

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«**СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**»
Саяно-Шушенский филиал

Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических
систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.А. Ачитаев
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2022 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМ СТАТОРА И РОТОРА
НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ГИДРОАГРЕГАТА**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Руководитель	_____	канд.техн.наук, и.о. зав. кафедрой ГГЭЭС, <u>Саяно-Шушенского филиала</u>	<u>А.А. Ачитаев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____	зам. главного инженера по технической части филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного»	<u>Н.С. Савельева</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	<u>им. П.С. Непорожного»</u>	<u>Д.Ю. Рыбалко</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролёр	_____		<u>К.П. Синельникова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2022

АННОТАЦИЯ

К магистерской диссертации Савельевой Натальи Сергеевны, студента 2 курс магистратуры Саяно-Шушенского филиала Сибирского федерального университета на тему «Оценка влияния искажения форм статора и ротора на параметры работы гидроагрегата».

Диссертация состоит из 3 глав. В работе представлено 11 иллюстраций, 3 таблицы, общим объемом 58 страницы.

Объектом исследования при написании работы стал гидрогенератор.

В настоящее время на первое место выдвигается обеспечение надежности эксплуатации оборудования гидроэлектростанции, его готовности к работе.

При эксплуатации гидрогенераторов современной энергосистемы ГЭС возникают отклонения форм статора от идеальной окружности, что может привести к снижению КПД, перенасыщению магнитопровода статора, броскам тока и выходу из строя гидрогенератора.

Основной проблемой является то, что при искажении формы статора/ротора гидроагрегата не всегда можно определить, по какой причине произошли искажения.

Создание и внедрение математических моделей с анализом различных форм искажения, которые также характеризуют связь между режимными параметрами и геометрическими изменениями формы статора или ротора, позволит выявлять повреждения, искажения на раннем этапе.

Ключевые слова: деформация, ротор, статор, воздушный зазор, обмотка, магнитный поток, демпферная обмотка.

АВТОРЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа на тему «Оценка влияния искажения форм статора и ротора на параметры работы гидроагрегата»

Цель работы:

Разработать концепцию, для оценки изменений геометрии воздушного зазора.

Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:

1. Сделать анализ геометрии исходя из представленного технического задания и рекомендаций по проектированию электрических машин переменного тока.

2. Аналитически рассчитать переходную характеристику электромагнитного момента генератора в условии симметричного воздушного зазора в режиме внезапного короткого замыкания и соотнести с результатами численного моделирования.

3. На основании анализа геометрии машины и рекомендациям по проектированию машин переменного тока необходимо разработать модель синхронной машины.

4. Произвести аналитическую верификация электромагнитного момента в режиме внезапного короткого замыкания (ВКЗ) при симметричном воздушном зазоре.

5. Сделать выводы.

Научная новизна. Работа посвящена процессам, связанных с анализом различных форм искажений статора/ротора гидрогенератора в нормативных и не нормативных параметрах. Разобраны различные режимы искажений и сформулированы математические модели, характеризующие связи между режимными параметрами и геометрическими изменениями формы статора или ротора. Данная работа будет полезна при эксплуатации генераторов для оценки изменений геометрии воздушного зазора.

Объем диссертации составляет 58 страниц, содержит 66 иллюстрации и 3 таблицы.

Основное содержание работы:

Во введении раскрывается актуальность исследования по выбранному направлению, указывается его значимость, ставятся цели и задачи, необходимые для ее реализации.

Первая глава посвящена роли идентификации в электроэнергетики, а также рассмотрены существующие методы идентификации.

Во второй главе рассматривается конструкция синхронной машины и ее особенности. Производится представление синхронной машины как математической модели и вывод формулы, которая будет использоваться для расчета.

Третья глава представляет собой непосредственно результаты расчетов.

ABSTRACT

Final qualifying work on the topic "Assessment of the effect of distortion of the stator and rotor shapes on the parameters of the hydraulic unit"

Objective:

To develop a concept for assessing changes in the geometry of the air gap.

Tasks to be solved during the execution of the work:

1. To make an analysis of the geometry based on the presented technical specifications and recommendations for the design of AC electric machines.
2. Analytically calculate the transient characteristic of the electromagnetic moment of the generator under the condition of a symmetrical air gap in the mode of sudden short circuit and correlate with the results of numerical simulation.
3. Based on the analysis of the geometry of the machine and recommendations for the design of AC machines, it is necessary to develop a model of a synchronous machine.
4. Perform analytical verification of the electromagnetic moment in the mode of sudden short circuit (VCC) with a symmetrical air gap.
5. Draw conclusions.

Scientific novelty. The work is devoted to the processes associated with the analysis of various forms of distortion of the stator/rotor of a hydrogenerator in regulatory and non-regulatory parameters. Various distortion modes are analyzed and mathematical models are formulated that characterize the relationship between the operating parameters and geometric changes in the shape of the stator or rotor. This work will be useful in the operation of generators to assess changes in the geometry of the air gap.

The volume of the dissertation is 58 pages, contains 66 illustrations and 3 tables.

The main content of the work:

The introduction reveals the relevance of the research in the chosen direction, indicates its significance, sets goals and objectives necessary for its implementation

The first chapter is devoted to the role of identification in the electric power industry, as well as the existing identification methods.

The second chapter discusses the design of a synchronous machine and its features. The synchronous machine is presented as a mathematical model and the formula that will be used for calculation is output.

The third chapter is directly the results of calculations.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 Развитие современной энергетики и идентификация параметров синхронных машин	10
1.1 Основные тенденции развития электроэнергетики	10
1.2 Идентификация параметров.....	11
1.3 Идентификация параметров синхронных машин.....	15
1.4 Синхронная машина как математическая модель	17
2 Постановка задачи.....	18
2.1 Разработка математической модели	20
2.2 Математическое моделирование режимов синхронного генератора.....	30
3 Расчеты для различных вариантов изменения формы геометрии ротора.....	32
3.1 Расчеты по измененной геометрии ротора на 10% в сторону статора.....	32
3.2 Расчеты по измененной геометрии ротора на 20% в сторону статора.....	36
3.3 Расчеты по измененной геометрии ротора на 35% в сторону статора.....	40
3.4 Расчеты по измененной геометрии ротора на 20% в сторону от статора (зазор увеличивается)	43
3.5 Расчеты по измененной геометрии ротора на 35% в сторону от статора..	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	55
ПРИЛОЖЕНИЕ А Аналитический расчет числа витков в обмотке возбуждения	57

ВВЕДЕНИЕ

Работа по исследованию деформации ротора синхронной машины гидроагрегата состоит из анализа искажений геометрии генератора при симметричном воздушном зазоре и расчетов основных параметров гидроагрегата при деформации ротора. Проведен анализ результатов при номинальной мощности и в режиме внезапного короткого замыкания для вычисления основных и добавочных потерь с целью определения КПД. Первый этап состоял в анализе геометрии исходя из представленного технического задания и рекомендаций по проектированию электрических машин переменного тока [1, с. 215]. Для проверки исходного варианта геометрии генератора была проведена верификация с целью определения адекватности численной модели с аналитическим расчётом в режиме внезапного короткого замыкания. Была аналитически рассчитана переходная характеристика электромагнитного момента генератора в условии симметричного воздушного зазора в режиме внезапного короткого замыкания и соотнесена с результатами численного моделирования, которые показали сходимость. В СТО 17330282.27.140.001-2006 описан критерий допустимого искажения формы ротора, где воздушный зазор между статором и ротором в диаметрально противоположных точках не должен отличаться друг от друга более чем на $\pm 20\%$ от среднего значения, равного их полусумме. В данном отчете был проведен расчет, охватывающий данный промежуток изменения диаметра, а также проведен анализ, учитывающий $\pm 35\%$ уменьшение величины воздушного зазора.

Результаты исследований показали, что изменение величины воздушного зазора до 10% внесет существенный вклад на величину индукции магнитного поля, что в десять раз увеличила величину основных потерь в сердечнике. В дополнении необходимо отметить о возрастающем влиянии в автоматической идентификации параметров гидрогенераторов. Причиной роста к этой проблеме можно отнести дорогостоящие и существующие способы идентификации. Также, наблюдается значительное снижение напряжения (от 25 до 50%) от

номинального напряжения в режиме номинальной мощности, что требует увеличения тока в обмотке возбуждения, которое приводит к увеличению омических потерь в обмотке ротора. Полевой расчет проводился средствами метода конечных элементов программного комплекса Ansys Maxwell и верификация в программе Matlab Simulink.

В качестве математического аппарата расчета полей были применены формулы расчета Горева-Парка и формулы Штейнмеца для вычисления потерь в электротехнической стали.

1 Развитие современной энергетики и идентификация параметров синхронных машин

1.1 Основные тенденции развития энергетики

Электроэнергетика – отрасль экономики Российской Федерации, которая имеет высокую инфраструктурную значимость. Электроэнергетика включает в себя комплекс экономических отношений, возникающих в процессе производства, передачи электрической энергии, сбыта и потребления электрической энергии с использованием производственных и иных имущественных объектов. Кроме всего этого энергетика полностью обеспечивает потребности промышленности, транспорта, сельского хозяйства и населения страны в электрической и тепловой энергии.

Продукция электроэнергетики используется на всех этапах производства и продажи товаров общего потребления, на производстве в целях обеспечения технологических процессов, полной автоматизации и высокой точности регулирования, способствуя значительному увеличению производительности труда, уменьшению расхода материальных ресурсов и повышению качества продукции.

В настоящее время в электроэнергетике России завершился этап крупномасштабной реструктуризации отрасли. Основа реформирования электроэнергетики заключалась в повышении эффективности производства электроэнергии, привлечении дополнительных инвестиций в электроэнергетику, строительстве новых и модернизация существующих мощностей, развитии конкуренции между производителями электрической энергии, сокращении неэффективных расходов и др.

Для удовлетворения спроса в энергетике, правительство РФ строит планы о выведении энергетики на новый уровень. Для того, чтобы обеспечить условия для инновационного развития.

Для достижения цели необходима разработка и внедрение новых материалов, которые позволяют создавать более совершенные технические устройства и энергетические установки с более высокими показателями КПД, надёжности, безопасности и экологичности.

По следующим направлениям возможно проведение модернизации и обновление оборудования:

1. Замена старого оборудования на новые образцы;
2. Замена оборудования на новые инновационные технологии, которые могут позволить существенно сократить воздействие на окружающую среду, использование энергетических ресурсов, повысить эффективность работы и передачи вырабатываемой энергии;
3. Развитие и внедрение возобновляемой энергетики;
4. Внедрение и развитие новых технологических устройств, которые в первую очередь смогут развить информационные и компьютерные технологии;
5. Повышение уровня автоматизации процессов.

1.2 Идентификация параметров

Для решения глобальных задач в электроэнергетике активно применяются приемы моделирования, которые имеют такие задачи математического регулирования как: прямые и обратные задачи.

Прямая задача включает в себя изучение математической модели для расширенного познания, при условии, что параметры и структура модели известны.

Обратная задача включает в себя построение математических моделей на результатах наблюдений за изменением объекта моделирования.

Идентификация – это раздел, который решает обратную задачу моделирования. Математическая модель может быть представлена в виде функций таких как алгебраических, операторных, интегральных, дифференциальных, интегро-дифференциальных уравнений, передаточных т.д.

Математические модели имеют большое разнообразие, различие в условиях проведения идентификации приводят к созданию множества методов идентификации, которые можно классифицировать по различным признакам.

По способу подачи возмущающего воздействия выделяют активные и пассивные методы идентификации. При активной идентификации специально сформированный тестовый сигнал подаётся на вход объекта. Наиболее распространёнными являются ступенчатые, импульсные, гармонические сигналы, случайные воздействия с заданными параметрами.

Преимуществами данного подхода являются целенаправленный характер идентификации и минимальные требования к априорной информации об объекте. В случае активной идентификации обычно объект исследования выводится из нормальных условий функционирования. При пассивной идентификации объект находится в нормальном эксплуатационном режиме работы и на его входы поступают естественные сигналы управления.

В большинстве случаев пассивная идентификация используется для уточнения параметров модели и отслеживания изменений в объекте.

Преимущество этого подхода заключается в отсутствии необходимости подачи дополнительных возмущающих воздействий, достаточно лишь записывать входные и выходные сигналы.

По временным затратам методы идентификации делятся на оперативные и ретроспективные. Оперативная идентификация осуществляется со скоростью протекания процесса, и при обновлении данных, происходит уточнение параметров модели. При ретроспективной идентификации сначала собирается весь массив данных, после чего происходит определение параметров. Можно выделить две составляющие задачи идентификации – это определение структуры (структурная идентификация) и определение параметров (параметрическая идентификация). В этом случае объект (элемент системы, объект управления, элемент технологического процесса и т. п.) представляется "черным ящиком". После получения так называемого объекта его анализируют, подвергают внешним воздействиям и по окончании добиваются математической модели

(описание его структуры и параметров), то есть превращают "черный ящик" в "белый ящик", добиваются его "информационной прозрачности". При идентификации объектов определяются параметры при заранее заданной структуре математической модели объекта. Происходит переход от "серого ящика" к "белому ящику".

Такие методы, как структурной и параметрической идентификации часто используются при решении задач в электроэнергетике, в основном, для определения параметров элементов, включенных в электрическую сеть, а также для идентификации параметров состояния, идентификации низкочастотных колебаний в сети и т. д.

Для расчета установившихся и переходных режимов в нормальных и аварийных условиях применяется математическое моделирование энергосистем. Результаты моделирования применяются для решения широкого спектра задач, таких как: проектирование, планирование режимов работы энергосистемы, настройка РЗА. Необходимо, чтоб модель энергосистемы была верифицирована, для того чтоб при подаче одинаковых возмущающих воздействий на объект и на модель выходные параметры не отличались друг от друга более чем на допустимую величину невязки.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что, во-первых, необходимо правильно моделировать каждый элемент объекта в зависимости от задачи, например, нагрузку представляем в виде: «черного ящика», который можно охарактеризовать номинальным напряжением, частотой и током.

Во-вторых, необходимо знать параметры каждого элемента: ЛЭП, трансформаторов, генераторов, двигателей, реакторов, выключателей, турбин и т. д. Чем степень достоверности модели электрической системы будет больше, чем адекватнее будут результаты, которые будет выдавать автоматика..

Большое количество методов идентификации относится к определению параметров машин, в том числе синхронных.

Таковыми методами являются:

– метод определения индуктивных сопротивлений исходя из опытов короткого замыкания и холостого хода. По снятым характеристикам и измерениям производится идентификация параметров;

– метод малого скольжения, при котором машина переводится асинхронный режим путем подачи на обмотку ротора постоянного тока, а на статорную подается переменное напряжение. В результате возникают биение токов и напряжений в обмотках статора. По снятым максимальным и минимальным амплитудам вычисляются продольное и поперечное сопротивления;

– метод поворота фазы питания;

Существуют и другие методы с иным математическим аппаратом, например, градиентный метод, нейронные сети, метод малых колебаний, метод наименьших квадратов и др.

Использование определенного математического аппарата зависит от целей и задач. Необходимо, чтобы критерий адекватности математической модели соблюдался по максимуму, в основу которого положена количественная оценка соответствия модельных и экспериментальных результатов.

Исходя, из анализа существующих методов идентификации отметим важный недостаток. Они все дорогостоящие. Поэтому нами предложен подход «виртуальной идентификации», основанный на «цифровом двойнике». Применяемые методы и расчеты основаны на конечно-элементном анализе, с существенным дополнением нелинейной динамической моделью вращающейся машины. Поэтому в рассматриваемом примере магистерской диссертации применен метод динамической триангуляции сетки конечных элементов. Как показывает практика применение данного подхода он является на ряду с уравнением Максвелла самым точным описанием режимов электрических машин.

1.3 Идентификация параметров синхронных машин

В эксплуатации в основном применяют трехфазные машины переменного тока. Машины с другим числом фаз используются для специальных целей.

Действие всех многофазных машин основано на принципе вращающегося магнитного поля. В данном разделе будет рассматриваться синхронная машина, так как в настоящее время именно эти машины являются основными источниками энергии на многих станциях и исследуется идентификация ее параметров в данной работе.

Синхронная машина (СМ) – это машина, в которой вращение ротора происходит с той же скоростью и в том же направлении, что и вращающееся магнитное поле. То есть, ротор вращается в такт, или синхронно с вращающимся полем, поэтому данный вид машин так и называется.

Синхронная машина состоит из неподвижной части, именуемой статором, и подвижной части – ротора. Обмотка статора выполнена с аналогичным числом пар полюсов, как и ротор и называется также якорной обмоткой. Якорем называется сам сердечник с обмоткой.

У ротора синхронной машины есть обмотка возбуждения, которая получает питание от постороннего источника постоянного тока. Генератор постоянного тока является, как правило, таким источником. Он еще называется возбудителем и крепится на одном валу с машиной. Ротор вместе со своей обмоткой возбуждения называется также индуктором.

По своим конструктивным особенностям синхронные машины подразделяются на явнополюсные и неявнополюсные.

Особенностью явнополюсных машин является то, что они имеют явно выраженные полюса. При явнополюсной конструкции такое исполнение приводит к условиям механической прочности ротора, крепления его полюсов и обмотки возбуждения.

Синхронные машины обратимы. Они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. ЭДС статора является симметричной

трехфазной системой ЭДС. При ее подключении к обмотке статора симметричной нагрузки, машина будет работать в режиме генератора, так как эта обмотка нагрузится симметричной системой токов.

Для работы машины в режиме двигателя, к обмотке статора подводится трехфазный ток из сети. В этом случае происходит взаимодействие полей статора и ротора и поле статора увлекает за собой ротор.

Синхронные двигатели получили широкое распространение, так как используются в качестве двигателей большой мощности. Они способны сохранять скорость вращения независимо от нагрузки, так же имеют возможность генерировать реактивную мощность и поддерживать напряжение на заданном уровне.

Асинхронные двигатели большой мощности в свою очередь потребляют слишком большое количество реактивной мощности и тем самым могут вызывать недопустимое снижение напряжения в нагрузочном узле.

Кроме того, синхронные двигатели малой мощности (микродвигатели) также используются преимущественно на постоянных магнитах.

Задача идентификации синхронных машин в большинстве случаев – параметрическая идентификация, на сегодняшний день заключается в том, чтобы определить только параметры объекта, так как его структура известна. Анализируя работы, причастные к параметрической идентификации синхронных машин, следует, что решение данной задачи состоит из нескольких составляющих.

1. Первоначально выбирается математическая модель синхронной машины.

2. Выбор исходного режима работы, такие как с зафиксированным ротором, режим холостого хода, нагрузочный режим, частично разобранный и т. д.

3. Выбор возмущающего воздействия. В данном случае разнообразие этих воздействий скажется наилучшим образом на результате эксперимента.

Поданный на статор или на ротор переменный ток, постоянный ток, механическое воздействие на вал и другое, может являться воздействием.

4. Определение входные и выходные сигналы, например определение токов, напряжения статора и/или ротора, скорость вращения вала, угол ротора, мощности и т. д., которые необходимы для успешной идентификации параметров.

5. Заключаящим и достаточно важным пунктом является выбор математического аппарата для обработки полученных сигналов и определения параметров модели СМ.

1.4 Синхронная машина как математическая модель

Первым пунктом решения задачи параметрической идентификации является выбор математической модели. В данной работе была рассмотрена модель синхронной машины на основе уравнения Парка-Горева.

При рассмотрении необходимо учесть ряд некоторых допущений:

– магнитная проницаемость является бесконечно большой величиной, поэтому магнитное поле машины представляется как сумма магнитных полей;

– учитывается только первая гармоника в полях самоиндукции и взаимной индукции обмоток статора и ротора, а зубцовые поля в зазоре не учитываются;

– магнитопровод и обмотки машины симметричны, а полюса магнитопровода идентичной формы и симметричны относительно осей q и d . Поэтому, обмотка статора имеет одинаковое количество витков во всех фазах и равные сопротивления. Относительно осей q и d демпферные обмотки симметричны

2 Постановка задачи

Из анализа геометрии машины на основании рекомендации по проектированию машин переменного тока и текста задания настоящего технического задания была разработана синхронная машина и представлена на рисунке 1, в таблице 1 приведены ее номинальные данные.

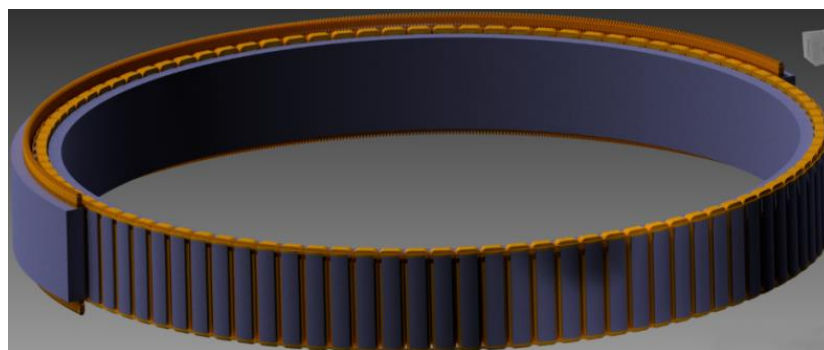


Рисунок 1 – Геометрия исходной синхронной машины

Таблица 1 – Номинальные данные синхронной машины

Наименование показателя	Значение показателя
Номинальная мощность (kVA)	117650
Коэффициент мощности	0,85
Номинальное напряжение (V)	13800
Схема соединения обмоток	звезда
Число полюсов	96
Частота (Hz)	50
Расчетная скорость (rpm)	62,5
Рабочая температура(С)	75
КПД (%)	98,5
Номинальный ток возбуждения (A)	1440

Основной трудностью являлась недостающая информация по геометрии и числа витков обмотки ротора. С целью уточнения расчета количества витков был проведен аналитический расчет числа витков в обмотке возбуждения исходя из необходимого потока через полюс (Приложение А). Магнитное поле гидрогенератора, как и любой электрической машины, имеет пространственно-

периодическое распределение с периодом, равным двойному полюсному делению. На рисунке 2 представлен график распределения магнитной напряженности в якоре СМ. [2, с. 114]:

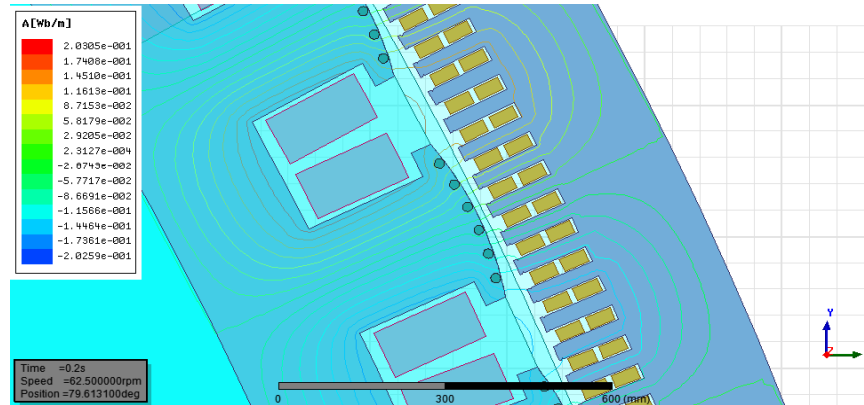


Рисунок 2 – График распределения магнитной напряженности в якоре синхронной машины в режиме номинальной мощности

Поток, проходящий через один полюс определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{U_1}{4,44 \cdot k_\phi \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot p'} \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток, Вб;

U_1 – номинальное напряжение статора, В;

k_ϕ – обмоточный коэффициент;

W_1 – число витков;

f_1 – частота сети, Гц;

p – число пар полюсов.

Обмоточный коэффициент вычисляется по формуле:

$$k_{об} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m} \cdot v\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2mq} \cdot v\right)} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta \cdot v\right), \quad (2)$$

где u – номер гармоники ЭДС;

q – число пазов на полюс и фазу;

β – относительный шаг обмотки.

2.1 Разработка математической модели

Расчет магнитного поля является основой для точного последующего расчета магнитной цепи, характеристик, параметров и потерь машины. С целью увеличения качества генерации электроэнергии была выбрана конфигурация отношения ширины башмака к ширине полюсного деления равного 0,7 в условии соотношения максимальной ширины воздушного зазора к минимальной в пределах одного башмака ротора, равного 1,5. Эта конфигурация на основании кривых Виземана позволит обеспечить коэффициент формы равного 1,07, что снизит высшие гармоники [2, с. 147].

На рисунках 3-6 представлены основные характеристики и графики напряжения и тока синхронного генератора в режиме номинальной мощности и режиме внезапного короткого замыкания.

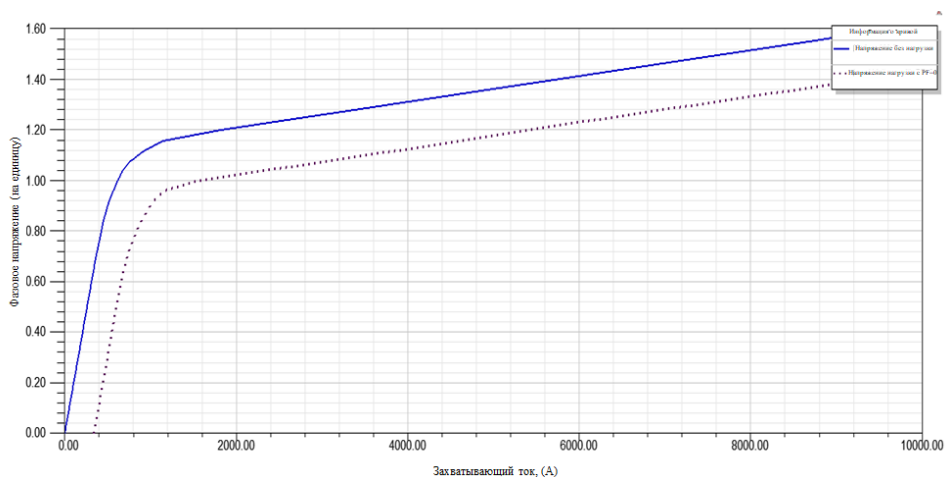


Рисунок 3 – Характеристика выходного напряжения синхронного генератора от тока возбуждения

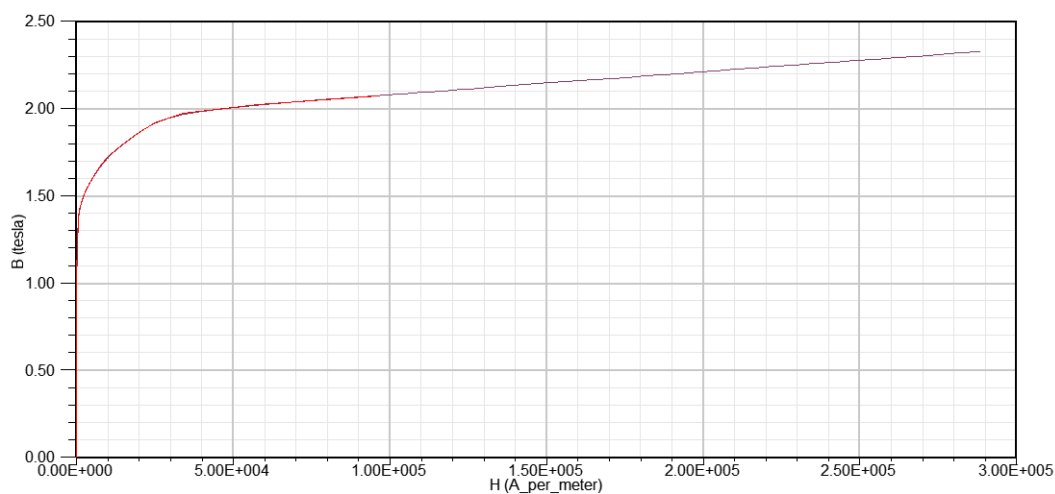


Рисунок 4 – Намагничивающая характеристика электротехнической стали

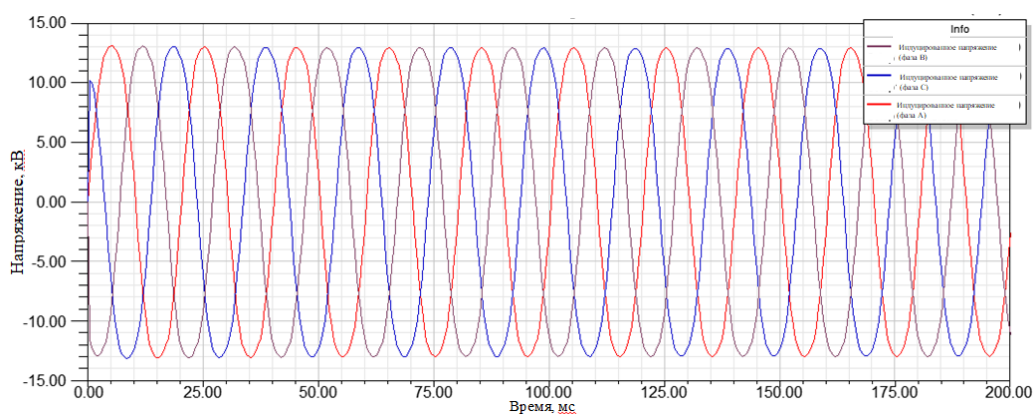


Рисунок 5 – Кривые напряжения на выходе синхронного генератора

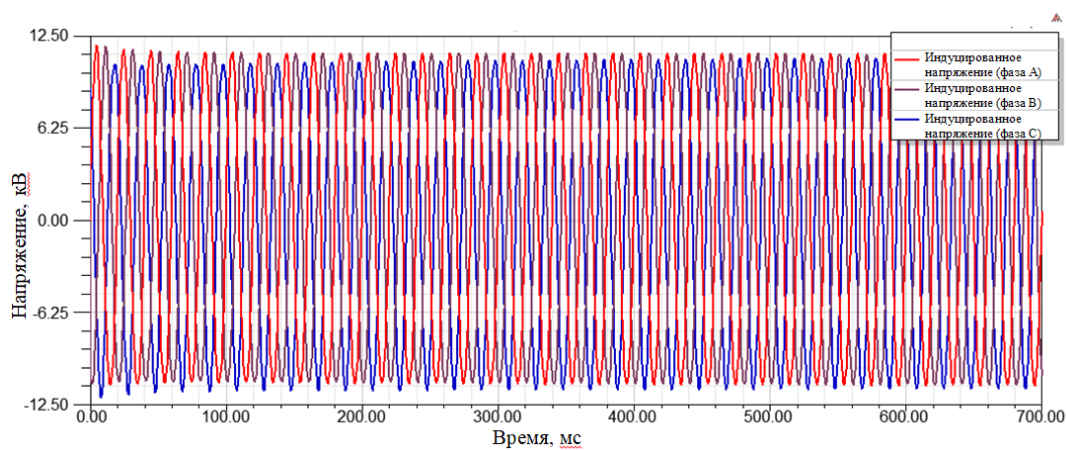


Рисунок 6 – Кривые напряжения на выходе генератора в режиме ВКЗ

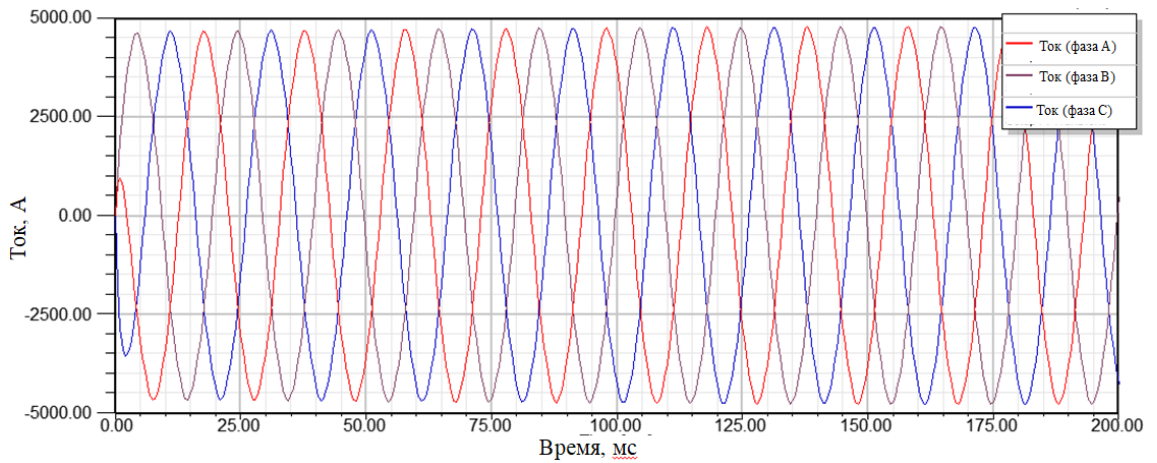


Рисунок 7 – Кривые тока на выходе синхронного генератора в режиме номинальной мощности

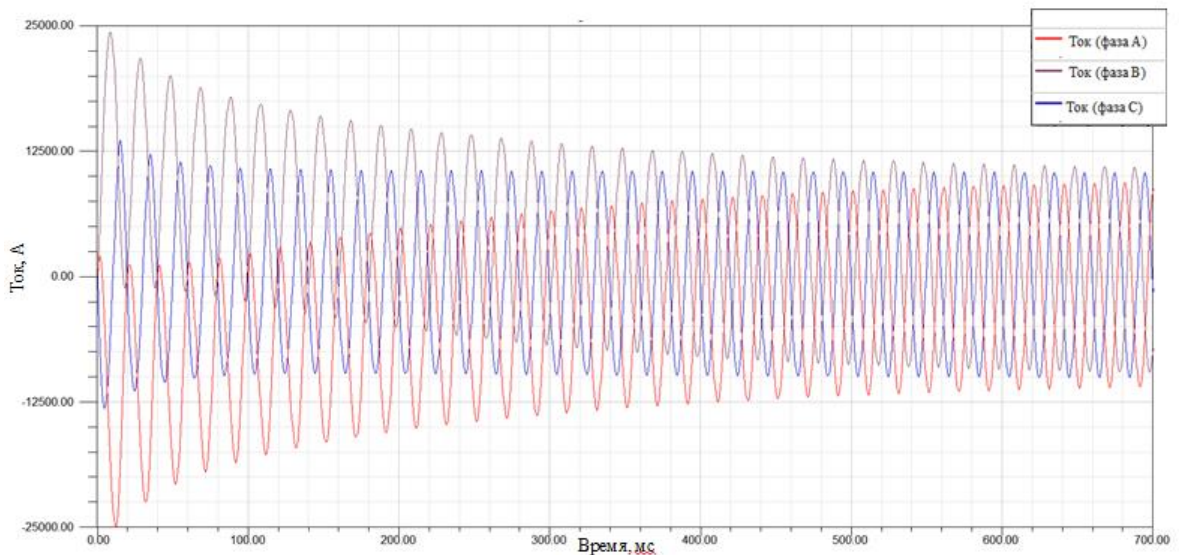


Рисунок 8 – Расчетная зависимость тока от времени в режиме внезапного короткого замыкания

В устройствах переменного тока, содержащих элементы с ферромагнитным сердечником, возникают потери энергии в сердечниках при периодическом изменении магнитного потока в них. Эти потери складываются из потерь на вихревые токи и на гистерезис.

Потери в электротехнической стали выражаются следующим уравнением:

$$p_v = p_h + p_c + p_e, \quad (3)$$

где p_h – потери на гистерезис,

p_c – потери на вихревые токи,

p_e – добавочные потери.

Потери на гистерезис пропорциональны площади петли гистерезиса.

Формула, выражающая связь:

$$p_h = k_n \cdot f \cdot B_m^2, \quad (4)$$

где B_m – максимальная индукция магнитного поля в сердечнике,

k_n – коэффициент, зависящий от материала,

f – частота сети.

Потери на вихревые токи:

$$p_c = k_c \cdot (f \cdot B_m)^2, \quad (5)$$

где k_c – коэффициент, зависящий от сорта стали.

Добавочные потери:

$$p_e = k_e \cdot (f \cdot B_m)^{1,5}, \quad (6)$$

где k_e – коэффициент добавочных потерь, зависящий от сорта стали.

Распределение индукции в воздушном зазоре в режиме номинальной мощности и режиме ВКЗ представлено на рисунках 9, 10.

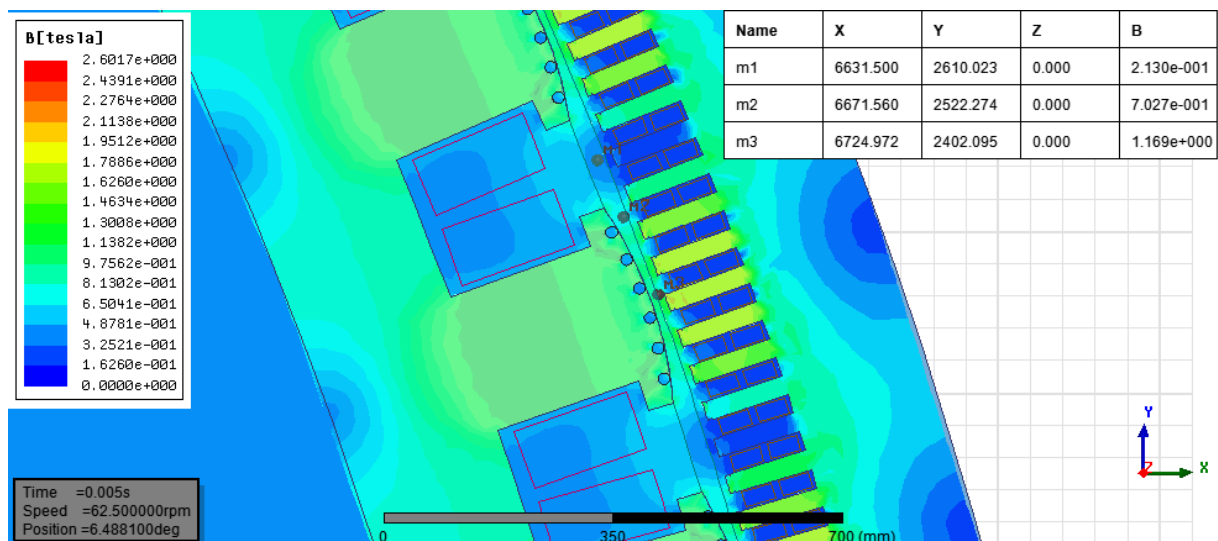


Рисунок 9 – Картина распределения индукции магнитного поля в режиме номинальной мощности

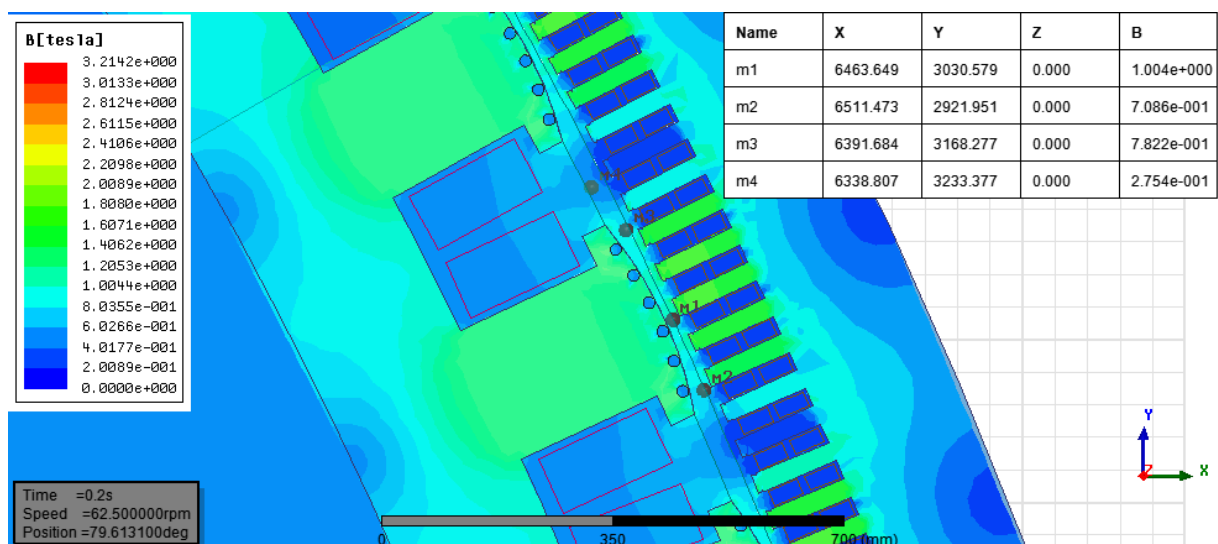


Рисунок 10 – Картина распределения индукции магнитного поля в режиме ВКЗ

На рисунках 11, 12 представлены кривые основных и добавочных потерь. Также, потери в обмотках статора, в обмотке возбуждения и в демпферной обмотке.

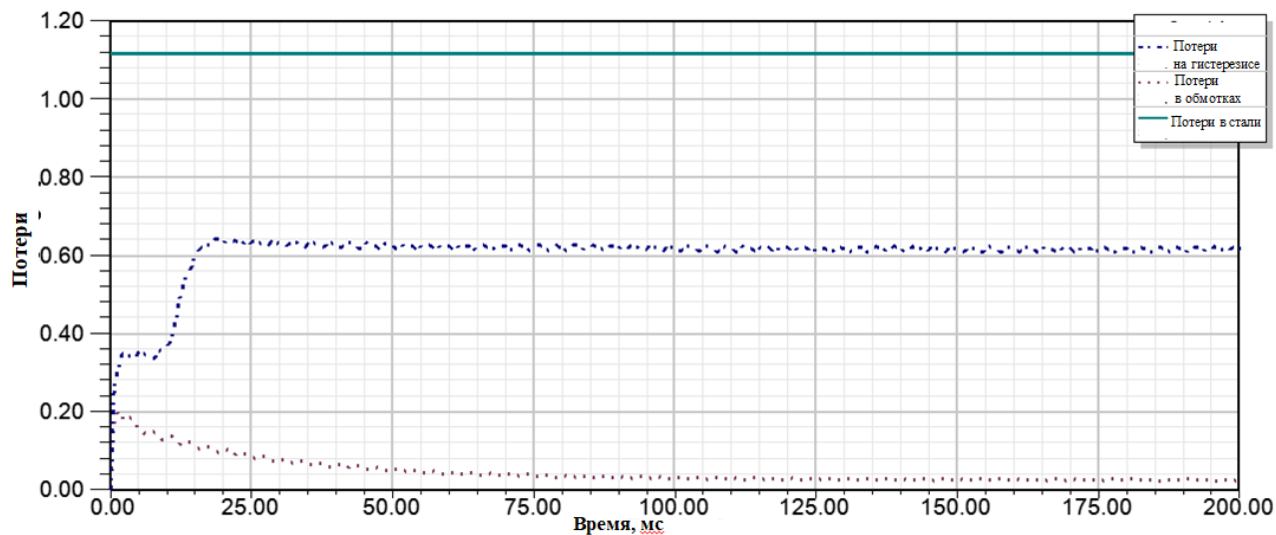


Рисунок 11 – Основные и добавочные потери в синхронном генераторе

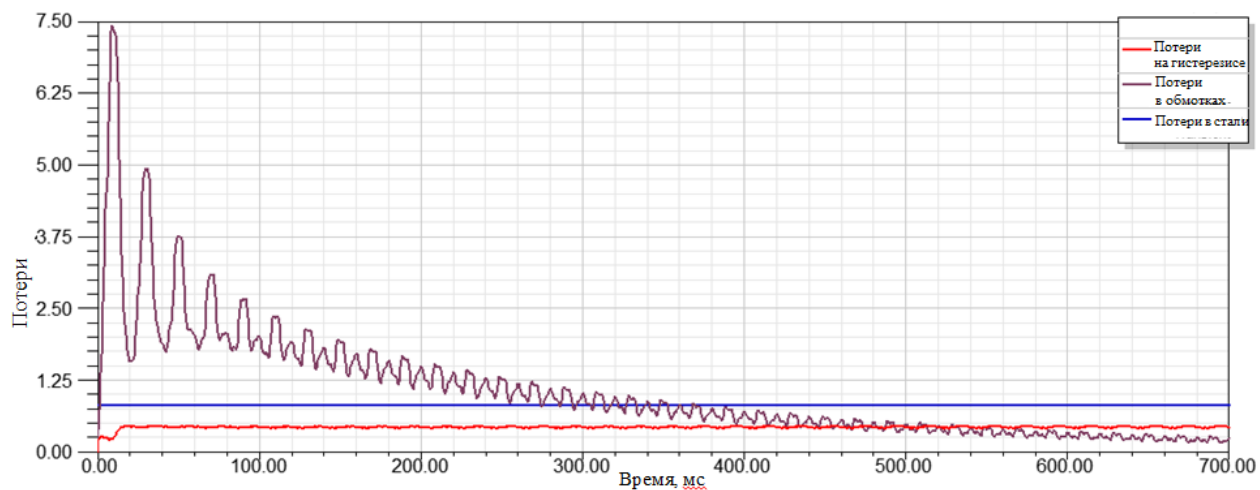


Рисунок 12 – Расчет основных и добавочных потерь в режиме ВКЗ

На рисунках 13, 14 отображена картина перераспределения потерь в сердечнике якоря (в стали) машины для двух режимов.

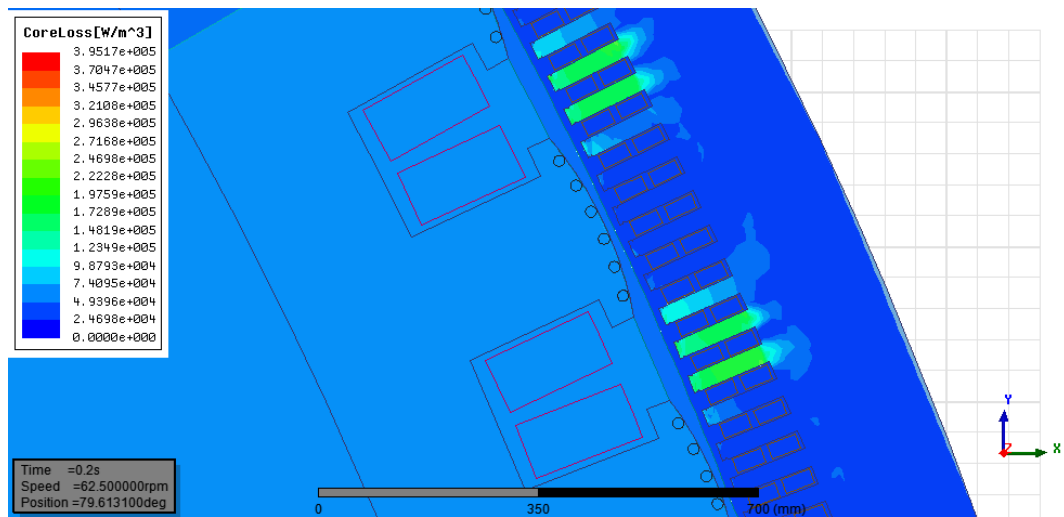


Рисунок 13 – Картина распределения потерь в сердечнике якоря

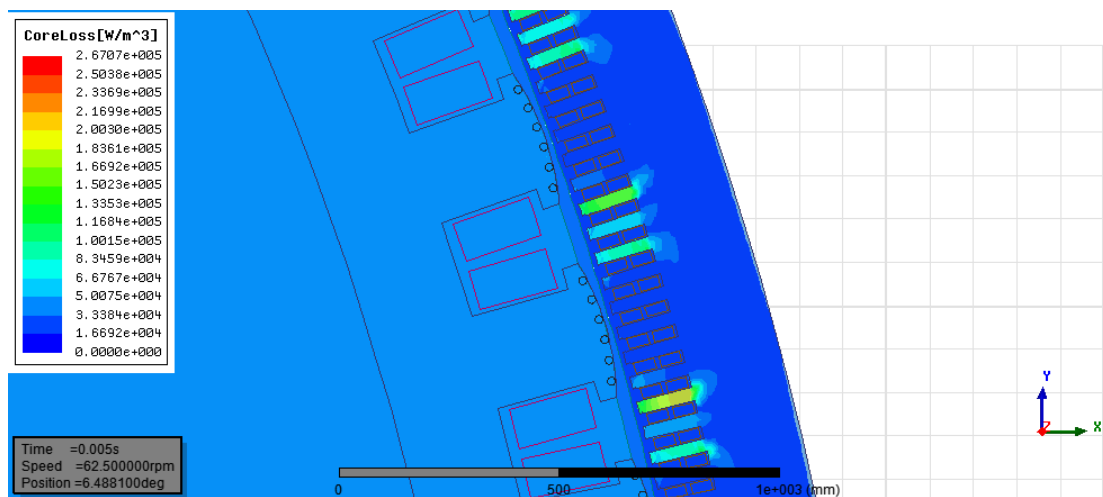


Рисунок 14 – Картина распределения потерь в сердечнике якоря

Активная мощность синхронной машины:

$$P_2 = \frac{m \cdot E_0 \cdot U_1}{X_c} \cdot \sin\delta, \quad (7)$$

где m – число фаз статора,

X_c – сопротивление сети,

δ – угол нагрузки,

E_0 – ЭДС сети.

Вращающий момент синхронного генератора:

$$M = \frac{m \cdot p \cdot E_0 \cdot U_1}{\omega_1 \cdot X_c} \cdot \sin\delta, \quad (8)$$

где ω_1 – круговая частота сети.

На рисунке 15 представлена зависимость вращающего момента от времени при номинальной мощности (50% номинальной мощности).

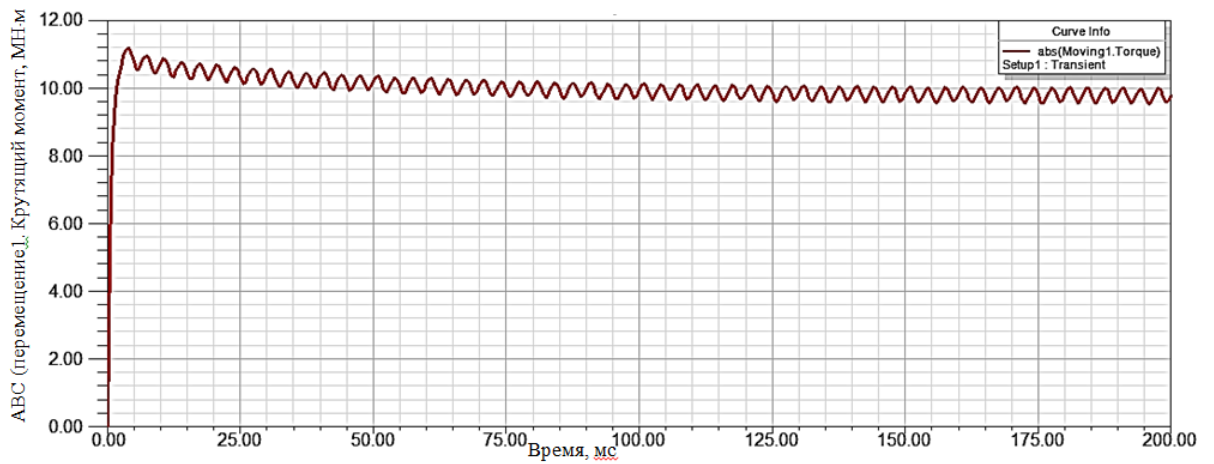


Рисунок 15 – Характеристика вращающего момента от времени

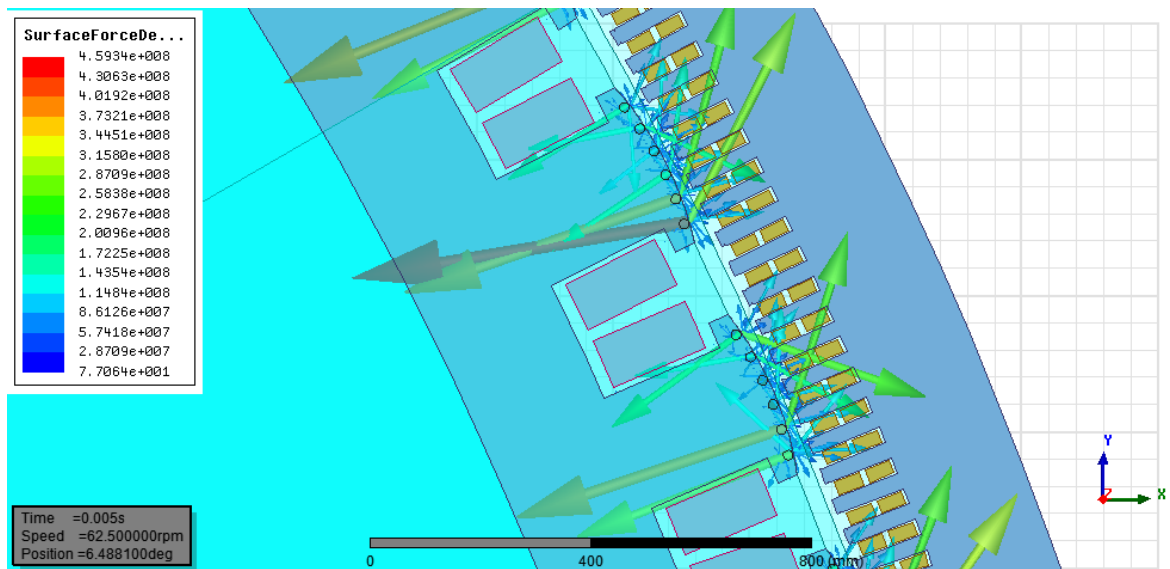


Рисунок 16 – Распределение механических нагрузок, возникающих при эксплуатации в режиме номинальной мощности

Выходная мощность:

$$P_2 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi, \quad (9)$$

Входная механическая мощность:

$$P_1 = P_2 + P_{fw} + P_{Cuа} + P_{Fe} + P_{Cuf}, \quad (10)$$

где P_{fw} , $P_{Cuа}$, P_{Fe} , P_{Cuf} – потери на трение, обмотках статора и в железе электротехнической стали, а также потери в обмотке возбуждения соответственно.

Вращающий момент:

$$T_1 = \frac{P_1}{\omega}, \quad (11)$$

где ω – угловая скорость генератора.

КПД генератора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%, \quad (12)$$

Также, был проведен анализ переходных процессов при внезапном коротком замыкании с целью верификации исходной геометрии машины с аналитическим расчетом.

В качестве модели верификации была применена стандартная модель синхронной машины в Matlab Simulink, представлена на рисунке 17.

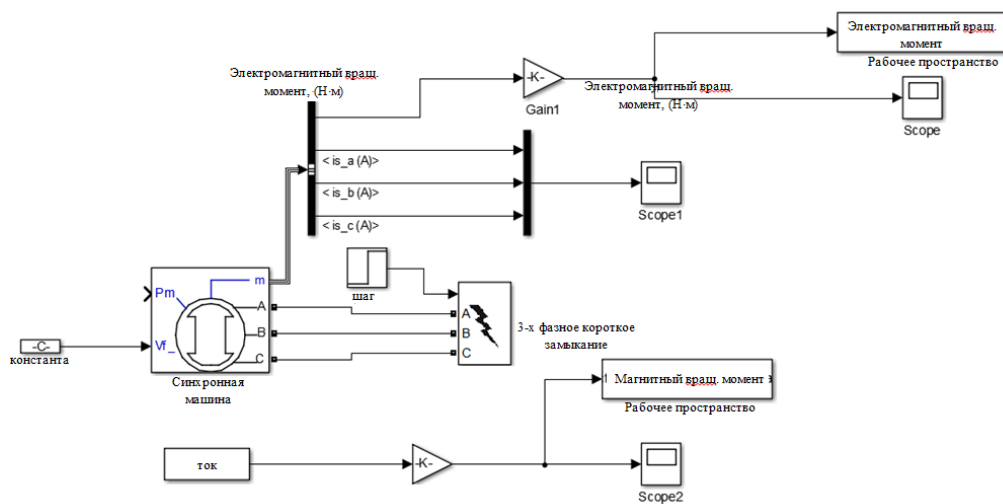


Рисунок 17 – Аналитическая модель синхронной машины в режиме внезапного короткого замыкания

На рисунке 18 представлена зависимость электромагнитного момента от времени в режиме внезапного короткого замыкания.

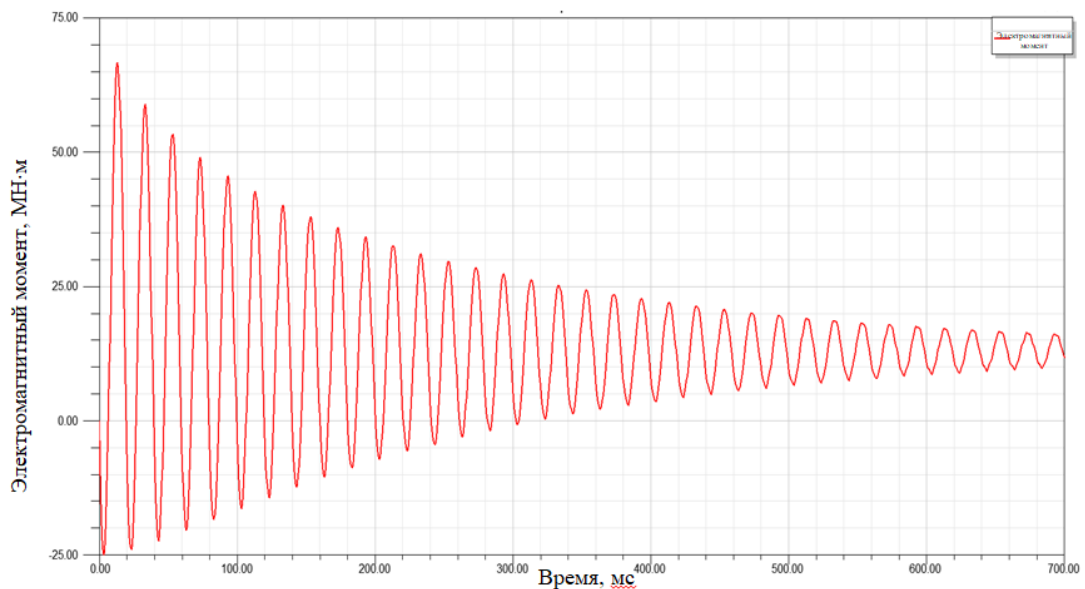


Рисунок 18 – Расчет переходного электромагнитного момента в режиме внезапного короткого замыкания при симметричной геометрии

По виду характеристики наблюдается апериодическая составляющая, имеющая максимум, которая имеет четырехкратное значение по сравнению с номинальным моментом.

2.2 Математическое моделирование режимов синхронного генератора

Моделирование синхронного генератора выполняется при тех же упрощающих допущениях, как и в случае синхронного генератора с постоянными магнитами.

Модель основана на классическом представлении генератора в виде синхронной машины, имеющей три статорных обмотки, одну обмотку возбуждения и две демпфирующие обмотки [3, с. 198], описываемой при помощи следующих переменных и параметров: i_d, i_q – токи по осям в координатах $d - q$; u_d, u_q – напряжения по осям в координатах $d - q$; i_{fd}, u_{fd} – ток и напряжение обмотки возбуждения соответственно; i_{kd}, i_{kq} – демпфирующие токи по осям $d - q$; R_s – активное сопротивление обмотки статора; R_{fd} – активное сопротивление обмотки возбуждения; R_{kd}, R_{kq} – активные сопротивления демпферной обмотки; L_d, L_q – индуктивности обмоток статора по осям $d - q$; L_{fd} – индуктивность обмотки ротора; L_{kd}, L_{kq} – индуктивности демпферных обмоток; L_{md}, L_{mq} – индуктивности намагничивания по осям $d - q$.

Электромагнитный момент описывается выражением:

$$M_G = (L_q - L_d) \cdot i_d \cdot i_q + L_{md} \cdot i_{fd} \cdot i_q + L_{md} \cdot i_{kd} \cdot i_q - L_{mq} \cdot i_{kq} \cdot i_d. \quad (13)$$

С учётом того, что векторы состояния и входных переменных соответственно, могут быть выражены так:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [x_1(t) x_2(t) x_3(t) x_4(t) x_5(t)]^T \equiv [i_q i_d i_{fd} i_{kd} i_{kq}]^T, \\ \mathbf{u} = [u_d u_q u_{fd} \ 0 \ 0]^T \end{cases}, \quad (14)$$

и матрицы

$$\left\{ \begin{array}{l} M = \begin{bmatrix} L_d & 0 & -L_{md} & -L_{md} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & -L_{mq} \\ L_{md} & 0 & -L_{fd} & -L_{md} & 0 \\ L_{md} & 0 & -L_{md} & -L_{kd} & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & 0 & -L_{kq} \end{bmatrix} \\ N(\Omega_h) = \begin{bmatrix} -R_S & \Omega_h L_q & 0 & 0 & -\Omega_h L_{mq} \\ -\Omega_h L_d & -R_S & \Omega_h L_{md} & \Omega_h L_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (15)$$

и тогда модель синхронного генератора может быть представлена в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = M^{-1}N(\Omega_h) \cdot x - u \\ y \equiv M_G = (L_q - L_d) \cdot x_1 \cdot x_2 + L_{md} \cdot x_1 \cdot x_3 + L_{md} \cdot x_1 \cdot x_4 - \\ - L_{mq} \cdot x_2 \cdot x_5. \end{array} \right. \quad (16)$$

Уравнение движения аналогично уравнению 14:

$$\frac{d\Omega_h}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{mec} - M_G - F \cdot \Omega_h), \quad (17)$$

где Ω_h , M_{mec} и J – означают те же самые величины, что и ранее;

F – постоянная сила трения.

3 Расчеты для различных вариантов изменения формы геометрии ротора

3.1 Расчеты по измененной геометрии ротора на 10% в сторону статора

А) режим номинальной мощности, основные характеристики приведены на рисунках 19-23.

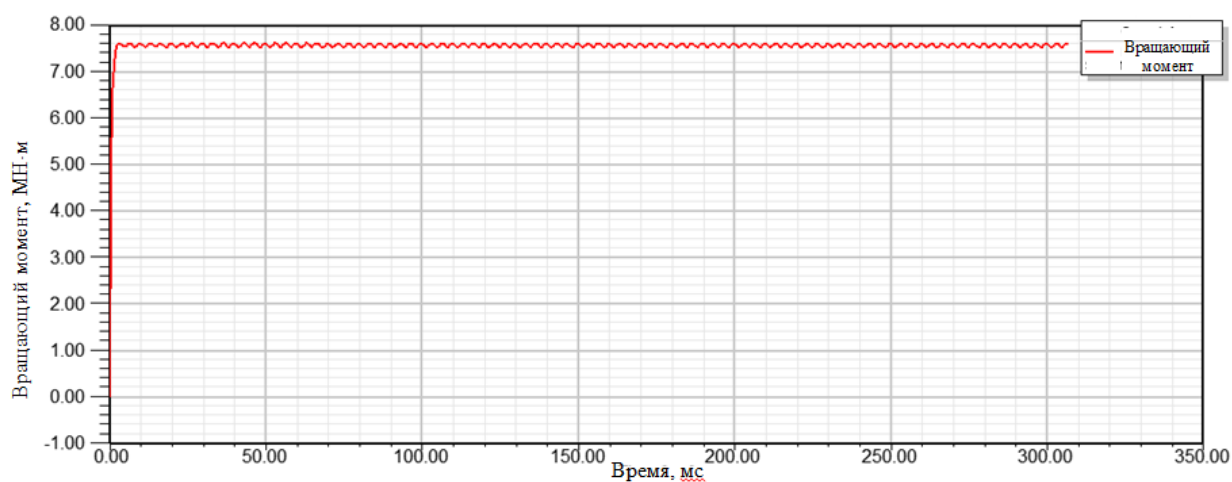


Рисунок 19 – Характеристика вращающегося момента от времени

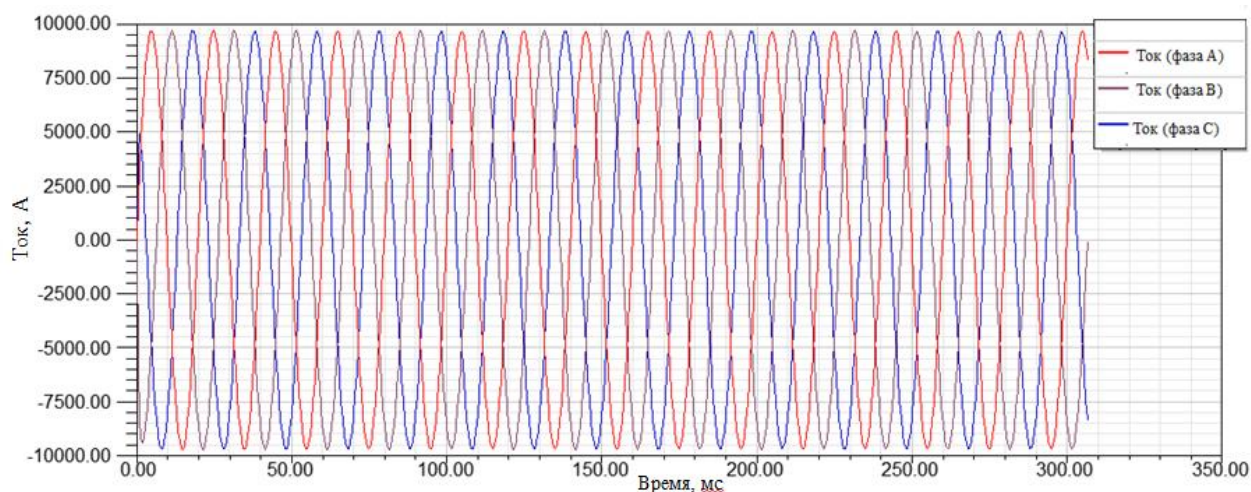


Рисунок 20 – Кривые тока на выходе синхронного генератора

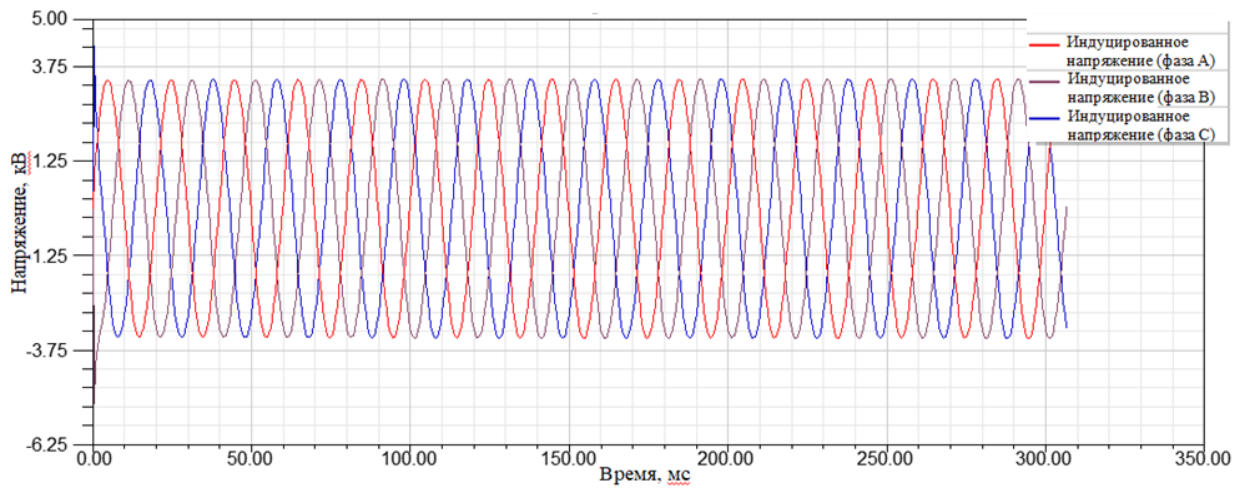


Рисунок 21 – Кривые напряжения на выходе синхронного генератора

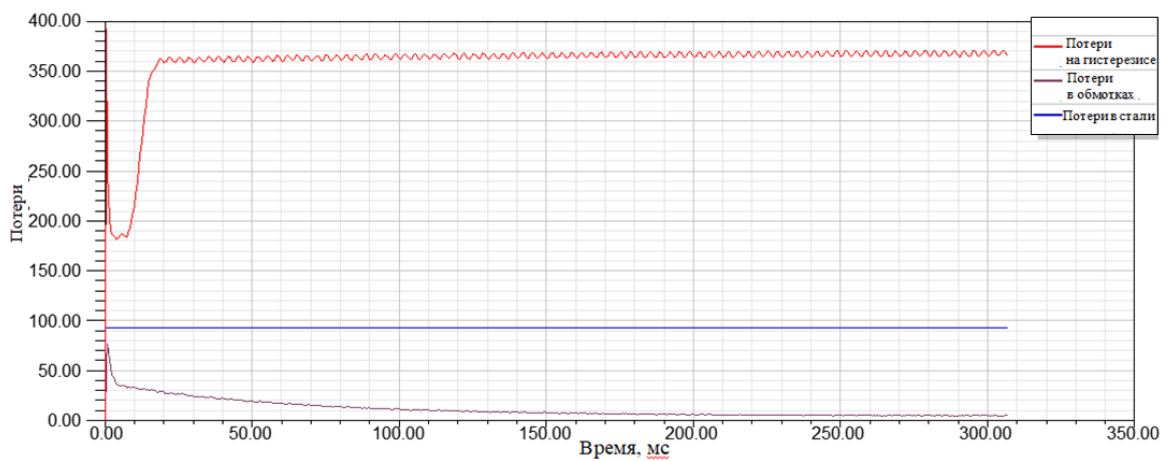


Рисунок 22 – Основные и добавочные потери в синхронном генераторе

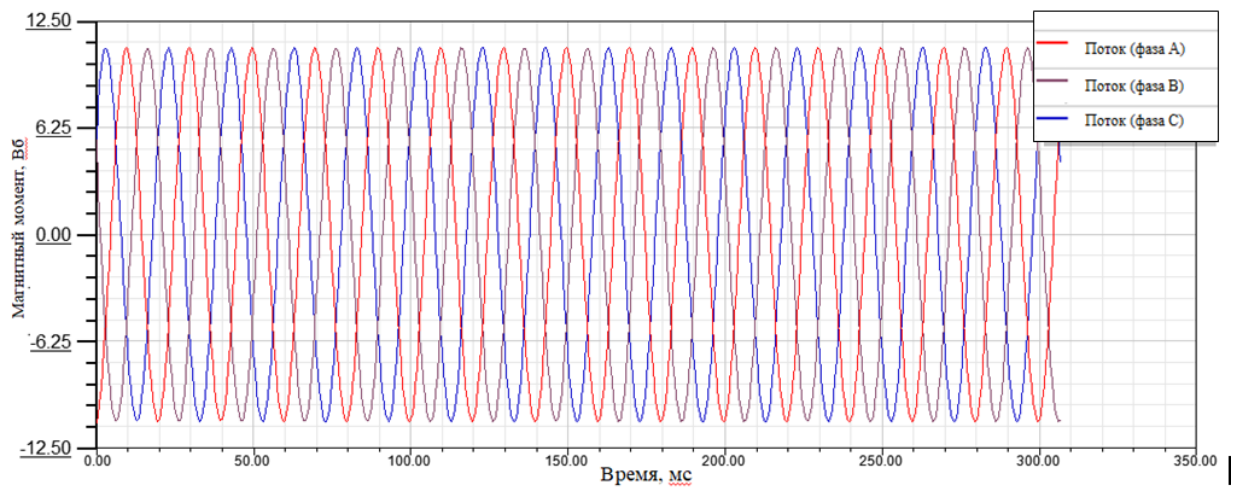


Рисунок 23 – Осциллограмма магнитного потока

Б) режим ВКЗ, основные характеристики приведены на рисунках 24-28.

Переходной процесс имеет апериодическую составляющую в графиках вращающего момента. Время переходного процесса составляет 300 мс, что соответствует стандартному генератору [1].

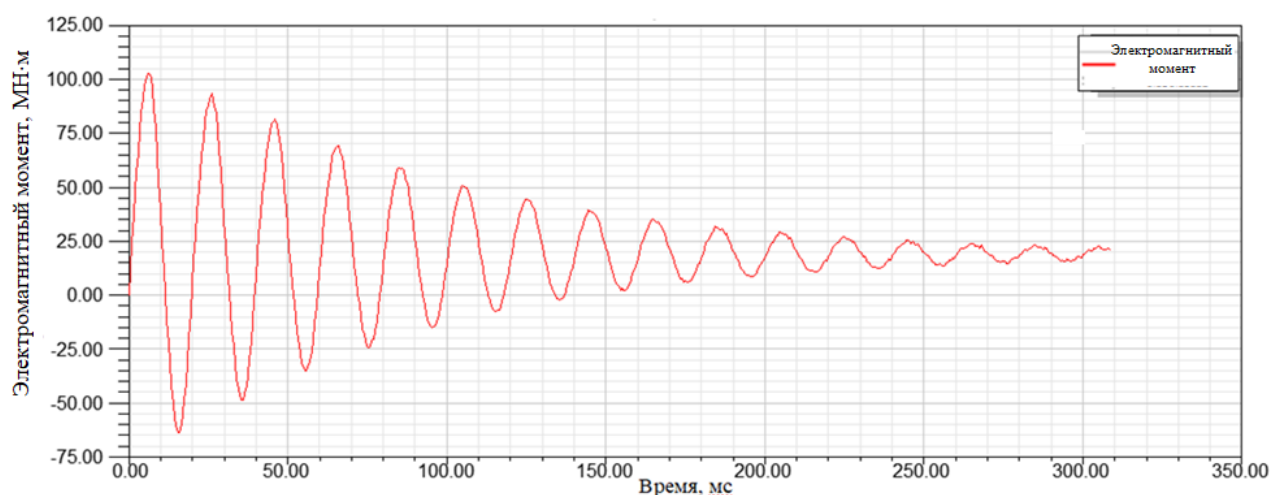


Рисунок 24 – Расчет переходного электромагнитного момента в режиме внезапного короткого замыкания при деформации геометрии

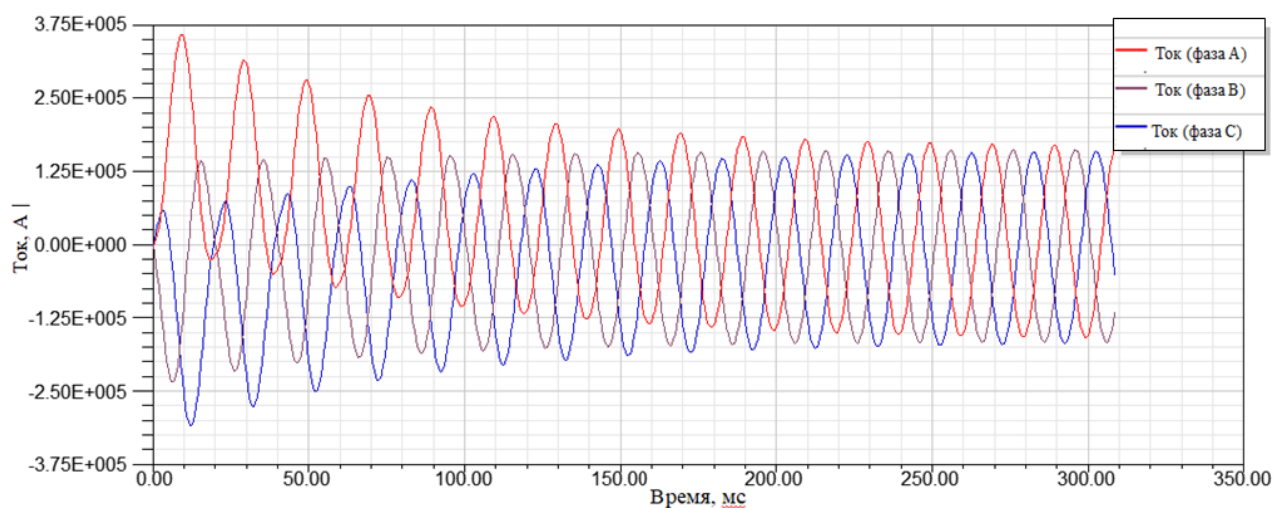


Рисунок 25 – Расчетная зависимость тока от времени в режиме внезапного короткого замыкания

Следует обратить внимание, что на графике напряжения возникают искажения при несимметричных коротких замыканиях. Вследствие

несимметричной деформации наблюдаются проявления высших гармоник, а также искажение синусоиды напряжения. В соответствии с рисунком 27 наблюдаются повышение значение перегрева обмоток генератора, что свидетельствует повышенному значению x_d .

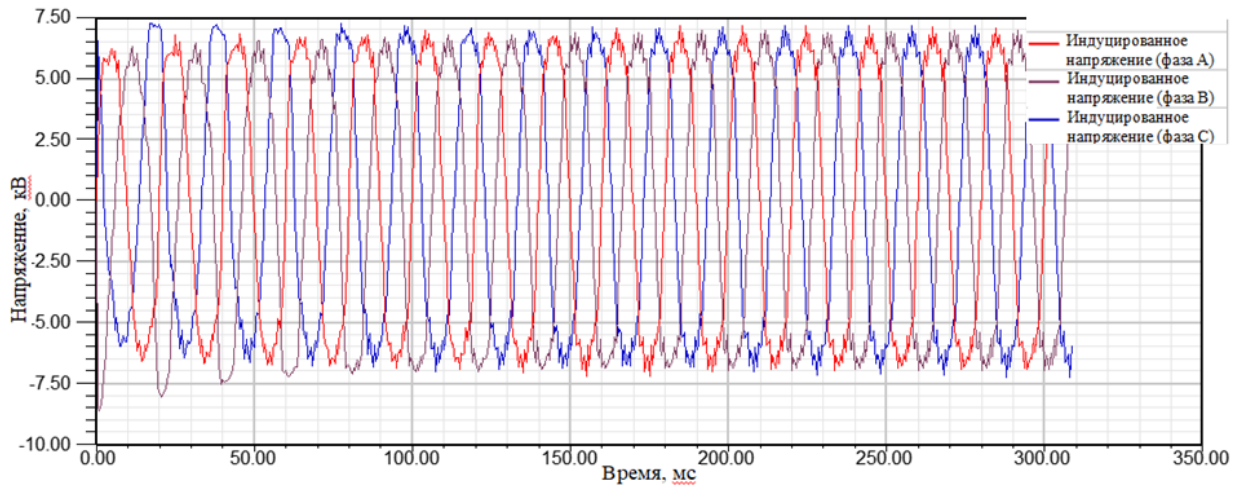


Рисунок 26 – Осциллограмма напряжения на выходе генератора в режиме ВКЗ

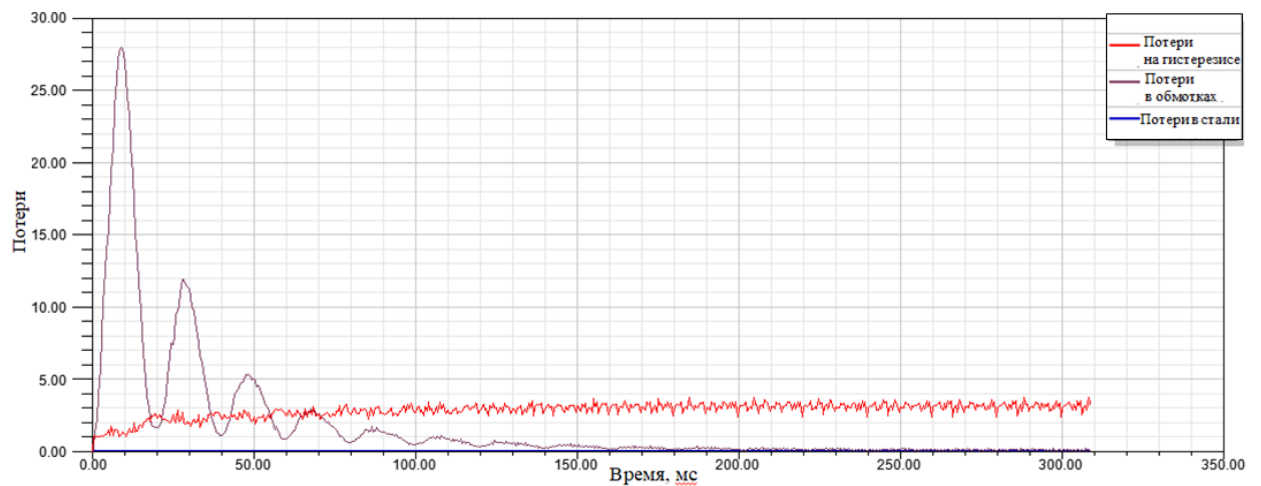


Рисунок 27 – Расчет основных и добавочных потерь в режиме ВКЗ

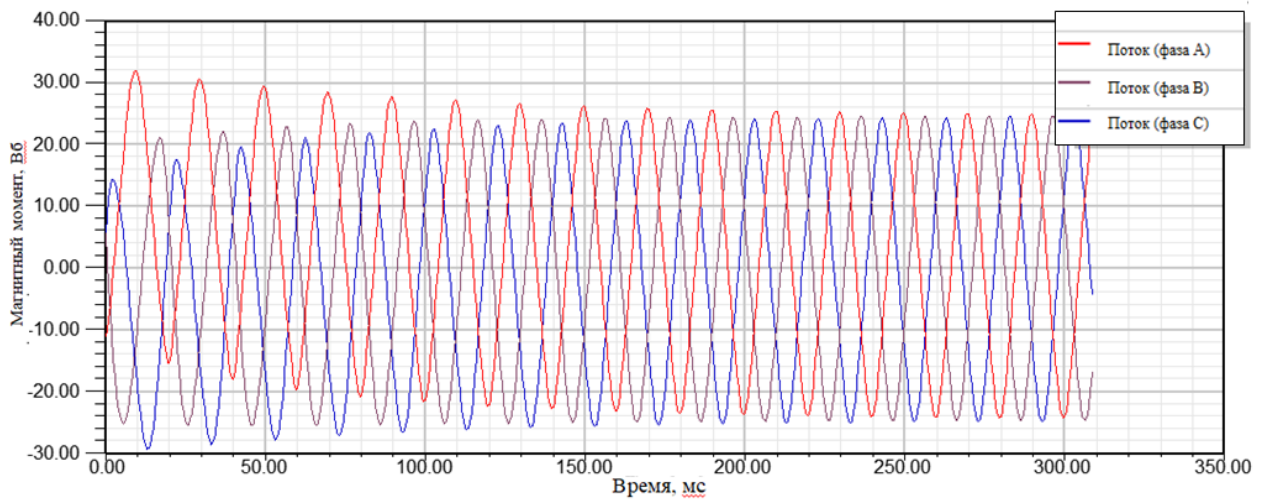


Рисунок 28 – Осциллограмма магнитного потока при ВКЗ

3.2 Расчеты по измененной геометрии ротора на 20% в сторону статора

А) режим номинальной мощности, основные характеристики приведены на рисунках 29-33.

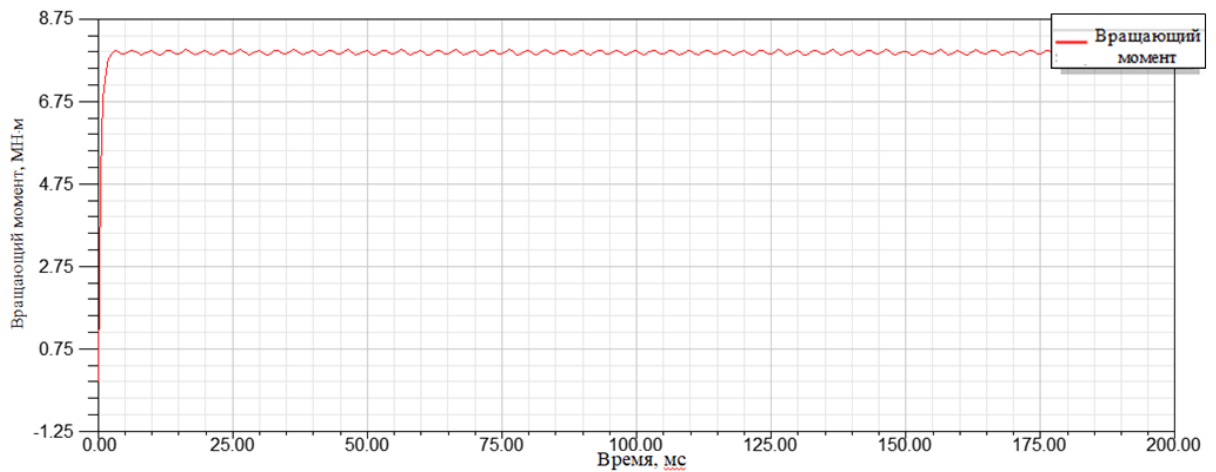


Рисунок 29 – Расчет электромагнитного момента в режиме номинальной мощности

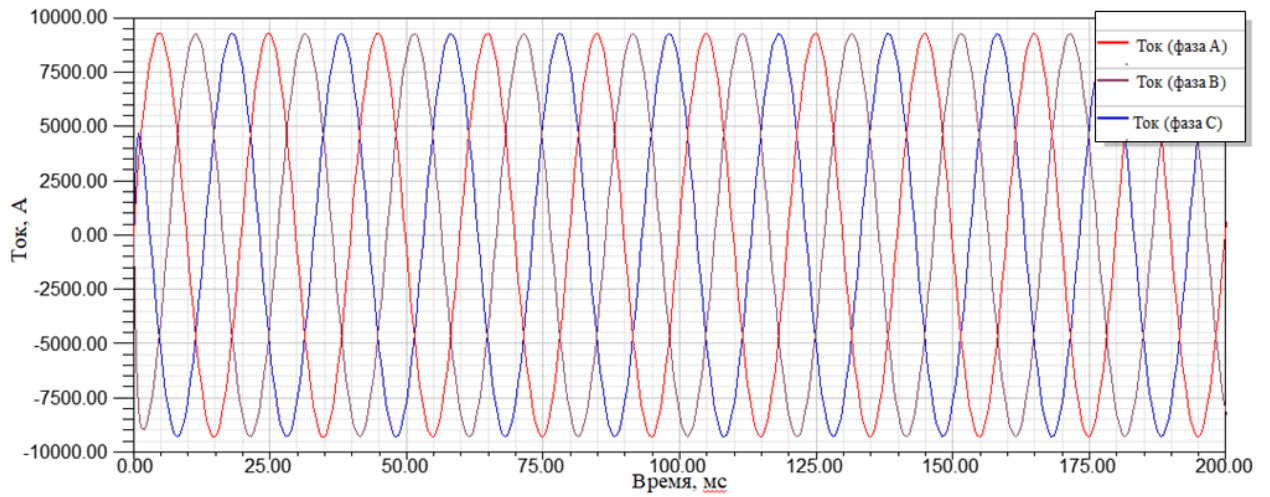


Рисунок 30 – Осциллограммы тока в фазах в режиме номинальной мощности

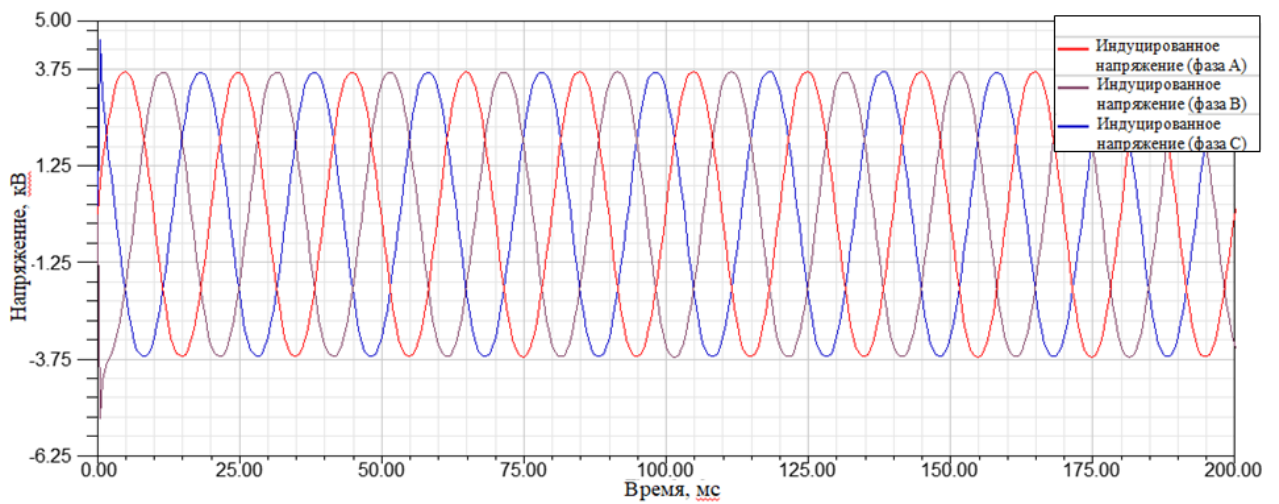


Рисунок 31 – Осциллограммы напряжения в режиме номинальной мощности

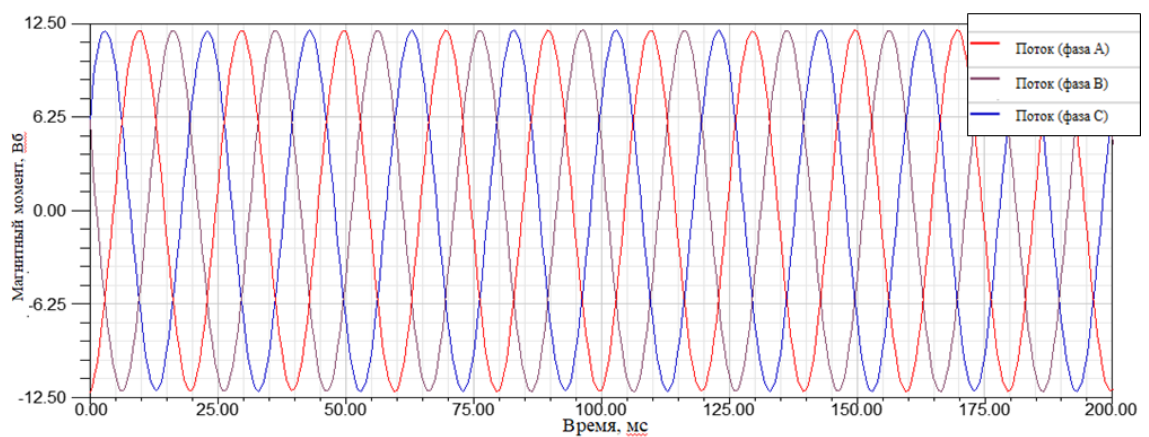


Рисунок 32 – Осциллограммы магнитного потока в режиме номинальной мощности

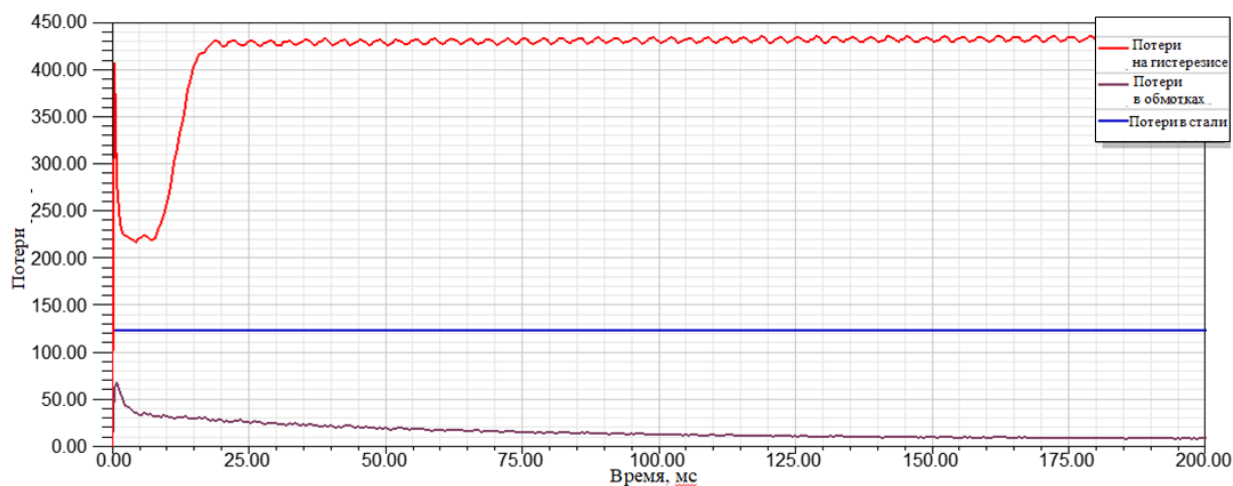


Рисунок 33 – Расчет потерь в режиме номинальной мощности

При уменьшении ширины воздушного зазора наблюдается значительный перегрев статора, что свидетельствует о ограниченном времени работы.

Б) режим внезапного короткого замыкания, основные характеристики приведены на рисунках 34-37.

Как видно из результатов переходных процессов постоянная времени снижена до 200 мс.

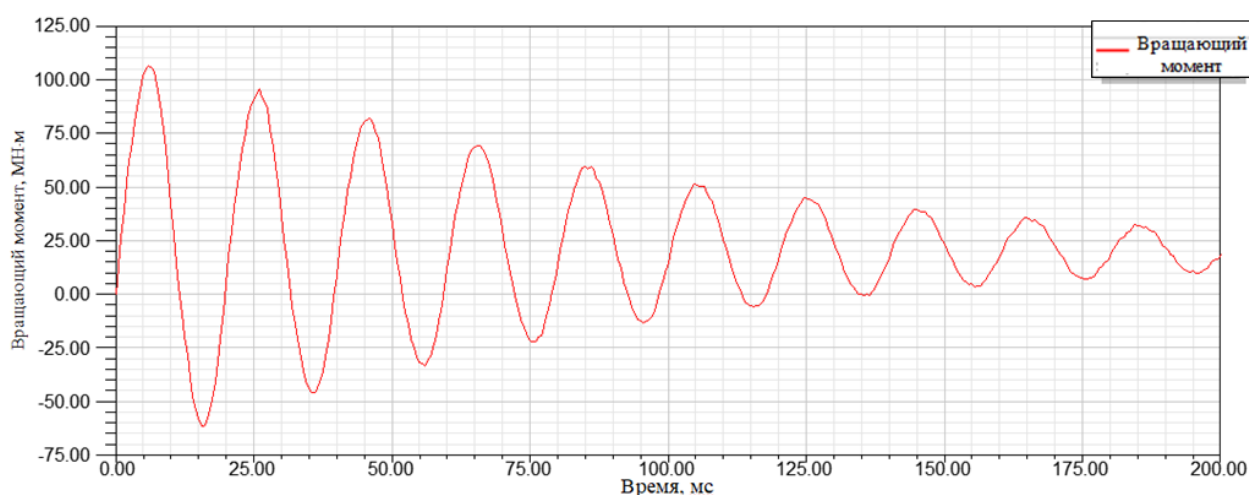


Рисунок 34 – Расчет переходного момента в режиме ВКЗ

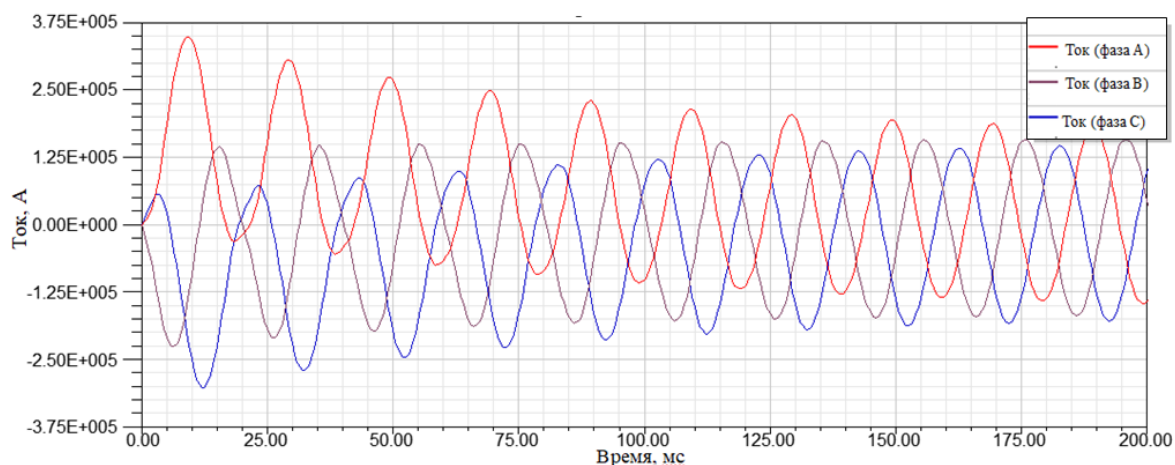


Рисунок 35 – Расчетная зависимость тока от времени в режиме внезапного короткого замыкания

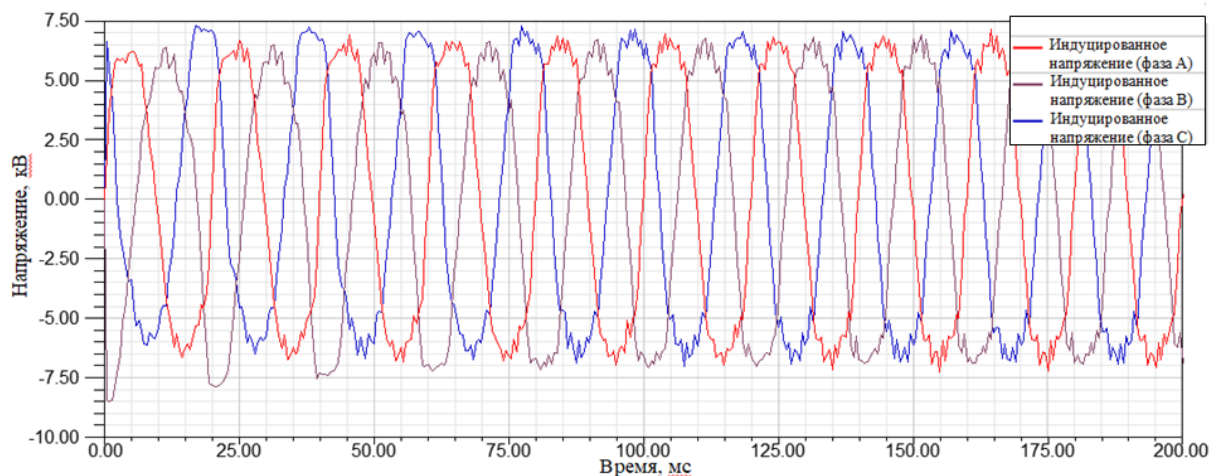


Рисунок 36 – Кривые напряжения в режиме ВКЗ

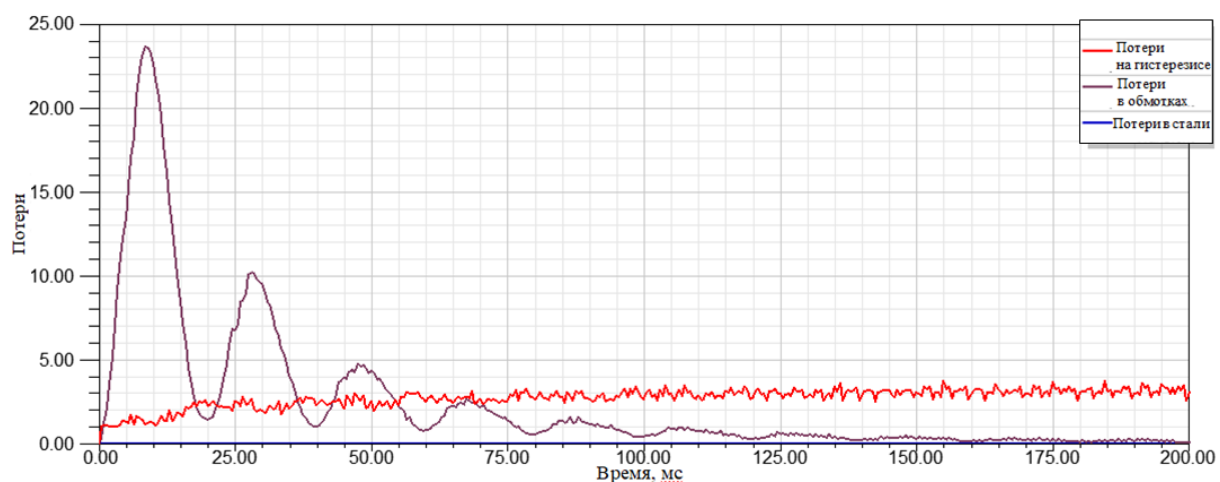


Рисунок 37 – Кривые распределения потерь в режиме ВКЗ

3.3 Расчеты по измененной геометрии ротора на 35% в сторону статора

А) режим номинальной мощности, основные характеристики приведены на рисунках 38-42.

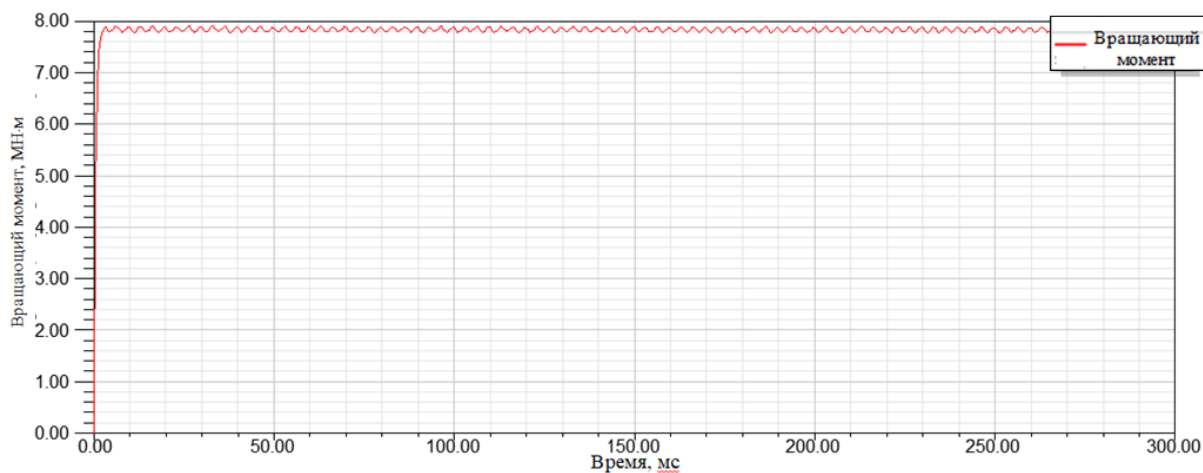


Рисунок 38 – Характеристика вращающего момента от времени

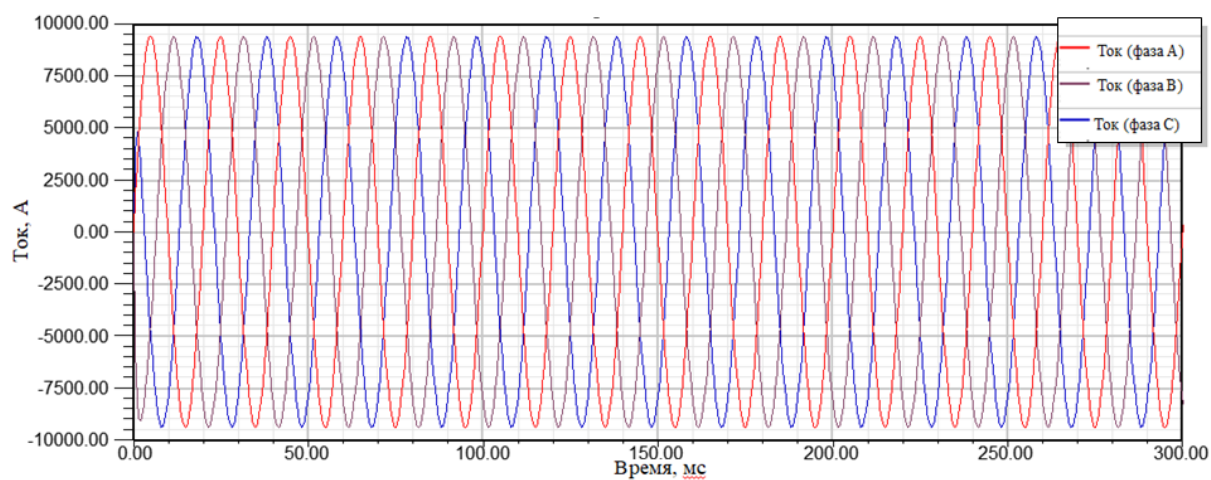


Рисунок 39 – Кривые тока на выходе синхронного генератора

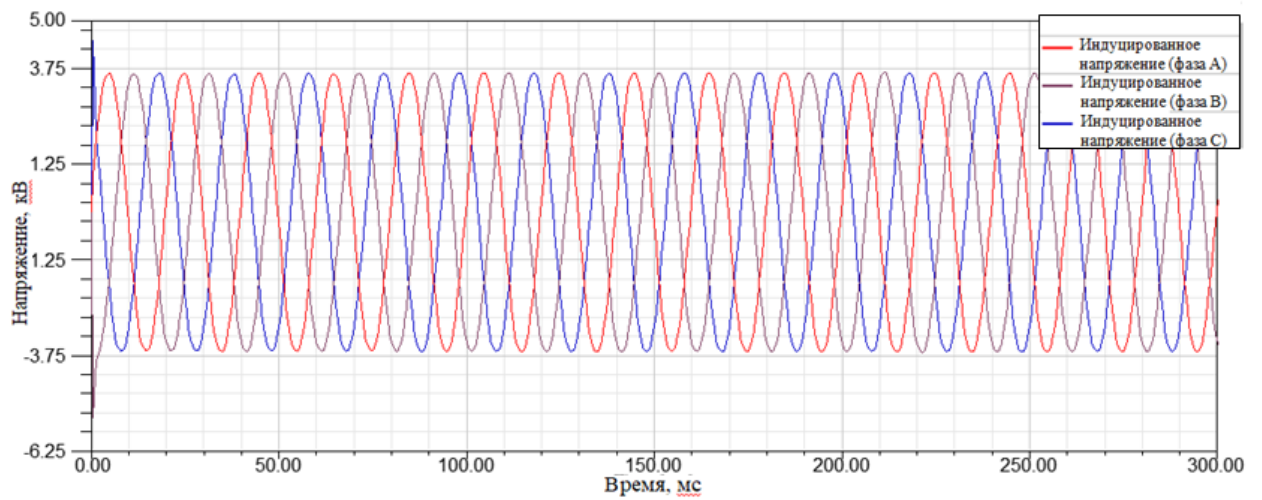


Рисунок 40 – Кривые напряжения на выходе синхронного генератора

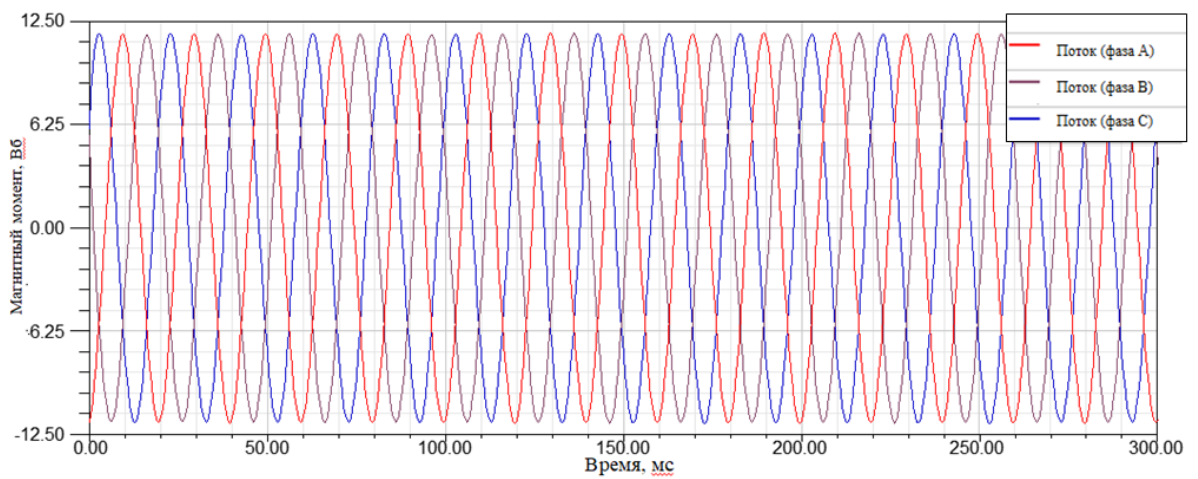


Рисунок 41 – Осциллограмма магнитного потока

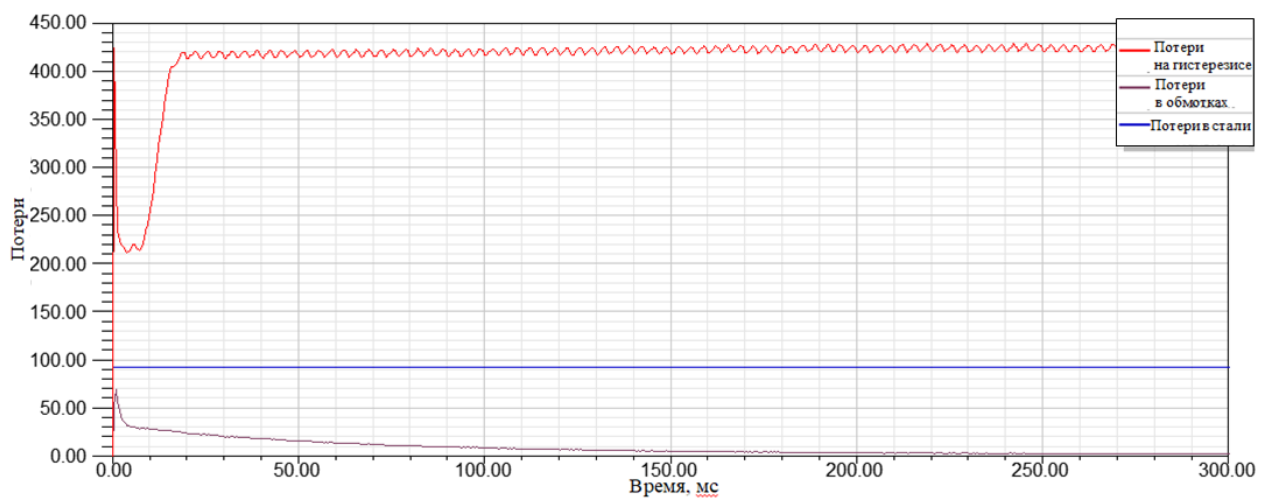


Рисунок 42 – Основные и добавочные потери в синхронном генераторе

Б) режим ВКЗ, основные характеристики приведены на рисунках 43-46.

Постоянная времени около 250 мс. Это говорит о том, что возникают режимы, которые связаны с недопустимым снижением величины сопротивления. Происходит значительный перегрев.

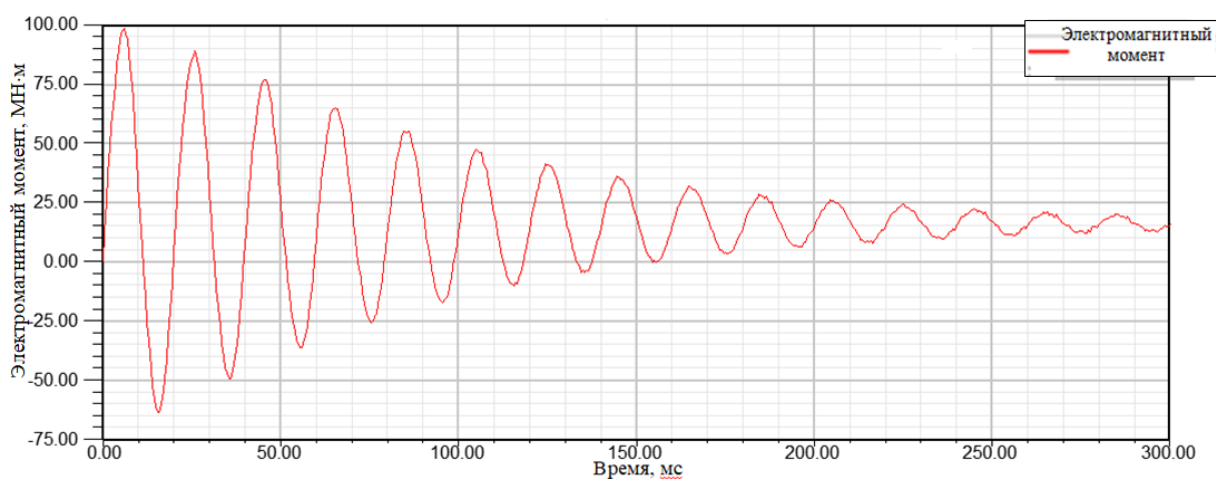


Рисунок 43 – Расчет переходного электромагнитного момента в режиме внезапного короткого замыкания при деформации геометрии

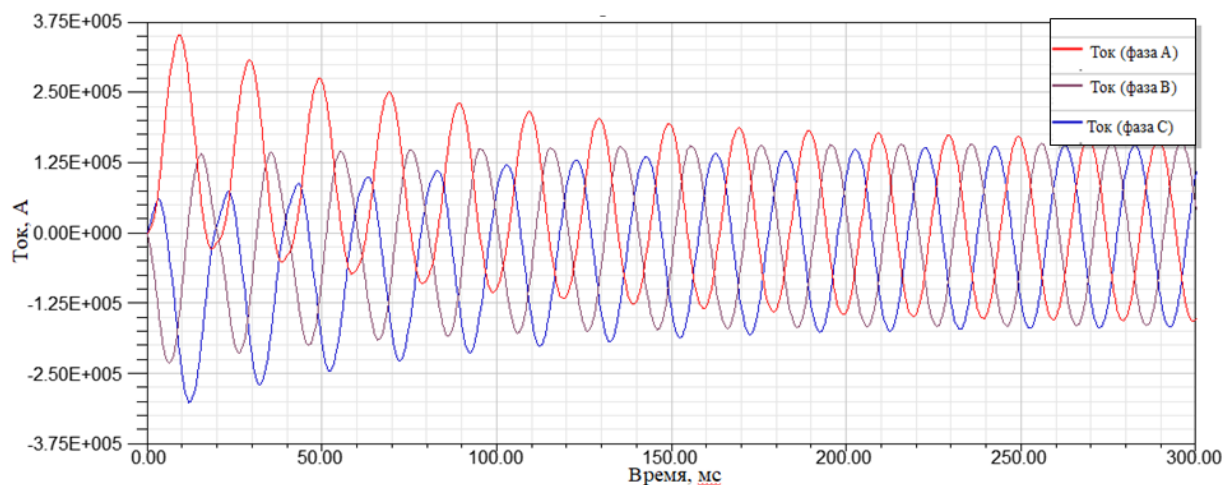


Рисунок 44 – Расчетная зависимость тока от времени в режиме внезапного короткого замыкания

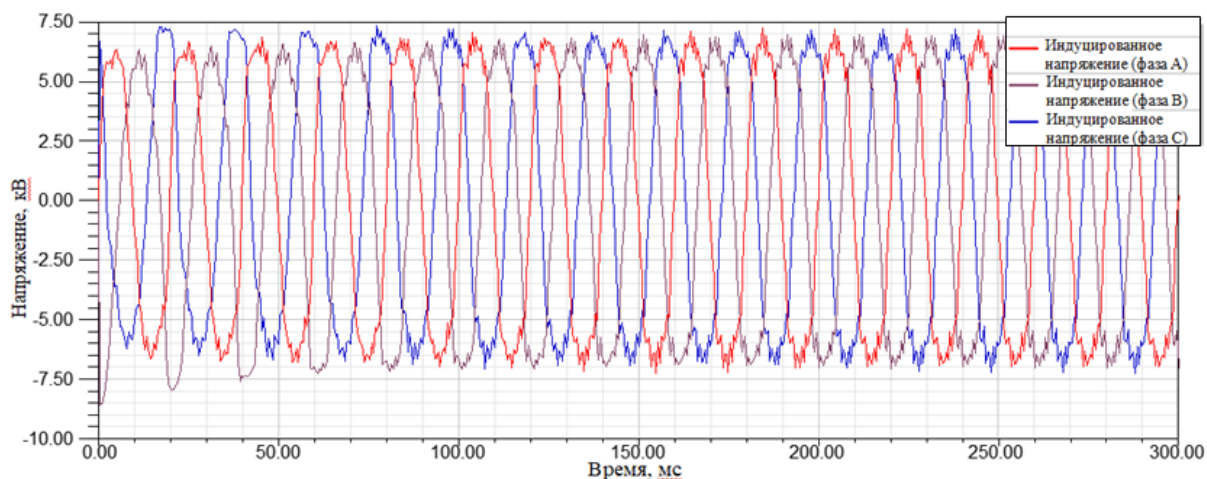


Рисунок 45 – Осциллограмма напряжения на выходе генератора в режиме ВКЗ

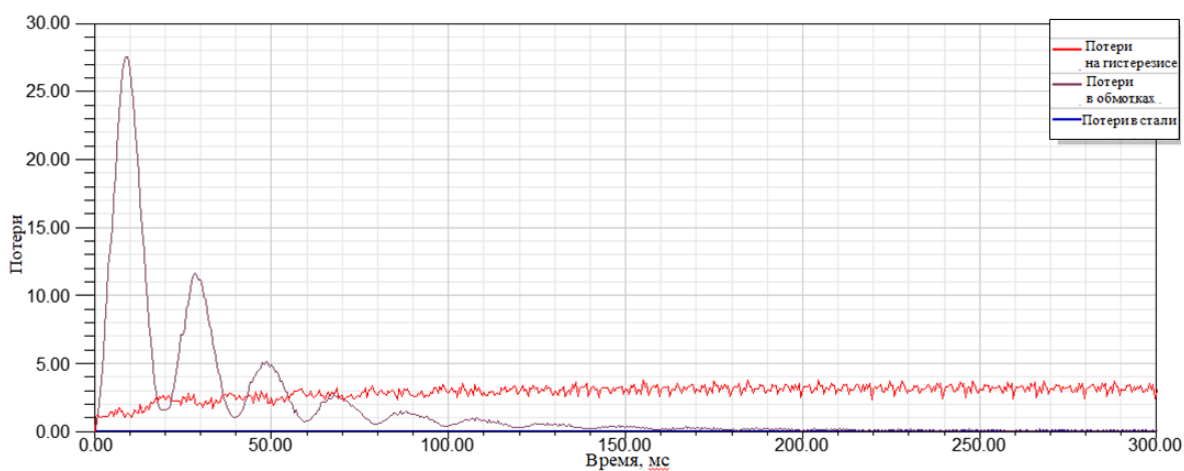


Рисунок 46 – Расчет основных и добавочных потерь в режиме ВКЗ

3.4 Расчеты по измененной геометрии ротора на 20% в сторону от статора (зазор увеличивается)

А) номинальный режим, основные характеристики приведены на рисунках 47-51.

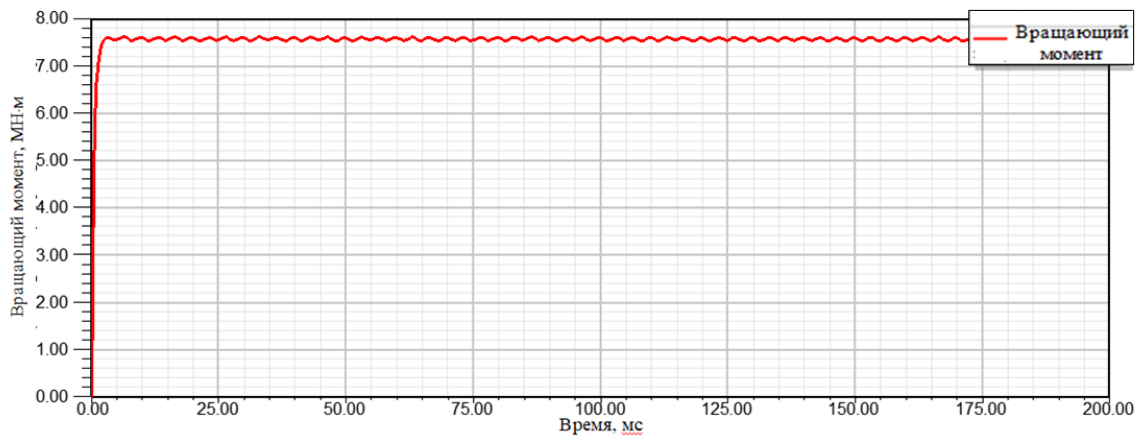


Рисунок 47 – Характеристика вращающего момента от времени

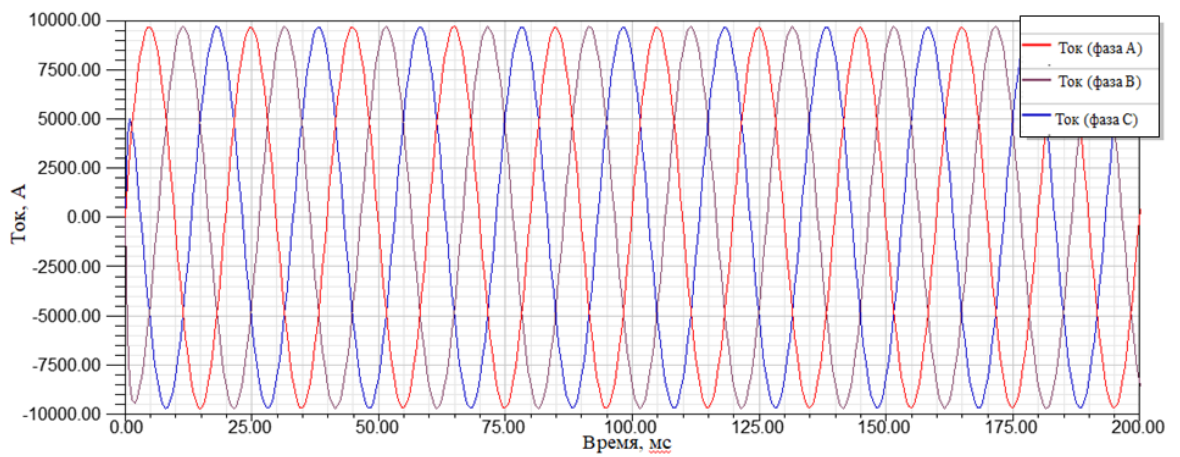


Рисунок 48 – Кривые тока на выходе синхронного генератора

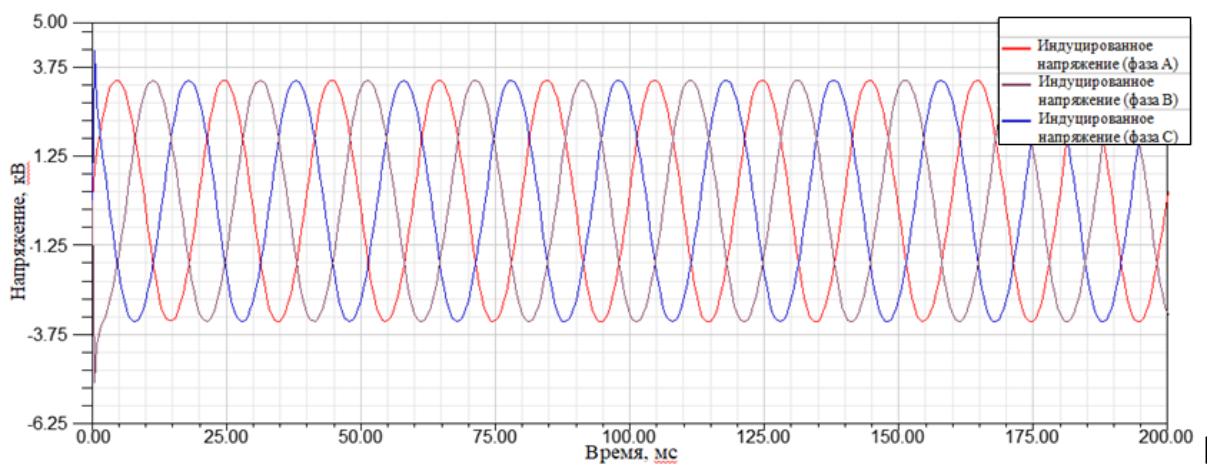


Рисунок 49 – Кривые напряжения на выходе синхронного генератора

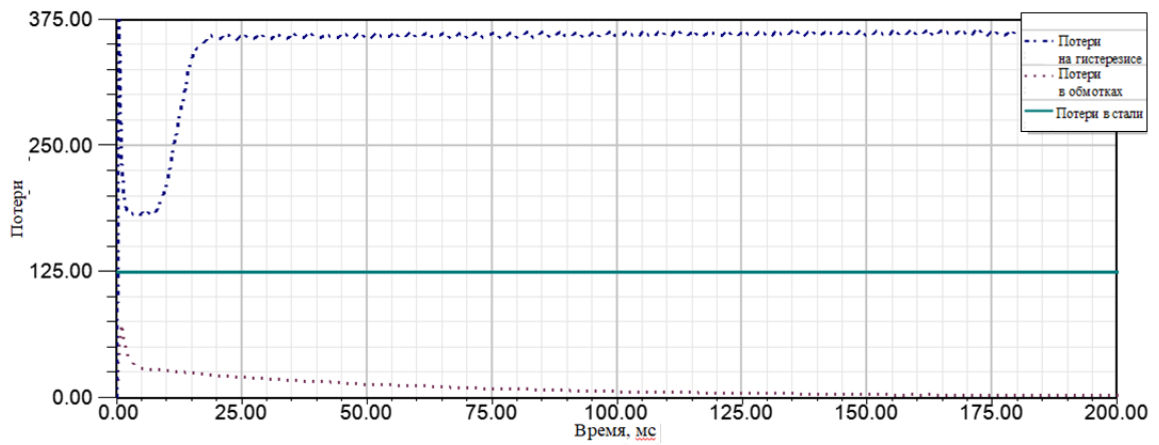


Рисунок 50 – Основные и добавочные потери в синхронном генераторе

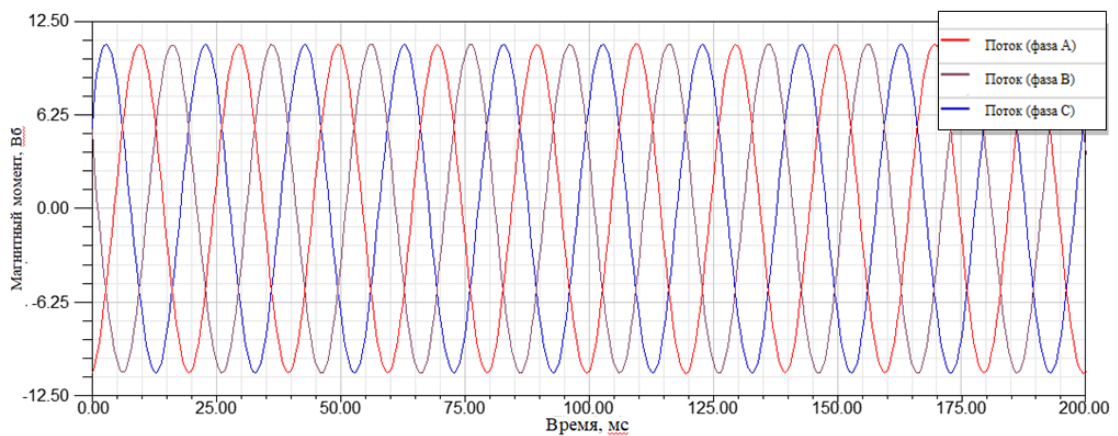


Рисунок 51 – Осциллограмма магнитного потока

Момент падает на 25%, ток уменьшается, сопротивление растет.

Б) режим ВКЗ, основные характеристики приведены на рисунках 52-56.

Постоянная времени 200 мс.

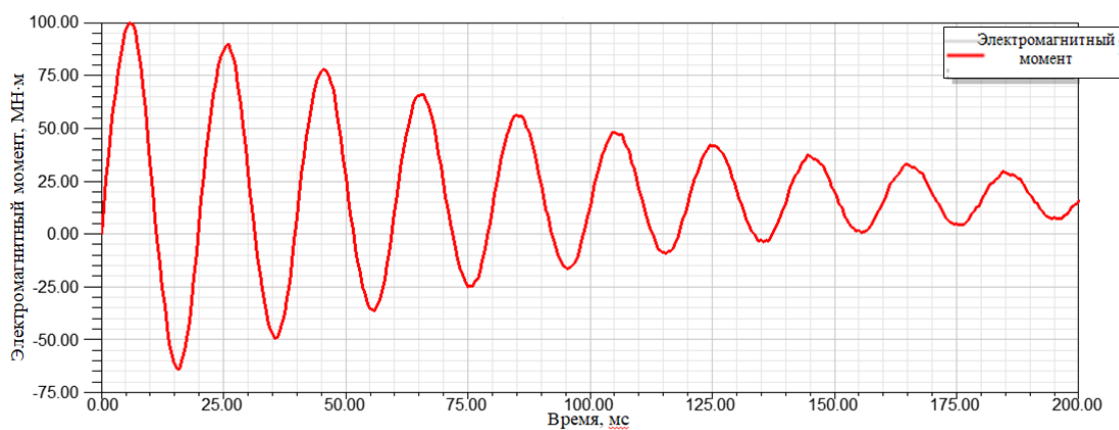


Рисунок 52 – Расчет переходного электромагнитного момента в режиме внезапного короткого замыкания при деформации геометрии

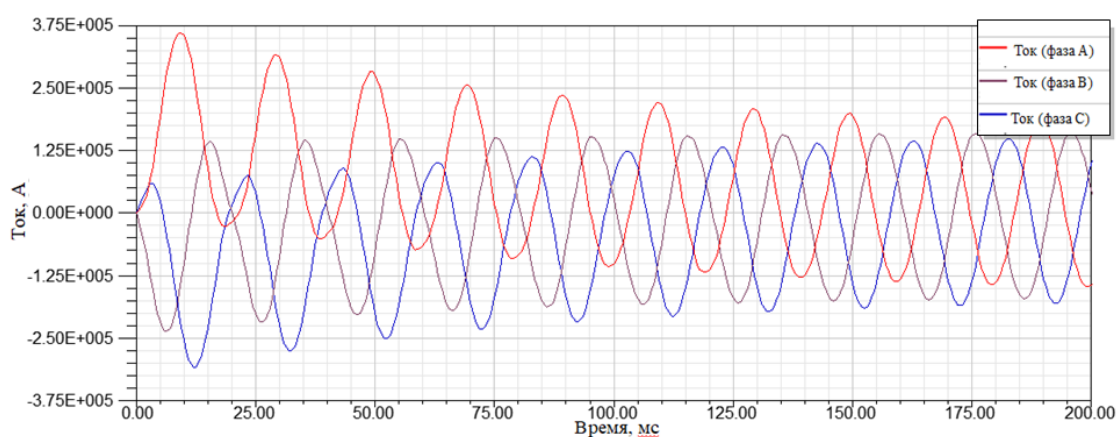


Рисунок 53 – Расчетная зависимость тока от времени в режиме внезапного короткого замыкания

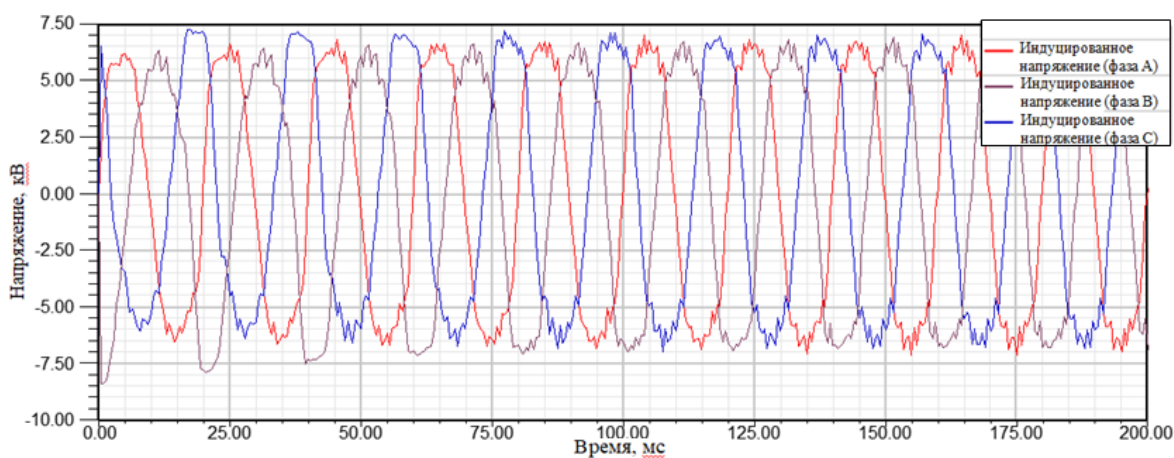


Рисунок 54 – Осциллограмма напряжения на выходе генератора в режиме ВКЗ

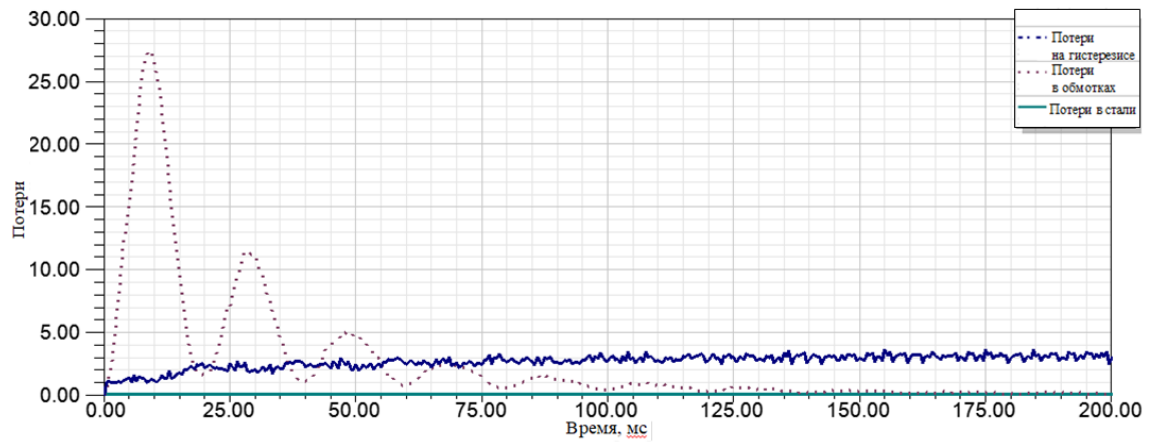


Рисунок 55 – Расчет основных и добавочных потерь в режиме ВКЗ

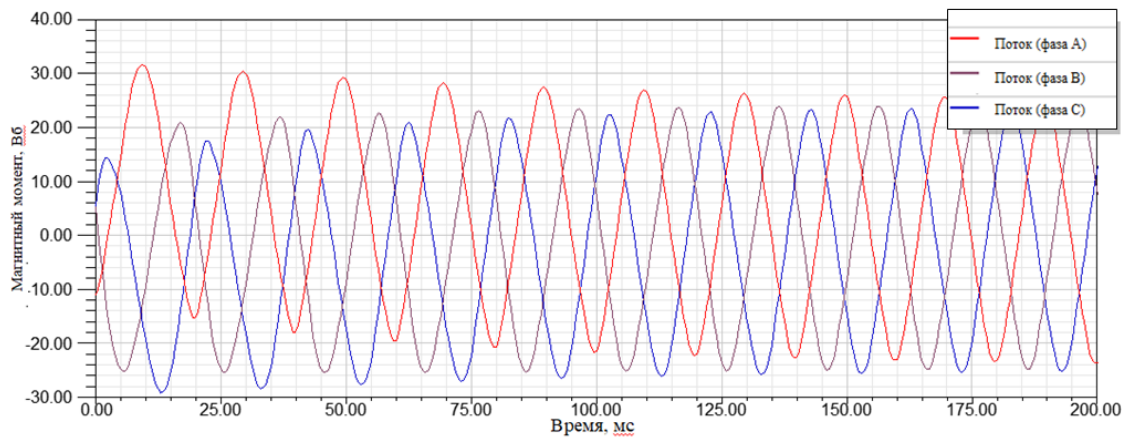


Рисунок 56 – Осциллограмма магнитного потока при ВКЗ

3.5 Расчеты по измененной геометрии ротора на 35% в сторону от статора

А) номинальный режим, основные характеристики приведены на рисунках 57-61.

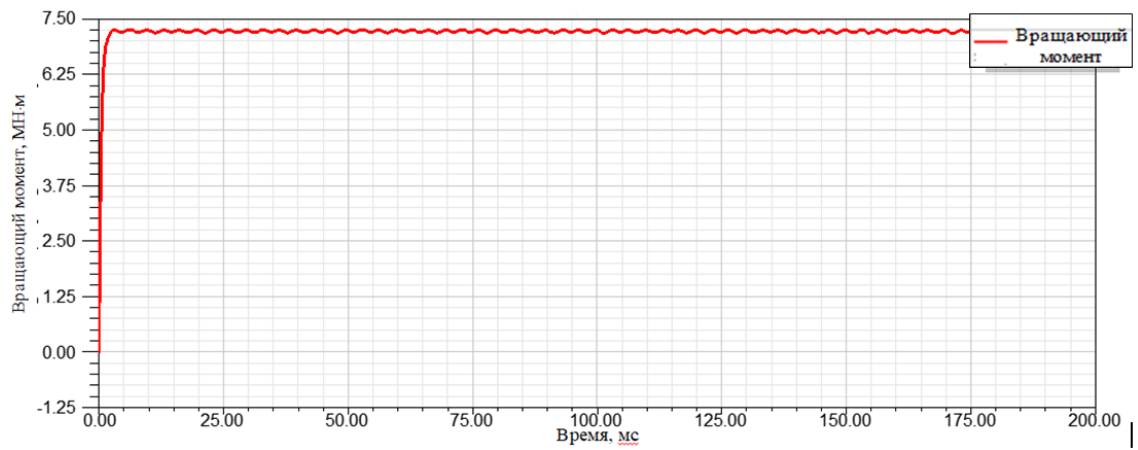


Рисунок 57 – Характеристика вращающего момента от времени

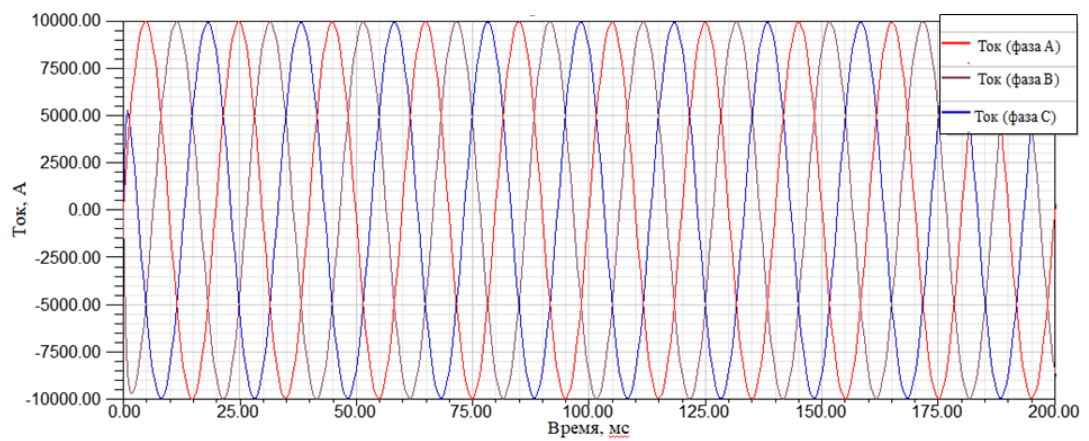


Рисунок 58 – Кривые тока на выходе синхронного генератора

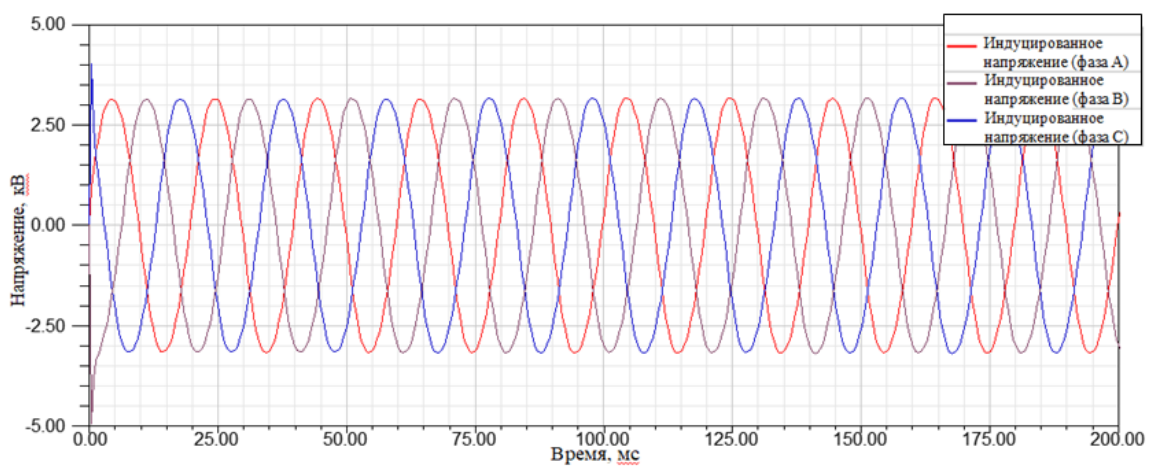


Рисунок 59 – Кривые напряжения на выходе синхронного генератора

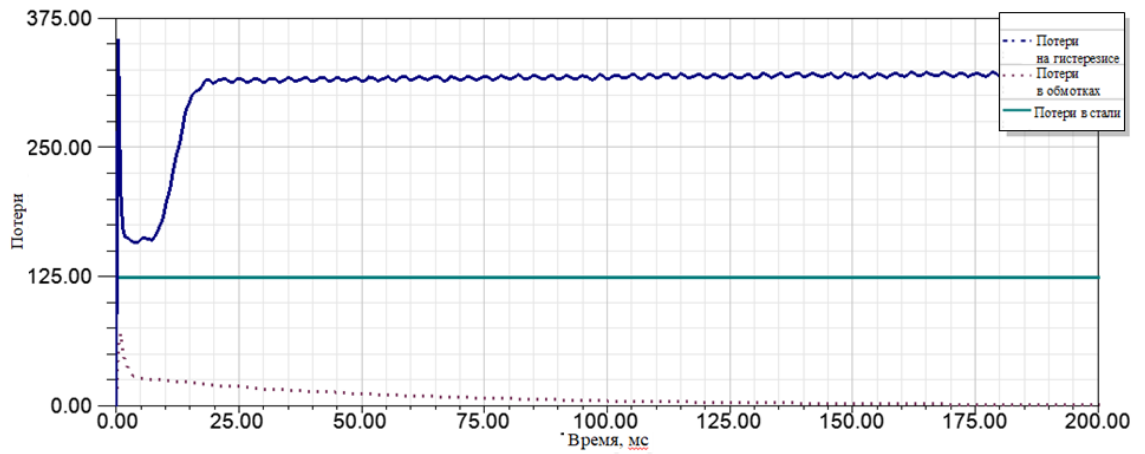


Рисунок 60 – Основные и добавочные потери в синхронном генераторе

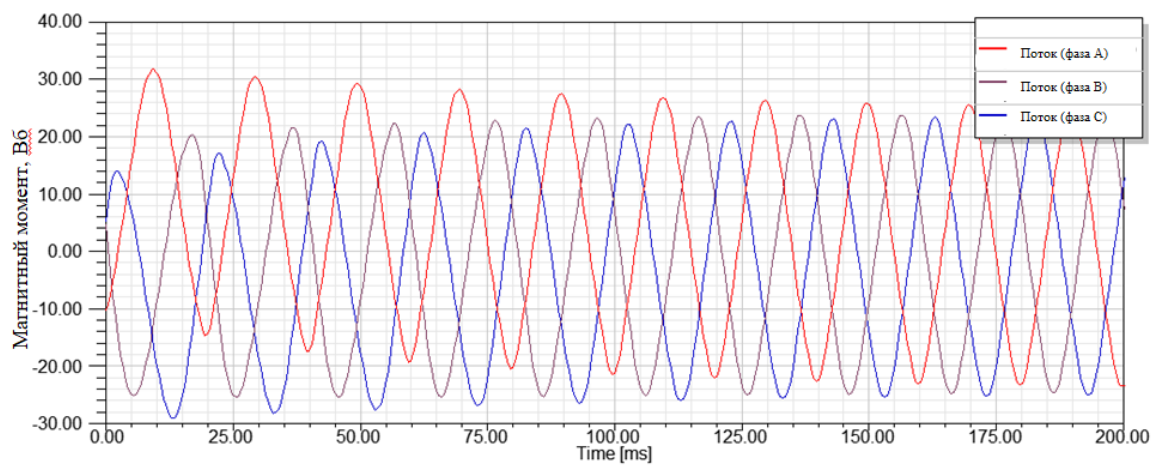


Рисунок 61 – Осциллограмма магнитного потока

Б) режим ВКЗ, основные характеристики приведены на рисунках 62-66.

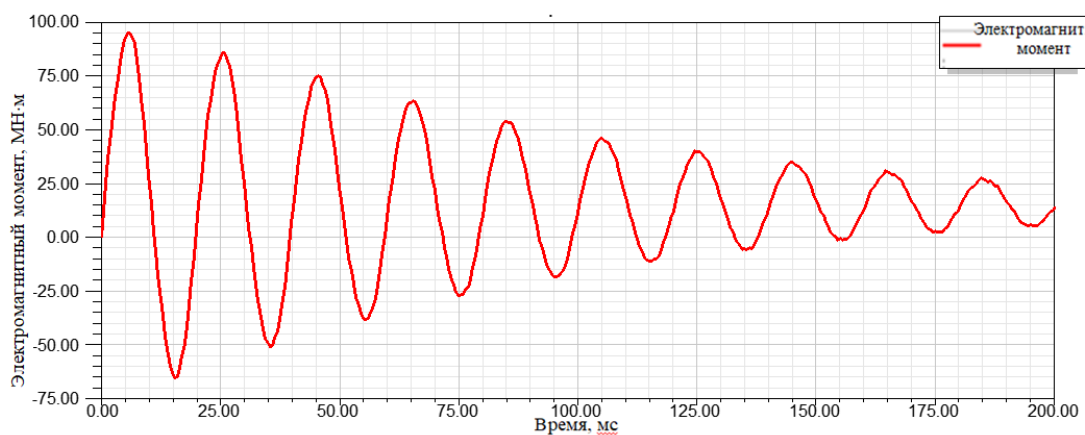


Рисунок 62 – Расчет переходного электромагнитного момента в режиме внезапного короткого замыкания при деформации геометрии

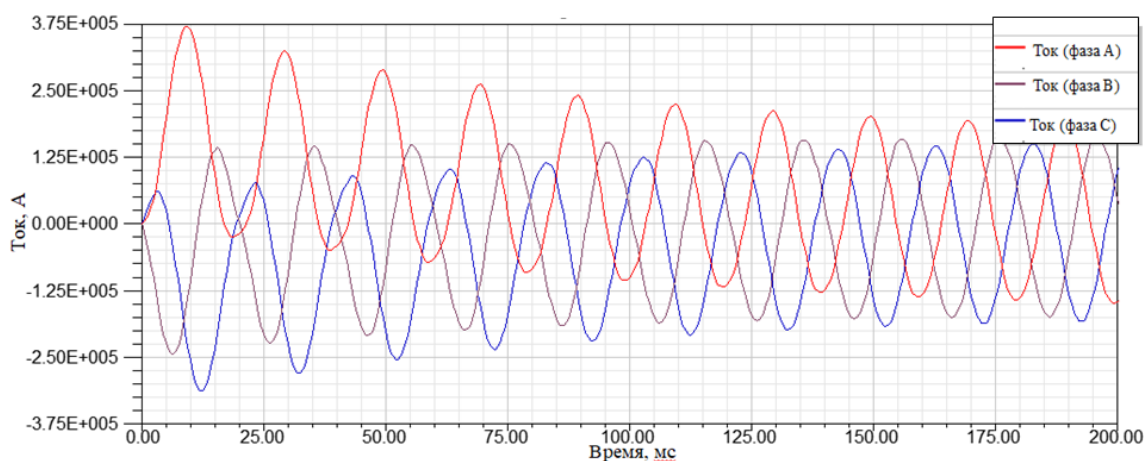


Рисунок 63 – Расчетная зависимость тока от времени в режиме внезапного короткого замыкания

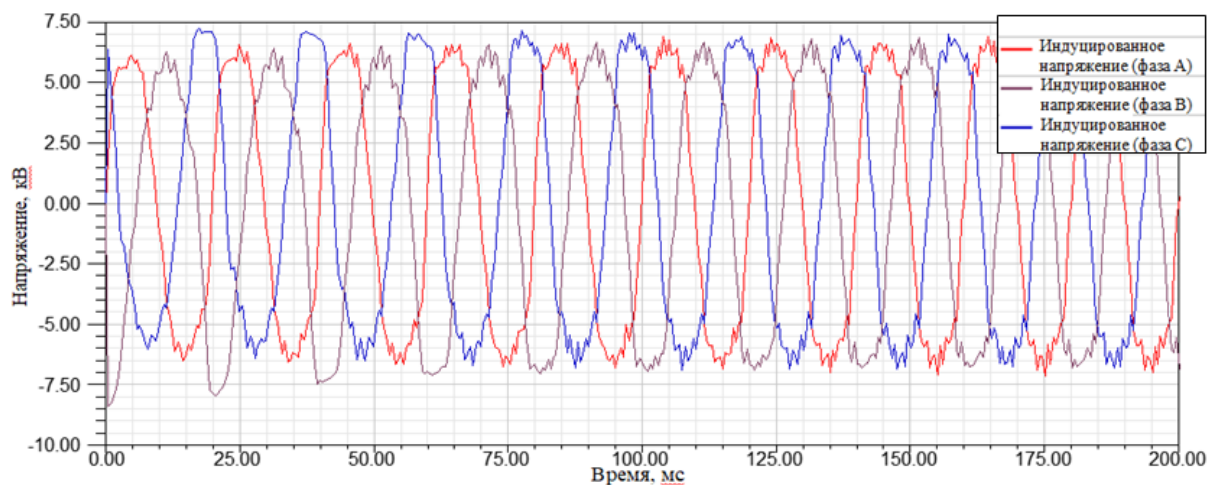


Рисунок 64 – Осциллограмма напряжения на выходе генератора в режиме ВКЗ

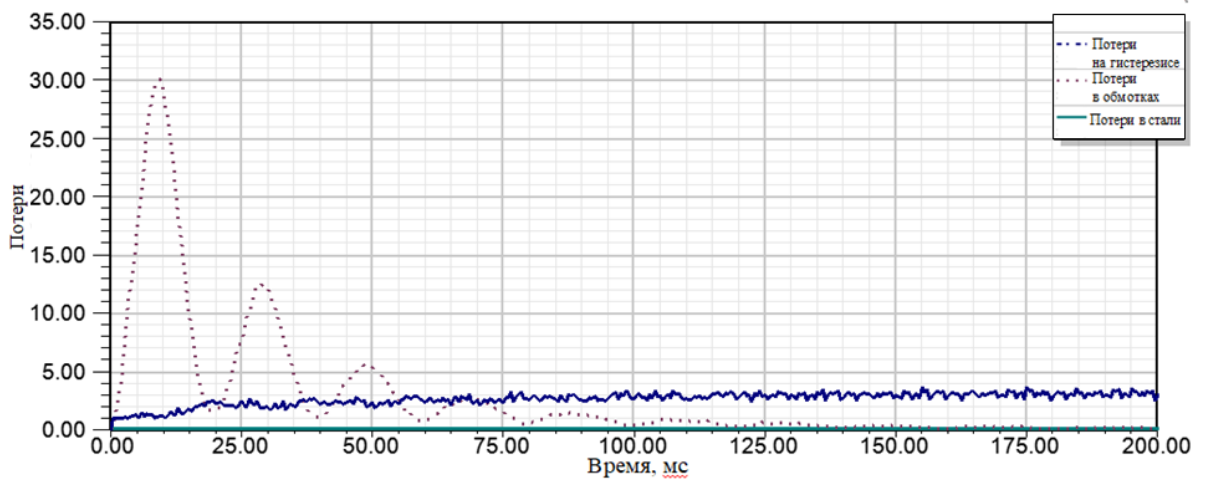


Рисунок 65 – Расчет основных и добавочных потерь в режиме ВКЗ

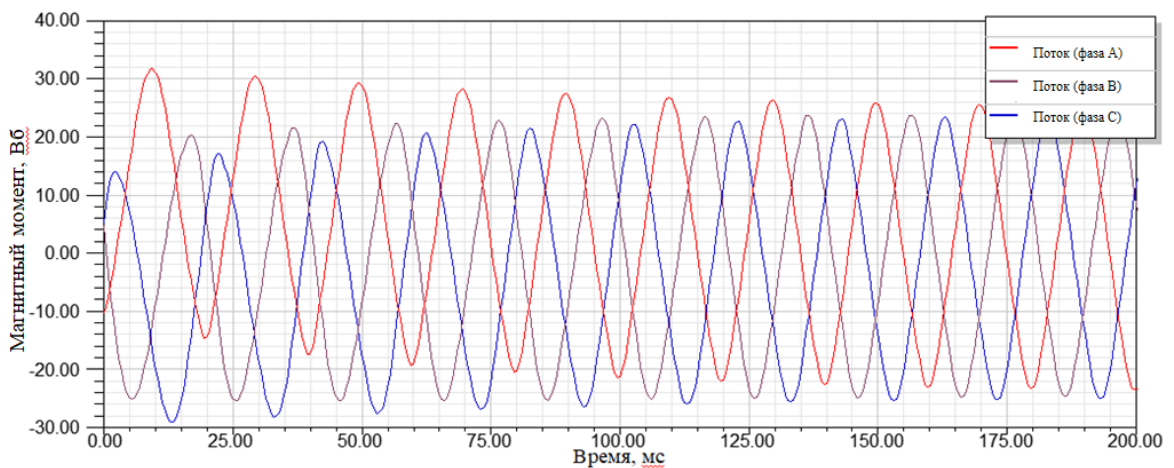


Рисунок 66 – Осциллограмма магнитного потока при ВКЗ

На основании вышеперечисленных формул была проделана работа и сделана аналитическая верификация электромагнитного момента в режиме внезапного короткого замыкания (ВКЗ) при симметричном воздушном зазоре, равном 23 мм и в режиме номинальной мощности. В таблицах 2,3 приведены результаты расчетов.

Также наблюдается очевидная апериодическая составляющая, определяющая ударное значение тока короткого замыкания. Демпферная обмотка позволяет минимизировать ударное значение максимума тока.

Таблица 2 – Режим номинальной мощности

Изменение воздушного зазора между ротором и статором, %	Максимальная индукция магнитного поля в воздушном зазоре, Тл	Минимальная индукция магнитного поля в воздушном зазоре, Тл	Отношение номинального напряжения к напряжению на выходах генератора	Отношение текущего тока к номинальному	КПД, %
+20	0,797	0,76	4	1,89	99,1
+35	0,847	0,65	4,60	2,03	99,16
-10	0,885	0,713	3,94	1,93	99,23
-20	0,741	0,101	3,68	1,87	99,10
-35	0,741	0,101	3,73	1,93	99,12

Таблица 3 – Режим внезапного короткого замыкания

Деформация ротора по отношению к статору, %	Отношение максимального вращающего момента к номинальному, $M_{max}/M_{ном}$	Отношение максимального тока к установившемуся $I_{max.aper}/I_{max}$	Отношение номинального напряжения к напряжению на выходах генератора	Постоянная времени якоря, мс
+20	5,5	2,5	1,73	110
+35	5,28	2,5	1,92	125
-10	5,78	2,37	1,86	145
-20	5,89	2,33	1,86	125
-35	5,56	2,33	1,86	110

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены различные варианты изменения геометрии ротора. При деформации ротора в направлении от статора будет возрастать воздушный зазор. Вследствие этого сопротивление магнитному потоку увеличивается, что приводит к уменьшению индукции. Это объясняется с помощью применения формулы расчета магнитных цепей. В данном случае, как показывают результаты исследований, снижаются потери в сердечнике синхронной машины вследствие снижения индукции магнитного поля, как показано в формулах Штейнмеца: потерь на гистерезис, потерь на вихревые токи и добавочных потерь. Уменьшение потерь в свою очередь приводит к увеличению КПД. Но, к сожалению, при таком снижении индукции, напряжения на выходах синхронной машины падает согласно уравнению (1). Поэтому, в целях поддержания заданного уровня напряжения на выходах генератора необходимо поднимать ток возбуждения генератора. Но, это приведет к значительным тепловым перегрузкам ротора, которые не приемлемы для гидроагрегатов данного исполнения, т.к. они без форсированного охлаждения. По результатам исследований режима внезапного короткого замыкания, возможно рассчитать индуктивность при новой форме искажения геометрии машины, как показано в таблице 3. На основании исследований получены результаты по изменению постоянной времени.

При увеличении воздушного зазора на +30%, максимальный вращающийся момент может разрушить генератор вследствие большого апериодического тока короткого замыкания. Аналогично увеличивается значение апериодической составляющей тока, который приводит к перегреву обмоток при ВКЗ.

При уменьшении ширины воздушного зазора между ротором и статором как показывают исследования, индукция магнитного поля уменьшается. В результате этого, как уже показывали формулы Штейнмеца, снижаются потери в сердечнике синхронной машины. Так же, как и в предыдущем опыте, это

приводит к некоторому увеличению КПД машины. Но, напряжение на выходе синхронной машины уменьшится, за счет снижения индукции. Анализ исследования предыдущего направления деформации указывает, что снижение напряжения в текущем варианте значительней, чем в предыдущем случае. Поэтому, имеется необходимость в увеличении тока возбуждения синхронной машины еще выше, что приводит к еще дополнительным тепловым перегрузкам.

Для улучшения адекватности расчетов, необходимо дополнительно предложить данные по параметрам геометрии синхронной машины, полюсных делений, геометрии статора и паза. Любые дополнительные изменения в геометрии будут реализованы в будущих версиях отчета в соответствии с требованием заказчика.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Глебов, И.А. Гидрогенераторы: монография /И. А. Глебов, В. В. Домбровский, А. А. Дукштау [и др.] ; Л.: Энергоиздат, Ленингр. Отделение, 1982. – 368 с.
2. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин : учебник для вузов/ И. П. Копылов – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ЮРАЙТ, 2011. – 50 с. – ISBN 978-5-534-11700-4.
3. Удалов, С. Н. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография / С. Н. Удалов, В. З. Манусов. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. - 200 с - (Монографии НГТУ).
4. Национальная технологическая инициатива: Программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 году. [Электронный ресурс]: 2016 г. – Режим доступа: <https://asi.ru/nti/> свободный (Дата обращения: 26.02.2021 г.).
5. Гроп, Д. Методы идентификации систем: монография / Д. Гроп – перевод с английского Васильев В.А., Лопатина В.И., под ред. Кринецкого Е.И. – Москва: МИР, 1979. – 302 с.
6. Дилигенская, А. Н. Идентификация объектов управления: учебное пособие / А.Н. Дилигенская – Самара: СГТУ, 2009. – 36 с.
7. Райбман, Н. С. Что такое идентификация? : монография / Н. С. Райбман - Москва: Наука, 1970.–118 с.
8. Андреев, Михаил Владимирович. Повышение эффективности настройки цифровых устройств релейной защиты за счет использования их математических моделей [Электронный ресурс] = Increase efficiency of digital settings relay protection devices for use account their mathematical models / М. В. Андреев // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2017. — № 2 (91). — [С. 38-45]. — Заглавие с экрана. — Доступ по договору с организацией-держателем ресурса.

Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=28838579>(Дата обращения: 03.03.2022 г.).

9. П. Эйкхофф, Основы идентификации систем управления: пер.с англ. В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель/ Под ред. Н.С. Райбман-М.: Изд-во Мир,1975. – 680с.

10. Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс], - Режим доступа: <https://simenergy.ru/simulation>(Дата обращения: 13.08.2021 г.).

11. Моделирование электромеханических комплексов с синхронными двигателями в системе проведения математических расчетов MATLAB, пакет Simulink / Б. Н. Абрамович, Ю. Л. Жуковский, А. А. Круглый, Д. А. Устинов; под ред.д-ра техн. наук, проф. Б.Н. Абрамовича- Санкт-Петербург: Изд-во Нестор, 2007. – 59 с.

12. Брызгалов, В. И. Гидроэлектростанции : учебное пособие / В. И. Брызгалов, Л. А. Гордон. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002.-541с. – ISBN 5-7636-0437-7

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Аналитический расчет числа витков в обмотке возбуждения

Таблица А.1 – Аналитический расчет числа витков в обмотке возбуждения

Наименование показателя	Значение показателя
Расчетная мощность (кВА):	117650,00
Расчетный коэффициент мощности:	0,85
Расчетное напряжение:	13800,00
Схема соединения обмоток:	Звезда
Число полюсов:	96,00
Частота (Гц):	50,00
Номинальная скорость:	62,5
Рабочая температура (С):	65,00
КПД (%):	98,5
Ток возбуждения (А):	1440,00
Статор	
Число пазов на статоре:	756,00
Внешний диаметр статора (мм):	15000,00
Внутренний диаметр статора (мм):	14300,00
Паз статора и его конфигурация	
Верхняя ширина зуба (мм):	29,4243
Нижняя ширина зуба (мм):	30,5047
Длина статора (мм):	1700,00
Коэффициент заполнения якоря:	0,95
Тип стали:	Э43А
Обмотка статора	
Длина обмотки (мм):	80,00
Зазор между якорем и обмоткой (мм):	6,00
Шаг катушки:	8,00
Число проводников на паз:	2,00
Ротор	
Минимальный воздушный зазор (мм):	23,00
Внутренний диаметр (мм):	13200,00
Длина ротора (мм):	1700,00
Коэффициент заполнения ротора:	0,95
Коэффициент заполнения полюса:	0,95
Обмотка возбуждения	
Количество параллельных ветвей	2,00
Тип намотки	Поперечная катушка
Количество витков на полюс	70,00
Зазор между обмотками (мм)	0,00
Размещение обмотки в статоре	
Электрический угол:	22,8571
Шаг обмотки статора	8,00

На рисунке А.1 представлено размещение обмотки в статоре

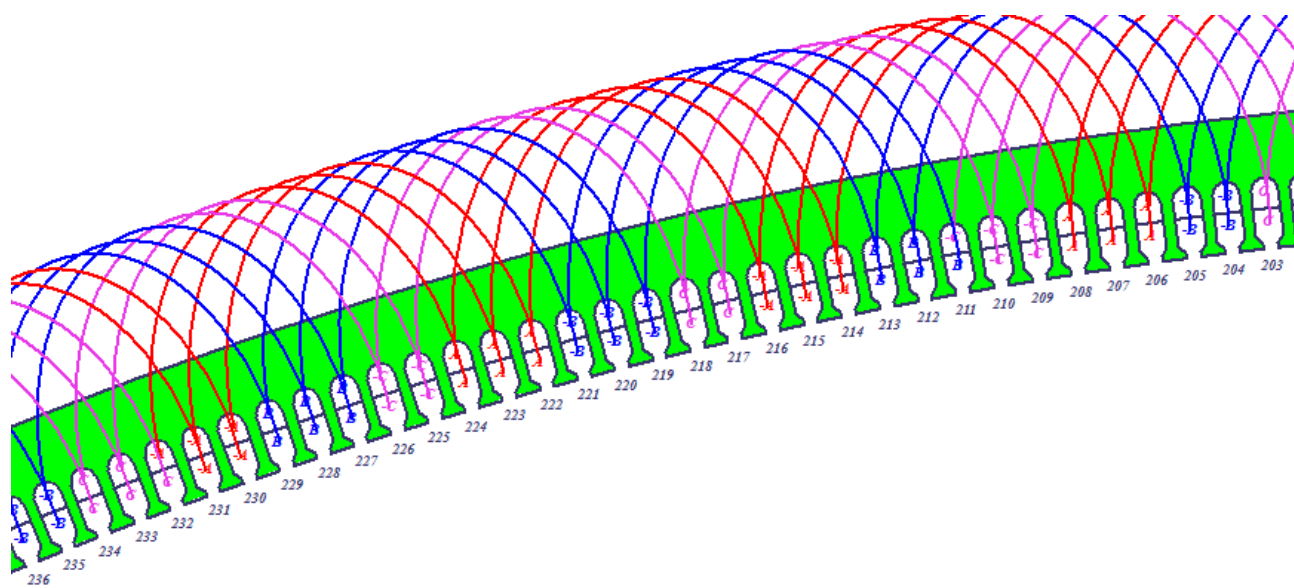




Рисунок А.1 – Размещение обмотки в статоре

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



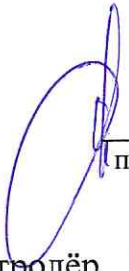
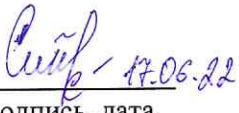
Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических
систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

подпись А.А. Ачитаев
инициалы, фамилия
«16»  2022 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМ СТАТОРА И РОТОРА
НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ГИДРОАГРЕГАТА**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Руководитель	 подпись, дата	канд.техн.наук, и.о. зав. кафедрой ГГЭЭС, Саяно-Шушенского филиала должность, ученая степень	<u>А.А. Ачитаев</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата		<u>Н.С. Савельева</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 подпись, дата	зам. главного инженера по технической части филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного» должность, ученая степень	<u>Д.Ю. Рыбалко</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролёр	 подпись, дата		<u>К.П. Синельникова</u> инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2022