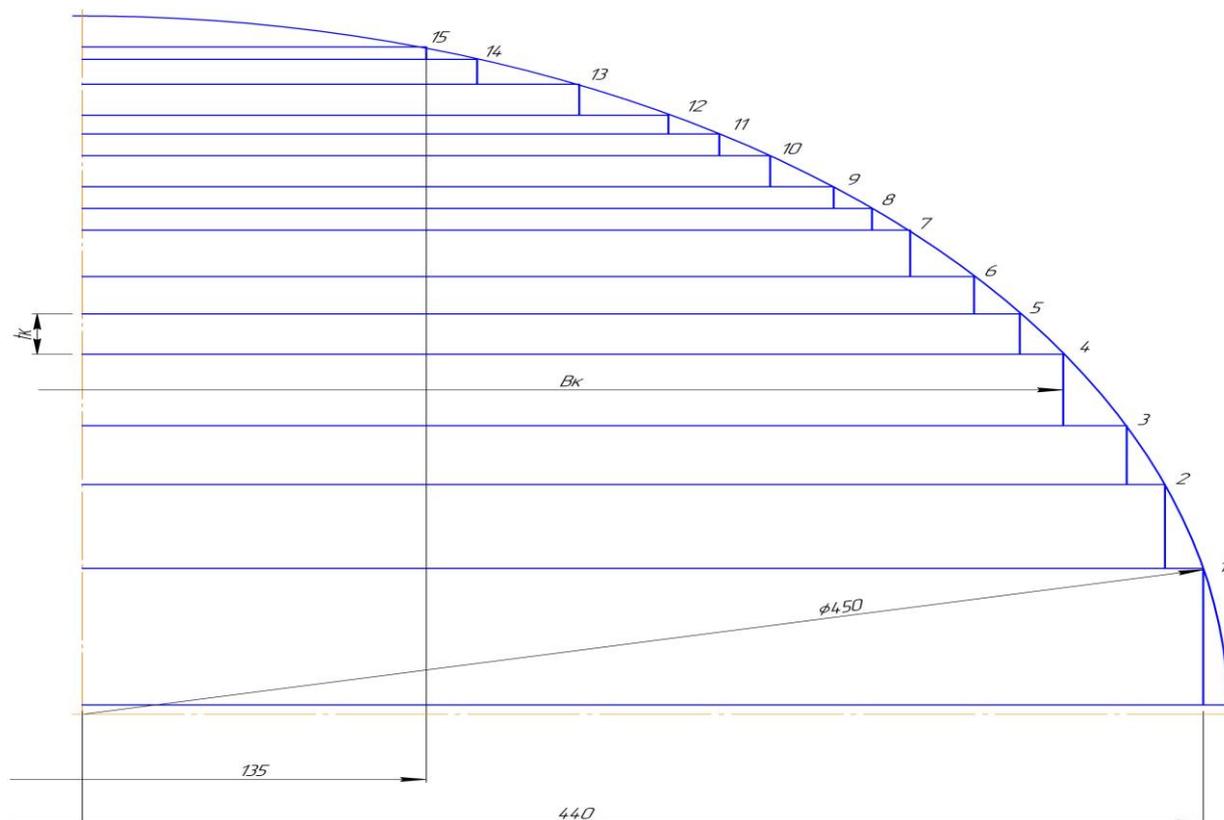


Рисунок 3.1 - Сечение стержня магнитопровода

3.2 Расчет напряжения одного витка, количества витков, напряжений и токов на всех ответвлениях концентратора РО

3.2.1 Предварительное значение напряжения одного витка, В:

$$U_{B0} = 4,44 \cdot f \cdot B_{CT0} \cdot F_{CT} = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,65 \cdot 0,14576 = 53,394 \quad (3.4)$$

где $B_{CT0} = 1,65$ Тл – предварительное значение индукции в стержне.

3.2.2 Количество витков в концентре НН:

$$W_{HH} = \left[\frac{U_{HH.ф.ном}}{U_{B0}} \right]_{Ц} = \left[\frac{6300}{53,394} \right]_{Ц} = 118 \quad (3.5)$$

где $U_{HH.ф} = U_{HH.л}$ при соединении фаз концентратора НН в треугольник.

3.2.3 Уточненное значение напряжения одного витка, В:

$$U_B = \frac{U_{HH.ф.ном}}{W_{HH}} = \frac{6300}{118} = 53,39 \quad (3.6)$$

3.2.4 Уточненное значение индукции в стержне, Тл:

$$B_{cm} = \frac{U_B}{4,44 \cdot f \cdot F_{cm}} = \frac{53,39}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,14576} = 1,65 \quad (3.7)$$

3.2.5 Количество витков ВН на основном ответвлении:

$$W_{ВН.ном} = \left[\frac{U_{ВН.ф.ном}}{U_B} \right]_{Ц} = \left[\frac{132,8 \cdot 10^3}{53,39} \right]_{Ц} = 2487 \quad (3.8)$$

где $U_{ВН.ф.ном} = \frac{U_{ВН.ном}}{\sqrt{3}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 132,8 \cdot 10^3$ В,

3.2.6 Количество витков в одной ступени регулирования:

$$W_{ступ} = \left[\frac{U_{ступ.ВН.ф}}{U_B} \right]_{Ц} = \left[\frac{1328}{53,39} \right]_{Ц} = 25 \quad (3.9)$$

где $U_{ступ.ВН.ф} = U_{ВН.ф.ном} \cdot \frac{U_{ступ} \%}{100} = 132,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{100} = 1328$ В; $U_{ступ} = 1$ %

3.2.7 Количество витков на любой ступени регулирования

$$W_{ВН.N.ступ} = W_{ВН.ном} \pm N_{ступ} \cdot W_{ступ} = 2487 \pm N_{ступ} \cdot 25 \quad (3.10)$$

где $N_{\text{ступ}}$ – номер ступени регулирования, принимающий положительные и отрицательные значения $N_{\text{ступ}} = \pm 12$, для номинального ответвления $N_{\text{ступ}} = 0$.

3.2.8 Фактическое значение напряжения на любой ступени регулирования, В:

$$U_{\text{ВН}_\phi\text{N}_\text{ступ}}^* = U_{\text{В}} \cdot W_{\text{ВН}_\text{N}_\text{ступ}} = 53,39 \cdot W_{\text{ВН}_\text{N}_\text{ступ}} \quad (3.11)$$

3.2.9 Расчетное значение напряжения на любой ступени регулирования, В:

$$U_{\text{ВН}_\phi\text{N}_\text{ступ}} = U_{\text{ВН}_\phi\text{ном}} \pm N_{\text{ступ}} \cdot U_{\text{ступ}_\text{ВН}_\phi} = 132,8 \cdot 10^3 \pm N_{\text{ступ}} \cdot 1328 \quad (3.12)$$

3.2.10 Отклонение расчетного и фактического значений напряжений на любой ступени регулирования, В:

$$\Delta U = U_{\text{ВН}_\phi\text{N}_\text{ступ}} - U_{\text{ВН}_\phi\text{N}_\text{ступ}}^* \quad (3.13)$$

3.2.11 Относительное отклонение расчетных и фактических значений напряжений на любой ступени регулирования должно обеспечить нормируемый стандартом допуск на коэффициент трансформации:

$$\left[\frac{\Delta U}{U_{\text{ВН}_\phi\text{N}_\text{ступ}}} \right] \leq 0,05 \quad (3.14)$$

3.2.12 Номинальный фазный ток концентратора ВН, А:

$$I_{\text{ВН}_\phi\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{10 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 25,1 \quad (3.15)$$

3.2.13 Фазный ток концентратора ВН на любой ступени регулирования, А:

$$I_{\text{ВН}_\phi\text{ступ}} = \frac{S_{\text{ном}}}{m_\phi \cdot U_{\text{ВН}_\phi\text{N}_\text{ступ}}} = \frac{10 \cdot 10^6}{3 \cdot U_{\text{ВН}_\phi\text{N}_\text{ступ}}} \quad (3.16)$$

Так как токи концентратора ВН на любой ступени регулирования не превышают величины $1,25 \cdot I_{\text{ВН}_\phi\text{ном}}$, снижать нагрузку электромагнитного преобразователя энергии при эксплуатации во избежании его нагрева нет необходимости.

3.2.14 Номинальный фазный ток концентратора НН, А:

$$I_{\text{НН}_\phi\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{3 \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{10 \cdot 10^6}{3 \cdot 6300} = 529,1 \quad (3.17)$$

Результаты сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Расчет числа витков и значений отклонений напряжений и токов на всех ступенях регулирования

№ ступени	$U_{ВН.ф.Нступ}, В$ 3.2.9	$W_{ВН.Нступ}$ 3.2.7	$I_{ВН.ф.Нступ}, А$ 3.2.13	$U^*_{ВН.ф.Нступ}, В$ 3.2.8	$\Delta U, В$ 3.2.10	$\frac{\Delta U}{U_{ВН.ф.Н.ступ}}$ 3.2.11
-12	116855,69	2187	28,525	116763,93	91,76	0,000785
-11	118183,60	2212	28,205	118098,68	84,92	0,000719
-10	119511,51	2237	27,891	119433,43	78,08	0,000653
-9	120839,41	2262	27,585	120768,18	71,23	0,000589
-8	122167,32	2287	27,285	122102,93	64,39	0,000527
-7	123495,22	2312	26,992	123437,68	57,54	0,000466
-6	124823,13	2337	26,704	124772,43	50,70	0,000406
-5	126151,03	2362	26,423	126107,18	43,85	0,000348
-4	127478,94	2387	26,148	127441,93	37,01	0,000290
-3	128806,85	2412	25,879	128776,68	30,17	0,000234
-2	130134,75	2437	26,614	130111,43	23,32	0,000179
-1	131462,66	2462	25,356	131446,18	16,48	0,000125
0	132790,56	2487	25,102	132780,93	9,63	0,000073
1	134118,47	2512	24,854	134115,68	2,79	0,000021
2	135446,37	2537	24,610	135450,43	-4,06	-0,000030
3	136774,28	2562	24,371	136785,18	-10,90	-0,000080
4	138102,18	2587	24,137	138119,93	-17,75	-0,000128
5	139430,09	2612	23,907	139454,68	-24,59	-0,000176
6	140758,00	2637	23,681	140789,43	-31,43	-0,000223
7	142085,90	2662	23,460	142124,18	-38,28	-0,000269
8	143413,81	2687	23,243	143458,93	-45,12	-0,000315
9	144741,71	2712	23,030	144793,68	-51,97	-0,000359
10	146069,62	2737	22,820	146128,43	-58,81	-0,000403
11	147397,52	2762	22,615	147463,18	-65,66	-0,000445
12	148725,43	2787	22,413	148797,93	-72,50	-0,000487

3.3 Выбор типа и расчет параметров концентратора электромагнитного преобразователя энергии

3.3.1 Исходные данные для выбора типа и вычисления параметров концентраторов

Предельные величины:

- высота провода минимальная $h_{\text{пр.мин}}=4,75 \cdot 10^{-3}$ м;
- высота провода максимальная $h_{\text{пр.макс}}=19,5 \cdot 10^{-3}$ м;
- ширина провода максимальная $b_{\text{пр.макс}}=5,6 \cdot 10^{-3}$ м;
- ширина провода минимальная $b_{\text{пр.мин}}=1,25 \cdot 10^{-3}$ м;
- потери добавочные от осевого поля рассеяния ($P_{\text{доб.ос}} \%$)=10% для медного концентратора

Величины, определяемые конструктивными факторами:

- коэффициент усадки концентратора при сушке $k_{\text{ус}}=0,1$;
- коэффициент заполнения сечения провода $k_{\text{зап.пр}}=0,985$, учитывающий уменьшение сечения провода за счет скругления его углов;
- расстояние между соседними прокладками $l_{\text{поля}}=0,12$ м, рассчитываемое по окружности среднего диаметра концентратора $D_{\text{н-в}}$;
- кратность количества катушек в одной параллельной ветви непрерывного концентратора $\varphi_{\text{кат}}=2$.

Параметры для расчета концентратора НН

- толщина изоляции провода на две стороны $t_{\text{в}}=0,55 \cdot 10^{-3}$,м;
- минимальная высота радиального канала $h_{\text{кан.мин}}=3,2 \cdot 10^{-3}$,м;

Параметры для расчета концентратора ВН

- толщина изоляции провода на две стороны $t_{\text{в}}=1,35 \cdot 10^{-3}$,м;
- минимальная высота радиального канала $h_{\text{кан. мин}}=4,8 \cdot 10^{-3}$,м;

3.3.2 Расчет параметров равномерного непрерывного концентратора НН

3.3.2.1 Количество прокладок:

$$n_{\text{прок}} = \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{Н-В}}}{\varphi_{\text{кат}} \cdot l_{\text{поля}}} \right)_{\text{Ц}} \cdot \varphi_{\text{кат}} = \left(\frac{3,14 \cdot 0,669}{2 \cdot 0,12} \right)_{\text{Ц}} \cdot 2 = 20 \quad (3.18)$$

3.3.2.2 Число параллельных ветвей концентратора: $m_{\text{в}}=1$.

3.3.2.3 Высота провода: $h_{\text{пр}}=18$ мм

3.3.2.4 Число параллельных проводов: $n_{\text{пар}}=2$

3.3.2.5 Ширина провода: $b_{\text{пр}}=4,5$ мм

3.3.2.6 Площадь поперечного сечения провода, м^2 :

$$F_{\text{пр}} = k_{\text{зан.пр}} \cdot h_{\text{пр}} \cdot b_{\text{пр}} = 0,985 \cdot 18 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} = 80,14 \cdot 10^{-6} \quad (3.19)$$

3.3.2.7 Площадь поперечного сечения концентратора, м^2 :

$$F_{\text{обм}} = n_{\text{пар}} \cdot F_{\text{пр}} = 2 \cdot 80,14 \cdot 10^{-6} = 160,28 \cdot 10^{-6} \quad (3.20)$$

3.3.2.8 Плотность тока, А/ м^2 :

$$j = \frac{I_{\text{ф.ном.}}}{F_{\text{обм}}} = \frac{529,1}{160,28 \cdot 10^{-6}} = 3,301 \cdot 10^6 \quad (3.21)$$

3.3.2.9 Индукция осевого поля рассеяния, Тл:

$$B_{\text{ос}} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot I_{\text{ф.ном.}} \cdot W_{\text{обм}} \cdot K_{\text{ос}}}{H_{\text{обм}}} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot 529,1 \cdot 118 \cdot 0,95}{0,983} = 0,107 \quad (3.22)$$

3.3.2.10 Добавочные потери от осевого поля рассеяния, %:

$$\begin{aligned} P_{\text{доб.ос}} &= 54,8 \cdot \left(\frac{f}{\rho_{\text{пр}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{B_{\text{пр}} \cdot B_{\text{ос}}}{j} \right)^2 = \\ &= 54,8 \cdot \left(\frac{50}{2,13 \cdot 10^{-8}} \right)^2 \cdot \left(\frac{4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,107}{3,301 \cdot 10^6} \right)^2 = 7,55 \end{aligned} \quad (3.23)$$

3.3.2.11 Высота катушки, м:

$$h_{\text{кат}} = h_{\text{пр}} + t_{\text{в.нн}} = 18 \cdot 10^{-3} + 0,55 \cdot 10^{-3} = 18,55 \cdot 10^{-3} \quad (3.24)$$

3.3.2.12 Число катушек:

$$n_{\text{кат}} = \left[\frac{H_{\text{обм}}}{h_{\text{кат}} + h_{\text{кан.мин}}} \cdot \left(-k_{\text{ус}} \cdot \varphi_{\text{кат}} \right)_{\text{Ц.М.}} \right] \cdot \varphi_{\text{кат}} = \quad (3.25)$$

$$= \left[\frac{0,983}{8,55 \cdot 10^{-3} + 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,1)} \cdot 2 \right] \cdot 2 = 42$$

3.3.2.13 Число витков в катушке:

$$w_{\text{кат}} = \frac{w_{\text{обм}} \cdot m_{\text{В}}}{n_{\text{кат}}} = \frac{118 \cdot 1}{42} = 2,81 \approx 2 \frac{16}{20} \quad (3.26)$$

3.3.2.14 Ширина катушки, м:

$$\begin{aligned} b_{\text{кат}} &= 1,03 \cdot (b_{\text{пр}} + t_{\text{Вин}}) \cdot \frac{n_{\text{нар}}}{m_{\text{В}}} \cdot (W_{\text{кат}})_{\text{ц.б.}} = \\ &= 1,03 \cdot (4,5 \cdot 10^{-3} + 0,55 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{2}{1} \cdot 42 = 0,0305 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Разобьем концентр на два участка, в одном из которых будут катушки с числом витков равным $2 \frac{16}{20}$, а в другом катушки с числом витков равным $2 \frac{17}{20}$. Обозначим первый тип катушек буквой «А», а второй буквой «В». Тогда значения числа катушек на стержень и числа витков в катушках для обоих типов катушек будет следующими:

$$\begin{aligned} n_{\text{кат.А}} &= 34; w_{\text{кат.А}} = 2 \frac{16}{20}; \\ n_{\text{кат.В}} &= 8; w_{\text{кат.В}} = 2 \frac{17}{20}. \end{aligned}$$

3.3.3 Расчет параметров равномерного непрерывного концентрa ВН

3.3.3.1 Количество прокладок:

$$n_{\text{прок}} = \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{Н-В}}}{\varphi_{\text{кат}} \cdot l_{\text{поля}}} \right)_{\text{ц}} \cdot \varphi_{\text{кат}} = \left(\frac{3,14 \cdot 0,669}{2 \cdot 0,12} \right)_{\text{ц}} \cdot 2 = 20 \quad (3.28)$$

3.3.3.2 Число параллельных ветвей обмотки: $m_{\text{В}}=2$.

3.3.3.3 Высота провода: $h_{\text{пр}}=4,75$ мм

3.3.3.4 Число параллельных проводов: $n_{\text{пар}}=2$

3.3.3.5 Ширина провода: $b_{\text{пр}}=1,25$ мм

3.3.3.6 Площадь поперечного сечения провода, м^2 :

$$F_{\text{пр}} = k_{\text{зан.пр}} \cdot h_{\text{пр}} \cdot b_{\text{пр}} = 0,985 \cdot 4,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} = 5,72 \cdot 10^{-6} \quad (3.29)$$

3.3.3.7 Площадь поперечного сечения концентри, м²:

$$F_{обм} = n_{нар} \cdot F_{пр} = 2 \cdot 5,72 \cdot 10^{-6} = 11,44 \cdot 10^{-6} \quad (3.30)$$

3.3.3.8 Плотность тока, А/ м²:

$$j = \frac{I_{ф.ном.}}{F_{обм}} = \frac{25,1}{11,44 \cdot 10^{-6}} = 2,492 \cdot 10^6 \quad (3.31)$$

3.3.3.9 Индукция осевого поля рассеяния, Тл:

$$B_{ос} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot I_{ф.ном.} \cdot W_{обм} \cdot K_{ос}}{H_{обм}} = \frac{1,78 \cdot 10^{-6} \cdot 25,1 \cdot 2487 \cdot 0,95}{0,983} = 0,107 \quad (3.32)$$

3.3.3.10 Добавочные потери от осевого поля рассеяния, %:

$$P_{доб.ос} = 54,8 \cdot \left(\frac{f}{\rho_{пр}} \right)^2 \cdot \left(\frac{B_{пр} \cdot B_{ос}}{j} \right)^2 = \quad (3.33)$$

$$= 54,8 \cdot \left(\frac{50}{2,13 \cdot 10^{-8}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,107}{2,492 \cdot 10^6} \right)^2 = 1,13$$

3.3.3.11 Высота катушки, м:

$$h_{кат} = h_{пр} + t_{в,вн} = 4,75 \cdot 10^{-3} + 1,35 \cdot 10^{-3} + 6,1 \cdot 10^{-3} \quad (3.34)$$

3.3.3.12 Число катушек:

$$n_{кат} = \left[\frac{H_{обм}}{h_{кат} + h_{кан.мин} \cdot (-k_{ус} \cdot \varphi_{кат})_{ц.м.}} \right] \cdot \varphi_{кат} = \quad (3.35)$$

$$= \left[\frac{0,983}{1,1 \cdot 10^{-3} + 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,1) \cdot 2} \right] \cdot 2 = 96$$

3.3.3.13 Число витков в катушке:

$$w_{кат} = \frac{W_{обм} \cdot m_B}{n_{кат}} = \frac{2487 \cdot 2}{96} = 51,81 \approx 51 \frac{16}{20} \quad (3.36)$$

3.3.3.14 Ширина катушки, м:

$$b_{кат} = 1,03 \cdot (b_{пр} + t_{в,вн}) \cdot \frac{n_{нар}}{m_B} \cdot (W_{кат})_{ц.б.} = \quad (3.37)$$

$$= 1,03 \cdot (1,25 \cdot 10^{-3} + 1,35 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{2}{2} \cdot 52 = 0,1365$$

Разобьем концентр на два участка, в одном из которых будут катушки с числом витков равным $51\frac{16}{20}$, а в другом катушки с числом витков равным $51\frac{17}{20}$. Обозначим первый тип катушек буквой «С», а второй буквой «D». Тогда значения числа катушек на стержень и числа витков в катушках для обоих типов катушек будет следующими:

$$n_{\text{кат.С}}=72; w_{\text{кат.С}}=51\frac{16}{20};$$

$$n_{\text{кат.Д}}=24; w_{\text{кат.Д}}=51\frac{17}{20}.$$

3.3.4 Проверка уровня отклонения расчетного значения $U_{\text{кз.р}}\%$ от заданного ($U_{\text{кз.р}}=11,5\%$)

3.3.4.1 Средний диаметр между концентриями НН и ВН, м:

$$\begin{aligned} D_{\text{н-в}} &= (1 + 2 \cdot K_{\text{СТ-О}}) \cdot D_{\text{СТ}} + 2 \cdot (\epsilon_{\text{о-н}} + \epsilon_{\text{н}}) + \epsilon_{\text{н-в}} = \\ &= (1 + 2 \cdot 0,015) \cdot 450 + 2 \cdot (0,018 + 0,0305) + 0,06 = 0,607 \end{aligned} \quad (3.38)$$

3.3.4.2 Средний диаметр концентриа НН, м:

$$D_{\text{н.ср}} = D_{\text{н-в}} - \epsilon_{\text{н}} - \epsilon_{\text{н-в}} = 0,607 - 0,305 - 0,06 = 0,5165 \quad (3.39)$$

3.3.4.3 Средний диаметр концентриа ВН, м:

$$D_{\text{в.ср}} = D_{\text{н-в}} + \epsilon_{\text{в}} + \epsilon_{\text{н-в}} = 0,607 + 0,1365 + 0,06 = 0,8035 \quad (3.40)$$

3.3.4.4 «Приведенный диаметр» бака, м²:

$$\begin{aligned} D_{\text{Б}} &= \frac{\epsilon_{\text{н}}}{3} \cdot D_{\text{н.ср}} + \epsilon_{\text{н-в}} \cdot D_{\text{н-в}} + \frac{\epsilon_{\text{в}}}{3} \cdot D_{\text{в.ср}} = \\ &= \frac{0,0305}{3} \cdot 0,5165 + 0,06 \cdot 0,607 + \frac{0,1365}{3} \cdot 0,8035 = 0,078 \end{aligned} \quad (3.41)$$

3.3.4.5 Реактивная составляющая напряжения КЗ, %:

$$\begin{aligned} U_{\text{кз.р}} &= \frac{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot D_{\text{Б}} \cdot K_{\text{ОС}}}{m_{\phi} \cdot U_{\text{В}}^2 \cdot H_{\text{ОБМ}}} = \\ &= \frac{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 0,078 \cdot 0,95}{3 \cdot 53,39^2 \cdot 0,983} = 10,963 \end{aligned} \quad (3.42)$$

3.3.5 Расчет параметров регулировочного концентратора

В данном электромагнитном преобразователе энергии концентратор РО выполнен в виде слоевого 6-ти ходового, винтового с двумя ступенями регулирования в радиальном размере.

3.3.5.1 Высота концентратора, м:

$$H_{обм.РО} = H_{обм} - \Delta H_{ро} = 0,983 - 0,403 = 0.580 \quad (3.43)$$

где $\Delta H_{ро} = 0,403$ м

3.3.5.2 Число слоев: $n_{сл} = 2$;

3.3.5.3 Высота провода: $h_{пр} = 8,5$ мм;

3.3.5.4 Число параллельных проводов: $n_{нар} = 1$

3.3.5.5 Ширина провода: $b_{пр} = 1,32$ мм;

3.3.5.6 Площадь поперечного сечения провода, м²:

$$F_{пр} = k_{зан.пр} \cdot h_{пр} \cdot b_{пр} = 0,985 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,32 \cdot 10^{-3} = 11,01 \cdot 10^{-6} \quad (3.44)$$

3.3.5.7 Площадь поперечного сечения концентратора, м²:

$$F_{обм} = n_{нар} \cdot F_{пр} = 1 \cdot 11,01 \cdot 10^{-6} = 11,01 \cdot 10^{-6} \quad (3.45)$$

3.3.5.8 Плотность тока, А/ м²:

$$j = \frac{I_{ф.ном.}}{F_{обм}} = \frac{25,1}{11,01 \cdot 10^{-6}} = 2,592 \cdot 10^6 \quad (3.46)$$

3.3.5.9 Ширина слоя, м:

$$b_{сл} = \frac{(b_{пр} + t_{в.сл.}) \cdot n_{нар.РО}}{m_6} = \frac{(8,5 \cdot 10^{-3} + 2,95 \cdot 10^{-3}) \cdot 1}{1} = 0.01145 \quad (3.47)$$

где $t_{в.сл.} = 2,96 \cdot 10^{-3}$ м – толщина изоляции провода концентратора РО на две стороны; значение ширины провода в формуле принимается равным $b_{пр} = 8,5$ мм т.к. провод мотается на ребро.

3.3.5.10 Ширина концентратора, м:

$$b_{обм} = b_{сл} \cdot n_{сл} + b_{мс} \cdot (n_{сл} - 1) = 0,01145 \cdot 2 + 0,0001 \cdot (2 - 1) = 0,023 \quad (3.48)$$

где $b_{мс} = 0,0001$ м – ширина изоляции между слоями концентратора.

Таблица 3.3– Основные параметры концентров

Параметр	Ед. изм.	Непрерывная ВН	Непрерывная НН	Слоевая 6-ти ходовая РО
Высота концентри, $H_{обм}$	м	0,983	0,983	0,58
Номинальный ток, $I_{ф.ном}$	А	25,102	529,1	25,102
Плотность тока, j	А/м ²	$2,492 \cdot 10^6$	$3,301 \cdot 10^6$	$2,592 \cdot 10^6$
Число витков в катушке, $W_{кат}$	-	$51 \frac{16}{20}$ $51 \frac{17}{20}$	$2 \frac{16}{20}$ $2 \frac{17}{20}$	25x2
Число параллельных проводов, $n_{пар}$	-	2	2	1
Общее число витков	-	2487	118	300
Высота провода, $h_{пр}$	м	$4,75 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$
Ширина провода, $b_{пр}$	м	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$
Отношение $h_{пр}/b_{пр}$	-	3,8	4	6,4
Сечение концентри, $F_{обм}$	м ²	$11,44 \times 10^{-6}$	$160,28 \times 10^{-6}$	$11,01 \times 10^{-6}$
Ширина концентри, $b_{кат}$	м	0,1365	0,0305	0,023
Добавочные потери от осевого поля рассеяния, $P_{доб.ос.}$	%	1,13	7,55	-

3.4 Расчет потерь короткого замыкания

3.4.1 Расчет сопротивлений концентров НН и ВН постоянному току и масс обмоточного провода.

Расчет проводится для концентров НН и ВН аналогично.

3.4.1.1 Активное сопротивление концентри при расчетной температуре,

Ом:

$$R_{обм.нн} = \rho_{пр} \cdot \frac{L_{пар.нн}}{F_{обм.нн}} = 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{191,471}{160,28 \cdot 10^{-6}} = 0,025 \quad (3.49)$$

где $L_{пар.нн} = \pi \cdot D_{н.ср} \cdot W_{обм} = \pi \cdot 0,5165 \cdot 118 = 191,471$ м – разомкнутая длина одного провода на номинальном ответвлении.

$$R_{обм.вн} = \rho_{обм} \cdot \frac{L_{пар.вн}}{F_{обм.вн}} = 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{6,278 \cdot 10^3}{11,44 \cdot 10^{-6}} = 11,689 \quad (3.50)$$

где $L_{\text{пар.вн}} = \pi \cdot D_{\text{в.ср}} \cdot W_{\text{обм}} = \pi \cdot 0,8035 \cdot 2487 = 6,278 \cdot 10^3 \text{ м}$ – разомкнутая длина одного провода на номинальном ответвлении.

3.4.1.2 Масса обмоточного провода концентроров НН и ВН, через которые проходит ток работе на номинальном ответвлении, кг:

$$G_{\text{пр.нн}} = m_{\phi} \cdot L_{\text{пар.нн}} \cdot F_{\text{обм.нн}} \cdot \gamma_{\text{пр}} = 3 \cdot 191,471 \cdot 160,28 \cdot 10^{-6} \cdot 8,89 \cdot 10^3 = 818,473 \quad (3.51)$$

$$G_{\text{пр.вн}} = m_{\phi} \cdot L_{\text{пар.вн}} \cdot F_{\text{обм.вн}} \cdot \gamma_{\text{пр}} = 3 \cdot 6,278 \cdot 10^3 \cdot 11,44 \cdot 10^{-6} \cdot 8,89 \cdot 10^3 = 1915$$

3.4.2 Определение основных потерь в концентраторах НН и ВН

3.4.2.1 Основные потери в функции тока и сопротивления в концентраторах НН и ВН, Вт:

$$P_{\text{оснНН}} = m_{\phi} \cdot I_{\text{НН}\phi}^2 \cdot R_{\text{НН}} = 3 \cdot 529,1^2 \cdot 0,025 = 21,37 \cdot 10^3 \quad (3.52)$$

$$P_{\text{оснВН}} = m_{\phi} \cdot I_{\text{ВН}\phi}^2 \cdot R_{\text{ВН}} = 3 \cdot 25,102^2 \cdot 11,689 = 22,1 \cdot 10^3$$

3.4.2.2 Основные потери в концентраторах НН и ВН в функции плотности тока и массы провода, Вт:

$$P_{\text{оснНН}} = \frac{\rho_{\text{пр}}}{\gamma_{\text{пр}}} \cdot j_{\text{НН}}^2 \cdot G_{\text{прНН}} = \frac{2,13 \cdot 10^{-8}}{8,89 \cdot 10^3} \cdot (3,301 \cdot 10^6)^2 \cdot 818,473 = 21,37 \cdot 10^3 \quad (3.53)$$

$$P_{\text{оснВН}} = \frac{\rho_{\text{пр}}}{\gamma_{\text{пр}}} \cdot j_{\text{ВН}}^2 \cdot G_{\text{прВН}} = \frac{2,13 \cdot 10^{-8}}{8,89 \cdot 10^3} \cdot (2,492 \cdot 10^6)^2 \cdot 1915 = 22,1 \cdot 10^3$$

3.4.2.3 Сумма основных потерь в концентраторах, Вт:

$$\Sigma P_{\text{осн}} = P_{\text{оснНН}} + P_{\text{оснВН}} = 21,37 \cdot 10^3 + 22,1 \cdot 10^3 = 43,47 \cdot 10^3 \quad (3.54)$$

Таблица 3.4– Результаты расчета основных потерь в концентраторах НН и ВН

ПАРАМЕТР	Концентр	
	НН	ВН
$L_{\text{пар}}, \text{ м}$	191,471	6278
$R_{\text{обм}}, \text{ Ом}$	0,025	11,689
$G_{\text{пр}}, \text{ кг}$	818,473	1915
$P_{\text{осн}} = f(I, R), \text{ Вт}$	$21,37 \cdot 10^3$	$22,1 \cdot 10^3$
$P_{\text{осн}} = f(j, G_{\text{пр}}), \text{ Вт}$	$21,37 \cdot 10^3$	$22,1 \cdot 10^3$

3.4.3 Расчет составляющих добавочных потерь в концентраторах НН и ВН

Добавочные потери в концентраторах связаны с действием полей рассеяния. Для определения этих составляющих потерь необходимо знать распределения составляющих индукции поля рассеяния.

3.4.3.1 Индукция осевого поля рассеяния, Тл:

$$B_{ос.НН} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I_{нн.ф.ном} \cdot W_{нн} \cdot K_{ос}}{H_{обм}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 529,1 \cdot 118 \cdot 0,95}{0,983} = 0,107 \quad (3.55)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха; $K_{ос} = 0,95$ – коэффициент осевого поля рассеяния.

$$B_{ос.ВН} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot I_{вн.ф.ном} \cdot W_{вн} \cdot K_{ос}}{H_{обм}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 25,102 \cdot 2487 \cdot 0,95}{0,983} = 0,107 \quad (3.56)$$

$B_{ос}$, рассчитанная через параметры концентратора НН и ВН имеет одинаковые значения.

3.4.3.2 Удельные потери от осевой составляющей поля рассеяния в концентраторах НН и ВН, Вт/кг:

$$P_{в.о.НН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{нрНН}^2}{18 \cdot \gamma_{нр} \cdot \rho_{нр}} \cdot B_{ос}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot (4,5 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,107^2 = 1,691 \quad (3.57)$$

$$P_{в.о.ВН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot b_{нрВН}^2}{18 \cdot \gamma_{нр} \cdot \rho_{нр}} \cdot B_{ос}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot (1,25 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,107^2 = 0,13 \quad (3.58)$$

3.4.3.3 Полные потери от осевой составляющей поля рассеяния в концентраторах НН и ВН, Вт:

$$P_{в.ос.НН} = P_{в.о.НН} \cdot G_{нрНН} = 1,691 \cdot 818,473 = 1384 \quad (3.59)$$

$$P_{в.ос.ВН} = P_{в.о.ВН} \cdot G_{нрВН} = 0,13 \cdot 1915 = 249,874 \quad (3.60)$$

3.4.3.4 Радиальная составляющая поля рассеяния.

С целью определения радиальной составляющей индукции половина высоты концентратора разбивается на 2 участка: высота участка 1-2 – $0,05 \cdot H_{обм}$, высота участка 2-3 – $0,45 \cdot H_{обм}$

Индукция на участке, Тл:

$$B_{pa\partial 1-2} = \sqrt{B_{pa\partial 1}^2 + B_{pa\partial 1} \cdot B_{pa\partial 2} + B_{pa\partial 2}^2} =$$

$$= \sqrt{0,043^2 + 0,043 \cdot 0,011 + 0,011^2} = 0,049 \quad (3.61)$$

$$B_{pa\partial 1} = 0,4 \cdot B_{oc} = 0,4 \cdot 0,107 = 0,043$$

$$B_{pa\partial 2} = 0,1 \cdot B_{oc} = 0,1 \cdot 0,107 = 0,011$$

$$B_{pa\partial 2-3} = B_{pa\partial 2} = 0,011$$

3.4.3.5 Удельные потери от радиальной составляющей поля рассеяния в концентраторах НН и ВН, Вт/кг:

$$P_{в.ра\partial 1-2НН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{npНН}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{pa\partial 1-2}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot (18 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,049^2 = 5,681 \quad (3.62)$$

$$P_{в.ра\partial 2-3НН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{npНН}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{pa\partial 2-3}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot (18 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,011^2 = 0,271 \quad (3.63)$$

$$P_{в.ра\partial 1-2ВН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{npВН}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{pa\partial 1-2}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot (4,75 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,049^2 = 0,396 \quad (3.64)$$

$$P_{в.ра\partial 2-3ВН} = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot h_{npВН}^2}{18 \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np}} \cdot B_{pa\partial 2-3}^2 = \frac{3,14^2 \cdot 50^2 \cdot (4,75 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 8,89 \cdot 10^3 \cdot 2,13 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,011^2 = 0,019 \quad (3.65)$$

3.4.3.6 Полные потери на участках 1-2 и 2-3 от радиальной составляющей поля рассеяния в концентраторах ВН и НН, Вт:

$$P_{в.ра\partial 1-2НН} = P_{в.ра\partial 1-2НН} \cdot G_{np1-2НН} = 5,681 \cdot 40,924 = 232,477 \quad (3.66)$$

где $G_{np1-2НН} = 0,05 \cdot G_{npНН} = 0,05 \cdot 818,473 = 40,924$ кг

$$P_{в.ра\partial 2-3ВН} = P_{в.ра\partial 2-3ВН} \cdot G_{np2-3ВН} = 0,271 \cdot 368,313 = 99,633 \quad (3.67)$$

где $G_{np2-3ВН} = 0,45 \cdot G_{npВН} = 0,45 \cdot 818,473 = 368,313$ кг

$$P_{в.ра\partial 1-2ВН} = P_{в.ра\partial 1-2ВН} \cdot G_{np1-2ВН} = 0,396 \cdot 95,77 = 37,886 \quad (3.68)$$

где $G_{np1-2ВН} = 0,05 \cdot G_{npВН} = 0,05 \cdot 1915 = 95,77$ кг

$$P_{в.ра\partial 2-3НН} = P_{в.ра\partial 2-3НН} \cdot G_{np2-3НН} = 0,019 \cdot 861,932 = 16,237 \quad (3.69)$$

где $G_{np2-3ВН} = 0,45 \cdot G_{npВН} = 0,45 \cdot 1915 = 861,932$ кг

3.4.3.7 Потери от радиальной составляющей поля рассеяния в концентраторах ВН и НН, Вт:

$$P_{в.ра\partial НН} = 2 \cdot (P_{в.ра\partial 1-2НН} + P_{в.ра\partial 2-3НН}) = 2 \cdot (232,47 + 99,633) = 664,219 \quad (3.70)$$

$$P_{\epsilon, \text{радВН}} = 2 \cdot (P_{\epsilon, \text{рад}1-2\text{ВН}} + P_{\epsilon, \text{рад}2-3\text{ВН}}) = 2 \cdot (37,886 + 16,237) = 108,245 \quad (3.71)$$

В непрерывных концентраторах, какими являются концентраторы ВН и НН, добавочные потери от циркулирующих токов отсутствуют.

Таблица 3.5 – Результаты расчетов добавочных потерь от вихревых токов, вызванных осевой и радиальной составляющих поля рассеяния

ПАРАМЕТР		Концентр	
		НН	ВН
B_{oc}	Тл	0,107	0,107
$\rho_{в.ос}$	Вт/кг	1,691	0,13
$P_{в.ос}$	Вт	1384	249,874
$B_{рад}$	1	Тл	0,043
	2		0,011
	1- 2		0,049
	2- 3		0,011
$\rho_{в.рад}$	1- 2	Вт/кг	5,681
	2- 3		0,271
$G_{пр}$	1- 2	кг	40,924
	2- 3		368,313
$P_{в.рад}$	1- 2	Вт	232,477
	2- 3		99,633
$\Sigma P_{в.об.рад.}$		Вт	664,219
			108,245

3.4.4 Расчет добавочных потерь в металлоконструкциях

3.4.4.1 Межосевое расстояние, м:

$$L_{MO} = D_{н-\epsilon} + \epsilon_{н-\epsilon} + 2 \cdot (\epsilon_{\epsilon} + \epsilon_{\epsilon-ро} + \epsilon_{ро}) + \epsilon_{м.ф} = \quad (3.72)$$

$$0,607 + 0,06 + 2 \cdot (0,1365 + 0,06 + 0,023) + 0,05 = 1,156$$

3.4.4.2 Наружный диаметр концентраторов, м:

$$D_{ро.нар} = D_{\epsilon-ро} + \epsilon_{\epsilon-ро} + 2 \cdot \epsilon_{ро} = 1 + 0,06 + 0,023 = 1,106 \quad (3.73)$$

где $D_{\epsilon-ро} = D_{\epsilon.ср} + \epsilon_{\epsilon} + \epsilon_{\epsilon-р} = 0,8035 + 0,1365 + 0,06 = 1\text{ м}$ - средний диаметр между ВН и РО.

3.4.4.3 Ширина бака, м:

$$B_{\bar{o}} = D_{\bar{e}-p_o} + 2 \cdot e_{o\bar{o}m-\bar{o}} = 1,106 + 2 \cdot 0,2 = 1,506 \quad (3.74)$$

где $v_{o\bar{o}m-\bar{B}}=0,2$ м – усредненное расстояние от наружного центра до стенки бака по поперечной оси

3.4.4.4 Длина бака, м:

$$L_{\bar{o}} = 2 \cdot L_{MO} + 2 \cdot D_{p_o.nap} + 2 \cdot e_{o\bar{o}m-\bar{o}} = 2 \cdot 1,156 + 1,106 + 2 \cdot 0,55 = 4,518 \quad (3.75)$$

где $v_{o\bar{o}m-\bar{B}}=0,55$ м – усредненное расстояние от наружного центра до стенки бака по продольной оси

3.4.4.5 Периметр бака, м:

$$\Pi_{\bar{o}} = 4 \cdot (L_{MO} + B_{\bar{o}}) = 2 \cdot (L_{\bar{o}} + B_{\bar{o}}) = 2 \cdot (4,518 + 1,506) = 12,048 \quad (3.76)$$

3.4.4.6 Средний радиус бака, м:

$$R_{\bar{B}} = \frac{(L_{\bar{B}} + B_{\bar{B}} - 2 \cdot L_{MO})}{4} = \quad (3.77)$$

$$= \frac{(4,518 + 1,506 - 2 \cdot 1,156)}{4} = 0,928$$

3.4.4.7 Добавочные потери в металлоконструкциях, Вт:

$$P_{доб.конст} \approx \frac{\kappa \cdot U_{кз.p}^2 \% \cdot \Phi_{ст}^2 \cdot H_{o\bar{o}m}^3 \cdot 10^4}{\Pi_{\bar{B}} \left[H_{o\bar{o}m} + 2 \cdot \left(R_{\bar{B}} - \frac{D_{H-\bar{e}}}{2} \right) \right]^2} \quad (3.78)$$

$$= \frac{2,2 \cdot 10,963^2 \cdot 0,24^2 \cdot 0,983^3 \cdot 10^4}{12,048 \cdot \left[0,983 + 2 \cdot \left(0,928 - \frac{0,607}{2} \right) \right]^2} = 2,42 \cdot 10^3$$

где $\kappa=2,2$ при $U_{кз.p} < 11,5\%$; [1]

$\Phi_{ст} = F_{ст} \cdot B_{ст} = 0,14576 \cdot 1,65 = 0,24$ Вб – поток одного стержня

3.4.5 Общие потери короткого замыкания, Вт:

$$P_{кз} = P_{оснНН} + P_{оснВН} + P_{в.радНН} + P_{в.радВН} + P_{в.осНН} + P_{в.осВН} + P_{доп.конст} = \quad (3.79)$$

$$= 21,37 \cdot 10^3 + 22,1 \cdot 10^3 + 664,219 + 108,245 + 1384 + 249,874 + 2,42 \cdot 10^3 = 48,35 \cdot 10^3$$

3.5 Расчет напряжения короткого замыкания

3.5.1 Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %:

$$U_{кз.р}=10,963 \quad (3.80)$$

3.5.2 Активная составляющая напряжения короткого замыкания, %:

$$U_{кз.а} = \frac{P_{кз}}{S_{ном}} \cdot 100 = \frac{48,35 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,484 \quad (3.81)$$

3.5.3 Полное напряжение короткого замыкания, %:

$$U_{кз} = \sqrt{U_{кз.р}^2 + U_{кз.а}^2} = \sqrt{10,963^2 + 0,484^2} = 10,974 \quad (3.82)$$

3.6 Расчет потерь и тока холостого хода

3.6.1 Расчет массы магнитопровода

3.6.1.1 Масса стержней магнитопровода, кг:

$$G_{стерж} = \gamma_{ст} \cdot V_{стерж} = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 0,593 = 4540,58 \quad (3.83)$$

где $\gamma_{ст}=7,65 \cdot 10^3$ кг/м³-плотность электротехнической стали;

$V_{стерж}=3 \cdot N_{окн} \cdot F_{ст}=3 \cdot 1,293 \cdot 0,1457=0,593$ м³-объем стержней.

3.6.1.2 Масса углов магнитопровода, кг:

$$G_{угл} = \gamma_{ст} \cdot V_{угл} = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 0,328 = 2513,27 \quad (3.84)$$

где $V_{угл}=3 \cdot D_{ст} \cdot F_{ст}=3 \cdot 0,45 \cdot 0,1457=0,328$ м³-объем углов.

3.6.1.3 Масса ярм магнитопровода, кг:

$$G_{ярм} = \gamma_{ст} \cdot V_{ярм} = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 0,454 = 3480,54 \quad (3.85)$$

где $V_{ярм} = 4 \cdot (K_{ус.яр} \cdot F_{ст} \cdot L_{м-о} - \frac{V_{угл}}{6}) = 4 \cdot (1,02 \cdot 0,1457 \cdot 1,156 - \frac{0,394}{6}) = 0,454$ м³-объем ярм;

$K_{ус.яр} = 1,02$ – коэффициент усиления ярма.

3.6.1.4 Полная масса магнитопровода, кг:

$$G_{СТ} = G_{стерж} + G_{угл} + G_{ярм} = 4325 + 3011 + 3252 = 10588 \quad (3.86)$$

3.6.2 Потери холостого хода, Вт:

$$P_{xx} = P_{\text{стерж}} + P_{\text{угл.г-тип}} + P_{\text{угл.т-тип}} + P_{\text{ярем}} = \quad (3.87)$$

$$= 4676,22 + 2274,14 + 1921,38 + 3676,52 = 12548,29$$

где $P_{\text{стерж}} = P_{\text{уд}} \cdot K_{\text{р.тех.стерж}} \cdot G_{\text{стерж}} = 1,016 \cdot 1,013 \cdot 4540,58 = 4676,22$ Вт;

$P_{\text{угл.г-тип}} = P_{\text{уд}} \cdot K_{\text{ругл.г-тип}} \cdot G_{\text{угл.г-тип}} = 1,016 \cdot 1,335 \cdot 1675,51 = 2274,14$ Вт;

$P_{\text{угл.т-тип}} = P_{\text{уд}} \cdot K_{\text{ругл.т-тип}} \cdot G_{\text{угл.т-тип}} = 1,016 \cdot 2,2559 \cdot 837,76 = 1921,38$ Вт;

$P_{\text{ярем}} = P_{\text{уд}} \cdot K_{\text{р.тех.ярем}} \cdot G_{\text{стерж}} = 1,016 \cdot 1,039 \cdot 3480,54 = 3676,52$ Вт;

$P_{\text{уд}} = 1,016$ Вт/кг – удельные потери; $K_{\text{р.тех.стерж}}$, $K_{\text{р.тех.угл.г-тип}}$, $K_{\text{р.тех.угл.т-тип}}$, $K_{\text{р.тех.ярем}}$ – коэффициенты увеличения потерь на соответствующих участках магнитопровода.

3.6.3 Намагничивающая мощность, потребляемая электромагнитным преобразователем энергии при холостом ходе, Вар:

$$Q_{xx} = Q_{\text{стерж}} + Q_{\text{угл.г-тип}} + Q_{\text{угл.т-тип}} + Q_{\text{ярем}} = \quad (3.88)$$

$$= 6968,4 + 3951,3 + 3338,37 + 5946,26 = 20204,37$$

где $Q_{\text{стерж}} = q_{\text{уд}} \cdot K_{\text{q.тех.стерж}} \cdot G_{\text{стерж}} = 1,447 \cdot 1,06 \cdot 4540,58 = 6968,4$ Вар;

$Q_{\text{угл.г-тип}} = q_{\text{уд}} \cdot K_{\text{q.тех.угл.г-тип}} \cdot G_{\text{угл.г-тип}} = 1,447 \cdot 1,6288 \cdot 1675,51 = 3951,3$ Вар;

$Q_{\text{угл.т-тип}} = q_{\text{уд}} \cdot K_{\text{q.тех.угл.т-тип}} \cdot G_{\text{угл.т-тип}} = 1,447 \cdot 2,7523 \cdot 837,76 = 3338,37$ Вар;

$Q_{\text{ярем}} = q_{\text{уд}} \cdot K_{\text{q.тех.ярем}} \cdot G_{\text{стерж}} = 1,447 \cdot 1,18 \cdot 3480,54 = 5946,26$ Вар;

$q_{\text{уд}} = 1,447$ Вар/кг – удельная намагничивающая мощность; $K_{\text{q.тех.стерж}}$, $K_{\text{q.тех.угл.г-тип}}$, $K_{\text{q.тех.угл.т-тип}}$, $K_{\text{q.тех.ярем}}$ – коэффициенты увеличения мощности на соответствующих участках магнитопровода.

3.6.4 Реактивная составляющая тока холостого хода, %:

$$i_{xx.p} = \frac{Q_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100 = \frac{20,204 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,202 \quad (3.89)$$

3.6.5 Активная составляющая тока холостого хода, %:

$$i_{xx.a} = \frac{P_{xx}}{S_{ном}} \cdot 100 = \frac{12,55 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,125 \quad (3.90)$$

3.6.6 Полный ток холостого хода, %:

$$i_{xx} = \sqrt{i_{xx.a}^2 + i_{xx.p}^2} = \sqrt{0,125^2 + 0,202^2} = 0,238 \quad (3.91)$$

4 Тепловой расчет электромагнитного преобразователя энергии

Задача теплового расчета состоит в определении превышения температуры концентроров и верхних слоев масла над температурой окружающей среды и выборе системы охлаждения, обеспечивающей значения этих превышений не выше нормализованных: $[Q_{обм}] = 65^\circ\text{C}$ и $[Q_{в.сл.м.}] = 60^\circ\text{C}$.

4.1 Расчет превышения температуры катушки над маслом (проводится для концентроров НН и ВН)

4.1.1 Удельная тепловая нагрузка теплоотдающей поверхности катушки, Вт/м²:

$$q_{катНН} = \frac{\rho_{пр} \cdot j_{нн} \cdot I_{НН.ф} \cdot W_{катНН} \cdot K_{закр.кат.НН} \cdot (1 + K_{доб.кат.НН})}{2 \cdot m_{\sigma} \cdot (b_{кат.НН} + h_{катНН})} = \quad (4.1)$$
$$= \frac{2,13 \cdot 10^{-8} \cdot 3,301 \cdot 10^6 \cdot 529,1 \cdot 2,81 \cdot 1,42 \cdot (1 + 0,22)}{2 \cdot 1 \cdot (0,0305 + 0,019)} = 1846$$

где $K_{закр.кат.нн}$ – коэффициент закрытия части поверхности катушки изоляционными прокладками, создающими канал между катушками;

$$K_{закр.катНН} = \frac{\pi \cdot D_{Н.ср}}{\pi \cdot D_{Н.ср} - n_{прок} \cdot b_{прокНН}} = \frac{3,14 \cdot 0,516}{3,14 \cdot 0,516 - 20 \cdot 0,024} = 1,42;$$

здесь $b_{прокл.нн} = 0,04$ м, $n_{прокл.нн} = 20$;

$$K_{доб.кат} = \frac{P_{в.рад.нн} + P_{в.ос.нн}}{P_{осн.нн}} = 0,22$$

$K_{доб.кат.нн} = 0,22$ – коэффициент, учитывающий действие добавочных потерь, равный отношению суммы добавочных потерь в концентрорах к основным потерям.

$$q_{катВН} = \frac{\rho_{пр} \cdot j_{вн} \cdot I_{ВН.ф} \cdot W_{катВН} \cdot K_{закр.кат.ВН} \cdot (1 + K_{доб.кат.ВН})}{2 \cdot m_{\sigma} \cdot (b_{кат.ВН} + h_{катВН})} = \quad (4.2)$$
$$= \frac{2,13 \cdot 10^{-8} \cdot 2,492 \cdot 10^6 \cdot 25,1 \cdot 51,81 \cdot 1,415 \cdot (1 + 0,015)}{2 \cdot 2 \cdot (0,1365 + 0,0061)} = 153,049$$

$$\text{где } K_{\text{закр.катВН}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{В.ср}}}{\pi \cdot D_{\text{В.ср}} - n_{\text{прок}} \cdot b_{\text{прок.ВН}}} = \frac{3,14 \cdot 0,8035}{3,14 \cdot 0,8035 - 20 \cdot 0,037} = 1,415$$

здесь $b_{\text{прокл.ВН}}=0,037$ м, $n_{\text{прокл.ВН}}=20$;

$$K_{\text{доб.кат}} = \frac{P_{\text{В.РАД.ВН}} + P_{\text{В.ОС.ВН}}}{P_{\text{ОСН.ВН}}} = 0,015$$

$K_{\text{доб.кат.ВН}}=0,015$ – коэффициент, учитывающий действие добавочных потерь, равный отношению суммы добавочных потерь в концентре к основным потерям.

4.1.2 Расчет превышения температуры катушки над маслом, °С:

$$Q_{\text{кат.мсНН}} = f_{1\text{НН}} \cdot q_{\text{катНН}}^{K_{\text{кат}}} + f_{2\text{НН}} \cdot q_{\text{катНН}} = 0,143 \cdot 1846^{0,7} + 0 \cdot 1846 = 27,647 \quad (4.3)$$

где $f_{1\text{НН}} = 0,147 \cdot \left[(5 \cdot b_{\text{катНН}} - 0,18) \right] = 0,147 \cdot \left[(5 \cdot 0,0305 - 0,18) \right] = 0,143$;

$$f_{2\text{НН}} = 2,75 \cdot (t_{\text{вНН}} - 0,55 \cdot 10^{-3}) = 2,75 \cdot (0,55 \cdot 10^{-3} - 0,55 \cdot 10^{-3}) = 0 ;$$

$$K_{\text{кат}} = 0,7.$$

$$Q_{\text{кат.мсВН}} = f_{1\text{ВН}} \cdot q_{\text{катВН}}^{K_{\text{кат}}} + f_{2\text{ВН}} \cdot q_{\text{катВН}} = 0,221 \cdot 153,049^{0,7} + 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 153,049 = 7,81 \quad (4.4)$$

где $f_{1\text{ВН}} = 0,147 \cdot \left[(5 \cdot b_{\text{катВН}} - 0,18) \right] = 0,147 \cdot \left[(5 \cdot 0,1365 - 0,18) \right] = 0,221$;

$$f_{2\text{ВН}} = 2,75 \cdot (t_{\text{вВН}} - 0,55 \cdot 10^{-3}) = 2,75 \cdot (1,35 \cdot 10^{-3} - 0,55 \cdot 10^{-3}) = 2,2 \cdot 10^{-3} ;$$

$$K_{\text{кат}} = 0,7.$$

4.2 Расчет превышения температуры масла над воздухом

4.2.1 Превышение температуры масла над воздухом исходя из норм нагрева масла, °С:

$$Q_{\text{м.ср}} = \frac{Q_{\text{в.сл.м}}}{1,2 \cdot K_{\text{тц}}} = \frac{60}{1,2 \cdot 1,17} = 42,736 \quad (4.5)$$

где $K_{\text{тц}}$ – коэффициент, учитывающий взаимное расположение тепловых центров электромагнитного преобразователя энергии;

$$K_{\text{тц}} = 1,179 \cdot a_{\text{тц}}^2 - 1,375 \cdot a_{\text{тц}} + 1,473 = 1,179 \cdot 0,871^2 - 1,375 \cdot 0,871 + 1,473 = 1,17$$

$a_{\text{тц}}$ – коэффициент, выражающий отношение высоты центра потерь $H_{\text{цп}}$ к высоте центра охлаждения $H_{\text{цо}}$;

$$\alpha_{m.ц.} = \frac{H_{ц.п.}}{H_{ц.о.}} = \frac{D_{ст} + h_{б-ня} + \frac{1}{2} \cdot H_{окн}}{H_{окн} + 2 \cdot D_{ст} - \frac{1}{2} \cdot H_{мо}} = \frac{0,45 + 0,03 + \frac{1}{2} \cdot 1,293}{1,293 + 2 \cdot 0,45 - \frac{1}{2} \cdot 1,8} = 0,871 ;$$

$H_B = H_{окн} + 2 \cdot D_{СТ} + h_{Б-вгя} + h_{Б-ня} = 1,293 + 2 \cdot 0,45 + 0,1 + 0,03 = 2,323$ м - высота бака;

$h_{Б-ня} = 0,03$ и $h_{Б-вгя} = 0,1$ м – расстояния от нижнего ярма до дна бака и верхнего ярма магнитопровода до крышки бака;

$H_{мо} = 1800$ мм - межосевое расстояние по высоте между присоединительными патрубками радиатора.

4.2.2 Превышение температуры масла над воздухом исходя из норм нагрева концентров, °С:

$$Q_{м.ср} = [Q_{обм}] - Q_{(кат.мс)макс} = 65 - 27,647 = 37,353 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.6)$$

где $Q_{(кат.мс)макс} = Q_{кат.нн.мс} = 27,647 \text{ } ^\circ\text{C}$ - превышение температуры наиболее нагретого концентра над маслом (разд. 4.1.2).

4.3 Расчет количества радиаторов охлаждения

4.3.1 Расчетные потери электромагнитного преобразователя энергии, Вт:

$$P_{расч} = 1,1 \cdot (P_{хх} + P_{кз.ном}) = 1,1 \cdot (12,55 \cdot 10^3 + 48,35 \cdot 10^3) = 66,99 \cdot 10^3 \quad (4.7)$$

4.3.2 Удельная тепловая нагрузка поверхности бака, Вт/м²:

$$q_B = \left(\frac{Q_{м.ср}}{0,262} \right)^{1,25} = \left(\frac{37,353}{0,262} \right)^{1,25} = 492,64 \quad (4.8)$$

4.3.3 Тепловой поток отводимый поверхностью бака, Вт:

$$Q_B = q_B \cdot \left[H_B \cdot \Pi_B + \left(2 \cdot L_{м-о} \cdot B_B + \frac{\pi \cdot B_B^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right] = \quad (4.9)$$

$$= 492,64 \cdot \left[2,323 \cdot 12,048 + \left(2 \cdot 1,293 \cdot 1,506 + \frac{3,14 \cdot 1,506^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right] = 15,73 \cdot 10^3$$

4.3.4 Тепловой поток отводимый радиаторам, Вт:

$$Q_{рад} = P_{расч} - Q_B = 66,99 \cdot 10^3 - 15,73 \cdot 10^3 = 51,26 \cdot 10^3 \quad (4.10)$$

Выбираем панельный радиатор типа MRNG 1800-N/520 со следующими параметрами:

- расстояние между осями патрубков 520 мм;
- количество панелей в радиаторе 25 шт;
- количество радиаторов 3шт;
- ширина панели 520 мм;
- геометрическая поверхность панели радиатора 1,922 м².

4.4 Выбор вентиляторов

Выбираем радиатор типа FTDA-050-229-B-8100 со следующими параметрами:

- общее количество вентиляторов 3 шт;
- диаметр вентилятора 0,5 м;
- расход воздуха одного вентилятора 8100 м³/ч

5 Расчет динамической стойкости электромагнитного преобразователя энергии при коротком замыкании

5.1 Кратности амплитуды ударного тока короткого замыкания по отношению номиналу:

$$K_{кз} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot K_{кз,уст} = \sqrt{2} \cdot 1,871 \cdot 9,113 = 24,107 \quad (5.1)$$

где $K_{кз,уст} = \frac{100}{U_{кз}} = \frac{100}{10,974} = 9,113$ - кратность установившегося тока к.з.;

$$K_{уд} = \left(1 + e^{\frac{-\pi \cdot U_{кз,а.мин}}{U_{кз,р.мин}}} \right) = \left(1 + e^{\frac{-3,140,483}{10,963}} \right) = 1,871 - \text{ударный коэффициент, учитывающий}$$

увеличение тока к.з. из-за наличия апериодической составляющей.

5.2 Ударный ток короткого замыкания, проходящий через каждый виток в катушки концентроров ВН и НН, А:

$$I_{кз,уд.нн} = I_{нн,ф.ном} \cdot K_{кз} = 529,1 \cdot 24,107 = 12,76 \cdot 10^3 \quad (5.2)$$

$$I_{кз,уд.вн} = I_{вн,ф.ном} \cdot K_{кз} = 25,1 \cdot 24,107 = 605,145 \quad (5.3)$$

5.3 Расчет механических напряжений в концентраторах от радиальных сил

Радиальные силы в пределах концентратора возникают при взаимодействии проходящего через проводник тока к.з. с осевым полем рассеяния, в котором находится проводник.

5.3.1 Средний радиус концентроров ВН и НН, м:

$$R_{срНН} = \frac{D_{н.ср}}{2} = \frac{0,5165}{2} = 0,258 \quad (5.4)$$

$$R_{срВН} = \frac{D_{в.ср}}{2} = \frac{0,8035}{2} = 0,402 \quad (5.5)$$

5.3.2 Средняя алгебраическая величина индукции осевого поля рассеяния при коротком замыкании, действующей по ширине катушки, Тл:

$$B_{ос.ср.кз} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot \frac{B_{ос.НН}}{2} = 1,871 \cdot 9,113 \cdot \frac{0,107}{2} = 0,915 \quad (5.6)$$

$$B_{ос.ср.кз} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot \frac{B_{ос.ВН}}{2} = 1,871 \cdot 9,113 \cdot \frac{0,107}{2} = 0,915 \quad (5.7)$$

5.3.3 Напряжение растяжения или сжатия в проводнике катушки, Н/м²:

$$G_{рад.нн} = \frac{B_{ос.ср.кз} \cdot I_{кз.уд.нн} \cdot R_{ср.нн}}{F_{обм.нн}} = \frac{0,915 \cdot 12,76 \cdot 10^3 \cdot 0,258}{160,28 \cdot 10^{-6}} = 1,881 \cdot 10^7 \quad (5.8)$$

$$G_{рад.вн} = \frac{B_{ос.ср.кз} \cdot I_{кз.уд.вн} \cdot R_{ср.вн}}{F_{обм.вн}} = \frac{0,915 \cdot 605,145 \cdot 0,402}{11,44 \cdot 10^{-6}} = 1,945 \cdot 10^7 \quad (5.9)$$

5.4 Расчет механических напряжений в концентраторах от осевых сил

Осевые силы в проводниках концентратора возникают при взаимодействии проходящего через проводник тока к.з. с радиальным полем рассеяния, в котором находится проводник.

5.4.1 Длина расчетного пролета, м:

$$l_{оНН} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{срНН}}{n_{прок}} - b_{прокНН} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,258}{20} - 0,024 = 0,057 \quad (5.10)$$

$$l_{оВН} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{срВН}}{n_{прок}} - b_{прокВН} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,402}{20} - 0,037 = 0,089$$

5.4.2 Средняя алгебраическая величина индукции радиального поля рассеяния при коротком замыкании, действующего по высоте концентратора, Тл:

$$B_{рад.ср.кз.нн} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot 0,17 \cdot B_{ос.нн} = 1,871 \cdot 9,113 \cdot 0,17 \cdot 0,107 = 0,311 \quad (5.11)$$

$$B_{рад.ср.кз.вн} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot 0,17 \cdot B_{ос.вн} = 1,871 \cdot 9,113 \cdot 0,17 \cdot 0,107 = 0,311 \quad (5.12)$$

5.4.3 Напряжение изгиба в каждом проводнике катушки определяется из рассмотрения пролета между прокладками катушки как балки с заземленным концом, Н/м²:

$$G_{ocHH} = \frac{B_{рад.ср.кз} \cdot I_{кз.уд.нн} \cdot l_{оHH}^2}{2 \cdot n_{нар} \cdot b_{np} \cdot h_{np}^2} = \frac{0,311 \cdot 12,76 \cdot 10^3 \cdot 0,057^2}{2 \cdot 2 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot (18 \cdot 10^{-3})^2} = 0,222 \cdot 10^7 \quad (5.13)$$

$$G_{ocBH} = \frac{B_{рад.ср.кз} \cdot I_{кз.уд.вн} \cdot l_{оBB}^2}{2 \cdot n_{нар} \cdot b_{np} \cdot h_{np}^2} = \frac{0,311 \cdot 605,195 \cdot 0,089^2}{2 \cdot 2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot (4,75 \cdot 10^{-3})^2} = 1,329 \cdot 10^7 \quad (5.14)$$

5.5 Проверка механической прочности концентроров

5.5.1 Суммарные напряжения в проводнике ВН и НН от радиальных и осевых сил, Н/м²:

$$G_{HH} = G_{радHH} + G_{ocHH} = 1,881 \cdot 10^7 + 0,222 \cdot 10^7 = 2,103 \cdot 10^7 < [G], \quad (5.15)$$

$$G_{BH} = G_{радBH} + G_{ocBH} = 1,945 \cdot 10^7 + 1,329 \cdot 10^7 = 3,274 \cdot 10^7 < [G], \quad (5.16)$$

где $[G]=1,18 \cdot 10^8$ Н/м² – допустимое напряжение для медного провода

Концентр, подвергаящаяся сжатию, должен быть дополнительно проверен на устойчивость по методике расчета круговых двух шарнирных арок. Сжатию подвергается концентр НН.

5.5.2 Критическая радиальная нагрузка $P_{к.НН}$ для круговой арки, действующая на единицу длины арки, Н/м²:

$$P_{к} = K_y \cdot \frac{E_{np} \cdot I_{np}}{R_{срНН}^3} = 99 \cdot \frac{1,15 \cdot 10^{11} \cdot 136,7 \cdot 10^{-12}}{0,258^3} = 90,35 \cdot 10^3 \quad (5.17)$$

где $E_{np}=1,15 \cdot 10^{11}$ Н/м² – модуль упругости медного проводника;

$$I_{npНН} = \frac{h_{npНН} \cdot b_{npНН}^3}{12} = \frac{18 \cdot 10^{-3} \cdot (4,5 \cdot 10^{-3})^3}{12} = 136,7 \cdot 10^{-12}; I_{np} - \text{момент инерции сечения}$$

проводника концентратора; $K_y = \left(\frac{n_{прок}}{2}\right)^2 - 1 = \left(\frac{20}{2}\right)^2 - 1 = 99$ K_y – коэффициент

устойчивости круговой арки;

5.5.3 Критическое напряжение в проводнике $G_{к.НН}$, соответствующее критической радиальной нагрузке $P_{к.НН}$, Н/м²:

$$G_{к} = \frac{K_y \cdot E_{np} \cdot b_{npHH}^2}{12 \cdot R_{cpHH}} = \frac{99 \cdot 1,15 \cdot 10^{11} \cdot (4,5 \cdot 10^{-3})^2}{12 \cdot 0,258^2} = 28,81 \cdot 10^7 \quad (5.18)$$

Критерий устойчивости концентратора, подвергающейся сжатию $G_{pad} = 1,881 \cdot 10^7 \leq G_{к} = 28,81 \cdot 10^7$

5.6 Расчет заземления участка сборки остова электромагнитного преобразователя энергии.

В качестве искусственных заземлителей примем вертикально расположенные электроды. Диаметр электрода примем равным $d=0,01$ м и длиной $l=8$ м. Для связи вертикальных электродов и в качестве самостоятельного горизонтального электрода используем сталь круглого сечения диаметром $d=0,01$ м.

5.6.1 Сопротивление растекания тока с одного стержневого заземлителя у поверхности грунта, Ом:

$$R_1 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 8} \cdot \ln \frac{4 \cdot 8}{0,01} = 14,8 \quad (5.19)$$

5.6.2 Необходимое количество параллельно соединенных заземлителей:

$$n = \frac{R_1}{R_{\bar{a}}} = \frac{14,8}{4} = 3,7, \quad (5.20)$$

Принятое количество параллельно соединенных заземлителей: $n = 4$.

5.6.3 Длина соединительного проводника, м:

$$l = 1,05 \cdot m \cdot (n - 1) = 1,05 \cdot 4 \cdot (4 - 1) = 13, \quad (5.21)$$

где m – расстояние между электродами, $m=4$ м.

5.6.4 Сопротивление растекания тока с одного стержневого заземлителя протяженного в грунте, Ом:

$$R_{\bar{a}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{d \cdot t} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 13} \cdot \ln \frac{13^2}{0,01 \cdot 1} = 11 \quad (5.22)$$

5.6.5 Сопротивление растекания тока искусственного заземлителя, Ом:

$$R_{\text{н}} = \frac{R_1 \cdot R_{\text{а}}}{R_1 \cdot \eta_{\text{г}} + R_{\text{а}} \cdot n \cdot \eta_{\text{в}}} = \frac{14,8 \cdot 11}{14,8 \cdot 0,55 + 11 \cdot 4 \cdot 0,78} = 3,8 \quad (5.23)$$

где $\eta_{\text{г}}$ - коэффициент использования горизонтального электрода с учетом вертикальных электродов, $\eta_{\text{г}}=0,55$; $\eta_{\text{в}}$ - коэффициент использования вертикальных электродов, учитывающий их взаимное экранирование, $\eta_{\text{в}}=0,78$.

Полученное сопротивление искусственных электродов не превышает требуемого сопротивления, $R_{\text{и}} \leq R_{\text{д}}$: $3,8(\text{Ом}) \leq 4(\text{Ом})$.

Заключение

В выпускной квалификационной работе был спроектирован электромеханический преобразователь энергии ТДН-10000/220 со следующими основными характеристиками:

- диаметр стержня 450 мм;
- магнитная индукция 1,65 Тл;
- Высота окна 1293 мм;
- Межосевое расстояние 1156 мм;
- Напряжение к.з. 10,974 %
- Потери к.з 48,35 кВт;
- Потери х.х. 12,55 кВт;
- Ток х.х. 0,238 %
- Масса стали 10588 кг;
- Масса меди 3034 кг;
- Размер бака 4518 x 1506 x 2323 мм

Цели выпускной квалификационной работы достигнуты. Разработанный трансформатор отвечает требованиям ГОСТ

Список использованных источников

1. Быстрицкий, Г.Ф. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: Учеб. пособие для вузов / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И. Кудрин.- М.: Издательский центр «Академия», 2013. -365с.
2. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. Пособие для вузов.5-е изд., перераб. и доп. / П.М. Тихомиров.- М.: Академия, 2006.- 545с.
3. Васютинский, С.Б.. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский.- М., Энергия, 2010.- 432с.
4. Дымков, А.М.. Расчет и конструирование трансформаторов / А.М. Дымков.- М.: Академия, 2011.- 263с.
5. Гончарук, А.И.. Расчет и конструирование трансформаторов / А.И. Гончарук.- М.: Энергия, 2006.- 256с.
6. Лейтес, Л.В.. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес. – М.: Энергия, 2006.- 392с.
7. Сапожников, А.В. Конструирование трансформаторов.-2-е изд. / А.В. Сапожников. – М.: Энергия, 2007.- 360с.
8. Булгаков, Н.И. Расчет трансформаторов / Н.И. Булгаков.– М.: Энергия, 2006.- 302с.
9. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов.– М: Энергия, 2008 г.- 422 с.
10. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений.-3-е изд., перераб. / А.И. Вольдек.- М.: Академия, 2010.- 782с.
11. Петров, Г.Н.. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. Учебник для вузов / Г.Н. Петров.- М.: Энергия, 2006. - 240с.
12. Аншин, В.Ш. Сборка трансформаторов: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб., и доп / В.Ш. Аншин, З.И. Худяков.- М.: Академия, 2011.- 548с.

13. Голунов, А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / А.М. Голунов, Н.С. Сещенко.- М.: Энергия, 2006.- 282с.
14. Антипов, М.В. Технология производства электрических машин: Учеб. пособие для вузов / М.В. Антипов, Л.С. Герасимова.- М.: Энергия, 2012.- 490 с.
15. Терентьева, М.А. Расчет силовых масляных трансформаторов: Методические указания к курсовому проектированию / М.А. Терентьева, Ю.И. Борю, Е.М. Леунова.- Тольятти: ТГУ, 2006. -54с.
16. Boyajian, A. Theory of fthree-circuit transformers. – «Transactions of AIEE», 2006, v. 43.
17. Moser, H.P. Transformerboard. Special print of Scienia Electrica. 2007
18. Turowski, J. Engineering electrodynamicics: Electric Machine, Transformer and Power Equipment Design. CRC Press. 2014.
19. Norris, E.T. Mechanical strenght of power transformers in service. Proc. IEE. V. 104.
20. Fukuda, T. New Technology for Large Power Transformer. Hitachi Review. 2004. v. 33.
21. Исаев, Ю.Н. Практика использования системы MathCad в расчетах электрических и магнитных цепей [Электронный ресурс] : [учеб.пособие] / Ю.Н. Исаев, А. М. Купцов. – Москва: СОЛОН – ПРЕСС, 2013. – 180 с. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/books/element.php?pllid=23589>
22. Калентионок, Е.В. Оперативное управление в энергосистемах [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.В. Калентионок, В.Г. Прокопенко, В.Т. Федин. – Электрон .дан. - «Высш. школа», 2007.- 352с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/books/element.php?pllid>