

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

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка электромагнитной модели силового трансформатора при протекании квазипостоянных токов по заземленным обмоткам»

Студент(ка)

М.О. Зюзин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

В.В. Вахнина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина _____

« ____ » _____ 2016 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина _____

« ____ » _____ 2016 г.

Тольятти 2016

Содержание

Введение	3
1 Анализ причин повреждения силовых трансформаторов	6
1.1 Системные аварии в системах электроснабжения	
1.2 Опасные природные явления и их влияние на работу систем электроснабжения	8
1.3 Солнечные геомагнитные бури	16
1.4 Влияние квазипостоянных токов на работу систем электроснабжения	21
1.5 Выводы по 1 разделу	25
2 Исследование влияния КПТ в зависимости от конструкции трехфазного силового трансформатора	26
2.1 Анализ конструкции трехфазного силового трансформатора	
2.2 Исследование влияния квазипостоянных токов на параметры ветви намагничивания силового трансформатора	31
2.3 Выводы по 2 разделу	37
3 Разработка расчетной модели силового трансформатора при воздействии КПТ	38
3.1 Разработка алгоритма определения параметров схемы замещения силового трансформатора при воздействии КПТ	
3.2 Компьютерная модель работы силового трансформатора при протекании КПТ по обмоткам высокого напряжения	42
3.3 Анализ результатов моделирования	65
3.4 Меры по защите силовых трансформаторов при функционировании в периоды геомагнитных бурь	85
3.5 Выводы по 3 разделу	92
Заключение	93
Список использованных источников	94

Введение

Энергетика важна для нашего общества, она обеспечивает нас должным качеством жизни и необходима всем остальным секторам в экономике. Об энергетике можно говорить, не только в масштабах государства, но и планеты. Во многих странах электрическая энергия это основной удобный вид потребляемой энергии. Проведя анализ событий произошедших за последнее время, можно заключить, что любая, даже самая недолговременная системная авария в электроснабжении может привести к проблемам сопоставимыми с огромными затратами на восстановление экологической, экономической ситуаций и т.п. Количество потребления и производства электрической энергии это один из важнейших факторов который, как критерий показывает уровень жизни страны. Причиной всевозможных системных аварий являются короткие замыкания в системах электроснабжения на различных элементах, ошибки оперативного персонала, а также природные воздействия.

По статистическим данным наибольшая доля устойчивых отключений воздушных линий происходит от опасных природных воздействий. Стихийные бедствия приводят к разрушению или значительному повреждению энергетических объектов. Одной из разновидностей природных катаклизмов являются геомагнитные бури (ГМБ). Магнитное поле Земли изменяется в периоды ГМБ. Под действием изменения магнитного поля на поверхности Земли наводится разность потенциалов, вследствие чего в протяженных металлических системах наводятся квазипостоянные токи (КПТ). Значение КПТ не зависит от причины изменения этого магнитного потока.

Учитывая экономический рост производства, развитие и усложнение конфигурации систем электроснабжения, а также ввод в эксплуатацию большого количества информационно-вычислительной техники, требования к надежности и экономичности сетей возрастают соответственно. Расширение влияния рыночной экономики Российской Федерации, заставляет проявлять

все больший интерес к изучению, созданию и использованию различных моделей и методик в энергетике.

Независимо от структуры и состава, СЭС представляют собой сложную нелинейную систему, в которой изменения, происходящие в одной ее подсистеме, сразу же оказывают влияние на всю систему. Так же необходимо учитывать влияние на СЭС множества различных внешних и случайных факторов.

Нелинейность и большой порядок уравнений, описывающих режимы СЭС, приводит к тому, что до настоящего времени искомые взаимозависимости параметров режима получались либо в виде дискретного набора данных, либо в виде локальных, чаще всего линейных зависимостей. Поэтому методы, позволяющие находить полные решения для искомых зависимостей или оценивать возможность существования таких полных решений, имеют большое практическое значение для целей управления режимами.

Из вышеизложенного следует вывод о необходимости создания и применения новых методов при построении моделей СЭС при исследовании геомагнитных бурь. В частности, к таким методам относятся компьютерное моделирование.

Целью магистерской диссертации является повышение надежности функционирования силовых трансформаторов в системе электроснабжения при протекании квазипостоянных токов в период геомагнитных бурь.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

1. Анализ причин повреждений силовых трансформаторов;
2. Анализ конструкции трехфазного силового трансформатора, исследование влияния КПТ на параметры ветви намагничивания силового трансформатора;
3. Разработка расчетной модели силового трансформатора при воздействии КПТ, анализ полученных данных, разработка мероприятий по повышению надежности функционирования силовых

трансформаторов систем электроснабжения при протекании квазипостоянных токов в период геомагнитных возмущений.

1 Анализ причин повреждения силовых трансформаторов

1.1 Системные аварии в системах электроснабжения

Энергетической системой (энергосистемой) называется совокупность установок и устройств для производства, передачи, распределения и потребления электрической и тепловой энергии.

Часть энергосистемы, производящая, распределяющая и преобразующая электроэнергию, называется электроэнергетической или (по традиции) электрической системой. [2]

Во время функционирования любой системы есть риск нарушения ее нормальной работы. В случае с электрической системой это различного рода аварии, в частности системные аварии.

Под системными, понимают аварии, связанные с прекращением энергоснабжения значительной части потребителей энергосистемы, а также, связанные с нарушением параллельной работы электростанций, т.е. такие, как нарушение устойчивости системы, разделение энергосистемы на части, вызывающее отключение потребителей более 5 % мощности системы, работа с частотой ниже допустимой. Системная авария обычно связана с аварией в электрических сетях, но может вызываться и стационарными повреждениями. [1]

Системные аварии с обесточением потребителей происходят, как правило, там, где необходимо обеспечить энергоснабжение многомиллионных регионов с большим потреблением электрической мощности. Системные аварии в единой энергетической системе (ЕЭС) развиваются, как правило, по индивидуальным сценариям, так как являются обычно наложением большого количества случайных факторов. Приведем основные причины, приводящие к возникновению аварийных ситуаций в системах электроснабжения (СЭС):

- технические
- экономические
- человеческий фактор

- опасные природные явления

Рассмотрим более детально перечисленные факторы возникновения аварийных ситуаций в СЭС.

1. Технические – подразумевают под собой износ оборудования (известно, что в развитых странах, более половины электрооборудования превысило свой нормативный срок службы [12]), отсюда ухудшение длительной прочности внутренней изоляции электроустановок, что ведет к поломке дорогостоящего оборудования систем электроснабжения, неправильная работа противоаварийной автоматики (в частности, из-за отсутствия в алгоритме противоаварийной автоматики реально возникающих сценариев развития аварийной ситуации), ложное срабатывание устройств релейной защиты, аварии на электростанциях с остановкой работающих генераторов и так далее.

2. Экономические – в связи с экономической ситуацией, в условиях кризиса, происходит отставание ввода новых мощностей, отсюда рост потребления электроэнергии, не обеспеченный вводами, недостаточное развитие электрических сетей и, как следствие, их неспособность передать необходимую мощность электрической энергии в отдельный район энергосистемы, неправильное прогнозирование потребления и генерации электрической энергии и другие причины.

3. Человеческий фактор – ошибки оперативного и диспетчерского персонала, вызванные недостаточной теоретической подготовкой, недостаточными навыками работы с управляемым объектом, отсутствием навыков предсказания аварийных ситуаций и так далее [29].

4. Опасные природные явления – учитывая большое территориальное расположение объектов энергетической системы России, возможны различные погодные условия и опасные природные явления, такие как, сильные ветры (падения деревьев с последующим возможным обрывом линий электропередач), снежные циклоны, гололед (закорачивание линии с последующим износом оборудования), грозовые фронты (как следствие,

возможные удары молний в электроустановки, возникновение перенапряжений и следовательно различного рода короткие замыкания), геомагнитные бури.

В последнее время, большое внимание уделяется бесперебойной работе СЭС при воздействии опасных природных явлений, так как именно по этой причине происходят самые крупные аварии в системах электроснабжения, обуславливающие большие экономические потери, а также возможные человеческие жертвы [15].

1.2 Опасные природные явления и их влияние на работу систем электроснабжения

Опасное природное явление – это событие природного происхождения или результат деятельности природных процессов, которые по своей интенсивности, масштабу распространения и продолжительности могут вызвать поражающее воздействие на людей, объекты экономики и окружающую природную среду [13].

Катастрофическое воздействие опасных природных явлений на системы электроснабжения нельзя недооценивать, так как они могут приводить к ужасающим последствиям. Приведем некоторые крупные системные аварии, вызванные воздействием природных факторов.

Причины системных аварий по вине природных явлений можно подразделить на несколько вызывающих факторов: перенапряжение в следствие попадания молнии, аномально жаркая погода, гроза, снегопады, снежные циклоны и геомагнитные бури. Проведем корреляцию между отказами и произошедшими крупными природными воздействиями.

В Британской Колумбии в августе 1972 года вследствие геомагнитной бури взорвался силовой трансформатор, находившийся в эксплуатации гидроэлектростанции напряжением 230 кВ. Геомагнитная буря была достаточно сильная, так как в данных широтах было зарегистрировано даже полярное сияние.

Следующее событие произошло 13 июля 1977 г. в Соединенных Штатах Америки в г. Нью-Йорк. Из-за неблагоприятных погодных условий и образовавшейся грозы, молния попала в ЛЭП и вследствие этого г. Нью-Йорк и весь пригород остались без электрической энергии.

Самая сильная геомагнитная буря была зарегистрирована 13 – 14 марта 1989 года в Канаде, в провинции Квебек. Геомагнитная буря послужила причиной каскадных отключений линий электропередач и силовых трансформаторов, а также несколько электростанций «сели на ноль».

Каскадное отключение на этот раз произошло в западных штатах США, только причиной послужило другое природное явление. 11 августа 1996 года установилась аномально жаркая погода, а результатом этого стал резкий рост потребления электрической энергии и неспособность выработки дополнительной мощности электростанциями.

В июле 1999 года, также в США, в г. Нью-Йорк установилась на три дня рекордно-аномальная жара, что в свою очередь привело к отключению систем электроснабжения города на 19 часов.

Отключение линии электропередач 330 кВ и, как следствие обесточивание потребителей суммарной мощностью в 70 МВт, произошло в России (Мурманская область) в ноябре 2001 года.

Образовавшийся фронт привел к грозе и сильнейшим порывам ветра (около 100 км/ч) 27 августа 2003 г. в США, штате Вашингтон. По причине сильных порывов ветра произошел обрыв ЛЭП и отключение электроснабжения потребителей численностью в 200 т. человек.

Вследствие установившейся штормовой погоды 23 сентября 2003 г. на юге Швеции и прилегающей территории Дании, была повреждена межсистемная ЛЭП связывающая энергосистемы Швеции и Дании. Результатом этого стал перерыв подачи электрической энергии в Копенгагене и Мальме.

28 сентября 2003 г. на территории Италии при штормовых порывах ветра была нарушена работа связующих линий электропередачи между Италией и

соседними странами Евросоюза. Отключения ЛЭП произошли из-за падения дерева на линию и повреждении последней.

Еще одна сильнейшая геомагнитная буря произошла в октябре 2003 года. На этот раз в Швеции без электроснабжения остались около 5 млн. человек на 4 часа. Проведенная корреляция показала также, что в указанные дни произошло достаточно большое количество отключений силовых трансформаторов в странах Скандинавии.

В штате Квинсленд в Австралии без электроэнергии остались 25 тысяч домов. Вследствие шторма 9 октября 2007 года произошел обрыв линии электропередачи.

14 – 15 октября 2007 г. в Москве и Московской области была обесточена большая часть Подмосковья из-за неожиданного снегопада и сильного ветра. Коммунальные службы не были готовы в полной мере к сложившейся ситуации.

31 июля 2012 в Индии из-за аномально высокой жары и возросшего потребления энергии, были отключены около 600 млн. человек.

Следующие аномальные погодные явления были зарегистрированы в Сахалинской области. 16 и 17 декабря 2014 г. в результате сильного снежного циклона без электроэнергии осталось около 300 тыс. потребителей. 7-8 января 2015 г. также, во время снежного циклона было обесточено 20 населенных пунктов.

Видно, что опасные природные явления за последние десятилетия значительно учащаются, что также заявлял руководитель ВЦМП Владислав Болов: «Более продолжительные наблюдения за погодой показывают, что климатические изменения, которые происходят во всем мире, привели к тому, что в России увеличилось число крупномасштабных природных катастроф. В первую очередь, наводнений и лесных пожаров. За последние 100 лет температура на планете повысилась примерно на 0,8 градуса, потепление влияет на частоту возникновения лесных пожаров — их становится больше. Количество осадков же в прошлом году было выше нормы на 13 %, это стало

причиной наводнений и паводков (в дальнейшем число наводнений и паводков, в том числе на Дальнем Востоке, продолжит расти).

Климатические изменения могут привести и к другим проблемам, в следующие 50 лет в России произойдет расширение территории проявления смерчей, и они могут стать системным явлением» [18].

13 августа 2011 года без электроэнергии остались около 645 тысяч потребителей в Калининградской области. Авария была вызвана попаданием молнии в линию электропередач классом напряжения 330 кВ, которая связывает Калининградскую область с Литвой. Также на время строительства обводной дороги в районе города Советска, была отключена вторая линия. Невозможность передачи мощности от ТЭЦ – 2 привело в действие автоматику и отключило оба энергоблока. [31]

Системная авария в Индии 30 и 31 июля 2012 года носила повторный характер, дважды в одни сутки объединенная энергосистема Индии разделялась на части с погашением отделенных частей энергосистемы. Системная авария в Индии на данный момент считается самой крупной аварией в электроэнергетике в мире. 30 июля от аварии в системе электроснабжения в районе города Агра, без электричества осталась наибольшая часть северной Индии (около 8 штатов – 300 миллионов человек). 31 июля произошло отключение 48 ГВт нагрузки, поставка электричества в Дели упала с 4000 МВт до 40 МВт (без электроэнергии оставалось около 600 миллионов человек – 19 штатов) [22].

Самая сильная зарегистрированная на данный момент геомагнитная буря произошла в 1989 году 13-14 марта в период 22 цикла активности Солнца.

В период 13 марта геомагнитная буря достигла своей максимальной интенсивности воздействия, когда Dst-индекс геомагнитной активности достиг рекордного с 1957 г. значения в 589 нТл (или даже 640 нТл по другим данным).

Произошедшая геомагнитная буря повредила СТ в Канаде, вызвала сбои в энергосистеме США, нарушила работу аппаратов космического назначения, а полярные сияния были видны до широты.

В результате геомагнитной бури (ГМБ) произошло полное отключение электроэнергосистемы Hydro-Quebec. Воздействие ГМБ продолжалось около 9 часов, без электроэнергии осталось около 6 миллионов человек.

Причиной аварии в электроэнергосистеме Hydro-Quebec послужило воздействие квазипостоянных токов (КПТ) на уровень высших гармоник в высоковольтных линиях электропередач и потере из системы семи статических компенсаторов реактивной мощности. Это привело к падению напряжения в системе и увеличению частоты, что вызвало собой отключение ЭЭС Hydro-Quebec. Вследствие того, что большая генерирующая часть системы была потеряна, а вместе с ней и нагрузка, оставшаяся часть тоже вышла из строя. Последствия аварии устранялись в течение нескольких недель. Экономический ущерб составил порядка 23 миллиардов долларов США [41].



Рисунок 1.1 – Расплавление изоляции и обмоток силового трансформатора на АЭС в Нью-Джерси из-за перегрева во время ГМБ (13-14 марта 1989 г.)

Более всего уязвимы к воздействию КПТ силовые трансформаторы (СТ) систем электроснабжения. В следствие дополнительного намагничивания магнитной системы СТ становится генератором высших гармоник тока и напряжения. Возможно повреждение СТ, что влечет за собой огромные последствия, в частности экономические.

В последнее время большое внимание уделяется проблеме нормального функционирования систем электроснабжения в периоды геомагнитных возмущений [37, 38, 39], но в основном для высоких широт. Встречается слишком мало результатов исследований для широт находящихся ниже стран Скандинавии с целью выявления действия геомагнитных бурь на системы электроснабжения всей планеты. В основном, каждая страна находящаяся в средних и низких широтах изучающая воздействие квазипостоянных токов возникающих в периоды геомагнитных бурь занимается этим обособленно. В пример можно привести несколько стран расположенных в средних широтах, это Греция и Китай. Например, в статье [40] «Observations and modeling of GIC in the Chinese large-scale high-voltage power networks» Chunming Liu, Yunlong Li, and Risto Pirjola рассматривается мониторинг и моделирование квазипостоянных токов в энергосистеме Китая. В данной статье авторы указывают на тот факт, что обычно принято считать, что квазипостоянные токи возникающие в периоды геомагнитных бурь присущи только странам расположенным в северных широтах, таких как Канада и страны Скандинавии. Также, авторы приводят данные о том, что несмотря на расположение Китая в средней широте, там также были зарегистрированы большие токи в нейтралях силовых трансформаторов системы электроснабжения в периоды геомагнитных бурь. В работе силовых трансформаторов наблюдались аномальные шум и вибрации. Была проведена корреляция между интенсивностью геомагнитных бурь и нехарактерной работой силовых трансформаторов системы электроснабжения Китая, и выяснено, что данное воздействие оказывают именно квазипостоянные токи. Авторы приводят в доказательство измерения в нейтрале силового трансформатора на атомной электростанции Lingao (22.6° N,

114.6° E) в провинции Гуандун. Кроме того для корреляции данных, производились записи об активности геомагнитного поля Земли на геомагнитной обсерватории Чжаоцин (23.1° N, 112.3° E), которая находится недалеко от электростанции Lingao.

Исследуемая часть энергосистемы Китая и задействованные в получении данных обсерватории представлены на рисунке 1.2.

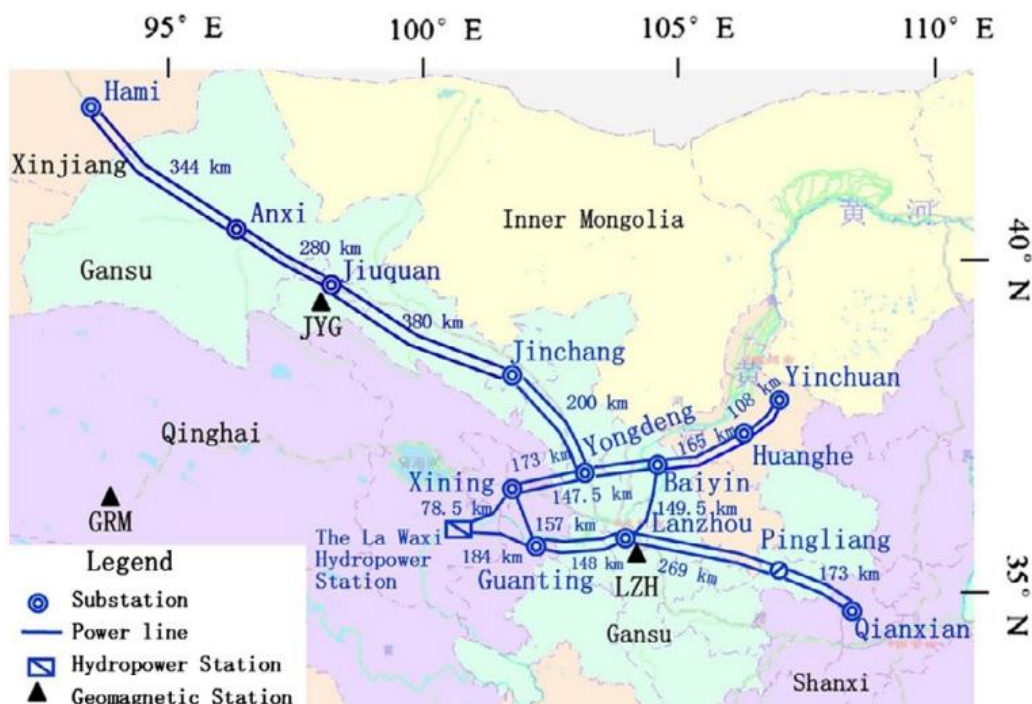


Рисунок 1.2 – Китайская Северо-Западная энергосистема 750 кВ и три геомагнитные обсерватории (GRM, LZH и JYG)

В качестве примера, исследования воздействия геомагнитных бурь на систему электроснабжения, также, можно привести Грецию. Проводимые исследования описаны в обширной статье [41] «Solar activity and transformer failures in the Greek national electric grid» автора Ioannis Panayiotis Zois. В статье автор приводит цель исследования – изучение двух эффектов воздействия геомагнитных бурь на систему электроснабжения Греции, в частности более подробно рассмотрено влияние квазипостоянного тока на силовые трансформаторы напряжением 150 кВ и 400 кВ. Данные эффекты различны по времени солнечной активности, соответственно: краткосрочные и

долгосрочные эффекты. Статья призвана доказать, что геомагнитные бури и возникающие в следствие этого квазипостоянные токи, проблема не только стран расположенных в северных широтах, таких, как Канада или страны Скандинавии, но также стран расположенных в средних и низких широтах. Методы исследования приведенные в статье основаны на: анализе данных с обсерваторий локального и глобального местонахождений, различных статистических методах и моделях. Результаты исследований были кратко изложены в аннотации к статье: 1) Воздействия имеющие краткосрочный характер: начиная с 1989 по 2010 было 43 «штормовых дня» (назовем так дни для которых $A_p \geq 100$) в период которых в системе электроснабжения Греции было 19 отказов в «штормовые дни» в пределах ± 3 дней и 51 отказ в «штормовые дни» в пределах ± 7 дней от «штормового дня». Все эти отказы можно отнести к воздействию квазипостоянных токов. 2) Для воздействий имеющих долгосрочный характер, для того же периода времени 1989 – 2010 года, имеются два главных результата:

а) Среднегодовое число отказов трансформаторов совпадает с диаграммой солнечной активности. Все же максимальное количество отказов трансформаторов возникает в середине солнечного цикла после максимальной солнечной активности.

б) Проведена статистическая корреляция между отказами трансформаторов и солнечной активностью с использованием новых индексов характеризующих долгосрочное возмущение Солнца. Эти новые индексы характеризующие долгосрочное возмущение были созданы с использованием двух массивов данных: локальным (обсерваторией расположенной в Греции) и глобальной. Беря во внимание обе статистические регрессии: линейную и нелинейную, были составлены уравнения регрессии и соответствующие коэффициенты детерминации.

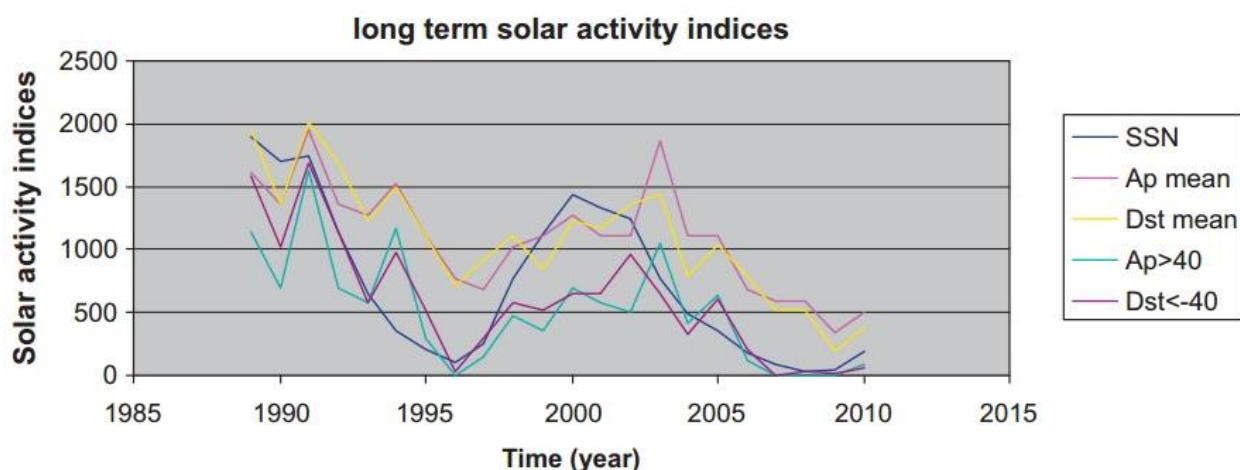


Рисунок 1.3 – Индексы долгосрочных эффектов солнечной активности полученные с обсерватории расположенной в Греции

Россия обширная по площади страна, занимающая 1/9 земной суши, расположенная в высоких и средних широтах. На данный момент идет активное заселение районов Дальнего Востока, выдача земель под сельское хозяйство и производственные нужды. В соответствие с этим вырастет потребление энергии в высоких широтах России, что повлечет за собой увеличение нагрузки на существующие объекты энергетики и строительство новых. А так как, на примерах блекаутов в США и Канаде, возможны огромные экономические потери, человеческие жертвы и выход из строя дорогостоящего оборудования объектов энергетики и не только, целесообразно более подробно рассмотреть механизмы возникновения геомагнитных бурь и их воздействие на системы электроснабжения.

1.3 Солнечные геомагнитные бури

Термин «космическая погода» можно охарактеризовать, как реакцию околоземной сферы на проявление активности Солнца и всех сопутствующих связанных с этим явлений. Данные явления оказывают воздействие на среду расположенную в космическом пространстве около планеты. Данная космическая среда называется «геосредой».

Солнечная активность и ее воздействие определяется такими факторами, как: излучение в рентгеновском диапазоне, частицы солнечного ветра, межпланетное магнитное поле, космические излучения и т.п.

Солнце испускает в космическое пространство частицы солнечного ветра (электроны, протоны и ядра гелия). Излучение бывает: долговременное и кратковременное. Межзвездная плазма вытесняется солнечным ветром и таким образом формируется гелиосфера. В периоды солнечных вспышек и из-за процессов в корональных дырах выбрасывается большое количество заряженных частиц.

Магнитная буря на Земле может быть вызвана двумя солнечными феноменами. Повышение возмущенности геомагнитной среды происходит при преодолении корональной дырой (или других гелио явлений) центра солнечного диска. Соответственно в два класса можно выделить следующие типы межпланетных возмущений среды: масштабные выбросы вещества с поверхности Солнца и лавины солнечного ветра высокой скорости, которые обычно называют возмущениями солнечно ветра.

Возбуждение магнитного поля Земли возникает тогда, когда магнитное поле солнечно ветра противоположно направлено земному. Авроральные потоки и северные сияния увеличиваются за счет взаимодействия солнечного ветра и геомагнитного поля. Под действием вышеизложенных факторов нарушается нормальная работа систем электроснабжения и различных коммуникаций основанных на действии электричества и магнетизма.

Самая сильная за последние 500 лет магнитная буря случилась осенью 1859 г. Тогда 26 августа на Солнце около 55° западной долготы появилась большая группа пятен, и произошел первый корональный выброс массы. 28 августа этот выброс достиг Земли скользящим ударом. В 07:30 GMT Гринвичская магнитная обсерватория обнаружила нарушение - сжатие сигнала в магнитосфере, а в 22:55 GMT началась основная фаза солнечной бури. Наблюдались большие магнитные возмущения, нарушение работы телеграфа и

полярные сияния на юге, до 25° северной широты. 30 августа геомагнитные возмущения от первого коронального выброса массы завершились.

1 сентября произошла вспышка рентгеновского излучения. В этот день в 11:15 GMT английский астроном Ричард Каррингтон (Richard C. Carrington) заметил белые вспышки на Солнце; которые были хорошо видны даже без оптических приборов. Затем большая группа солнечных пятен совершила вращение до западной долготы 12° . И вдруг поверх пятен вспыхнули два ослепительных шара, которые быстро росли. Они были столь яркими, что затмевали блеск Солнца. Примерно через пять минут шары исчезли.

2 сентября в 05:00 GMT магнитные обсерватории Гринвича и Кью зафиксировали геомагнитный хаос, немедленно последовавший за возмущениями; второй корональный выброс массы достиг Земли за 17 часов, двигаясь со скоростью 2380 км/с, обладая южной ориентацией магнитного поля. При этом наблюдались полярные сияния вплоть до 18° северной широты. Ночь над Америкой стала днем - так было светло от сполохов сияния. Города казались охваченными огнем. Полярные сияния после этой вспышки наблюдались даже в таких странах, как Ямайка, Куба, Индия а не только в высоких широтах. Имевшиеся тогда магнитометры зашкалили.

Свидетельством серьезности происходящего стали неполадки на телеграфных линиях в Европе и Северной Америке. Искровые разряды больно жалили телеграфистов и поджигали бумагу телеграфных лент. Даже при отключении аппаратов от батарей вызванные "электромагнитной бурей" токи все равно позволяли телеграфу нормально работать и передавать сообщения.

3-4 сентября основная фаза геомагнитного возмущения, вызванная вторым выбросом корональной массы; закончилась, но продолжало наблюдаться рассеянное полярное сияние уменьшающейся интенсивности. Солнечные вспышки и интенсивные корональные выбросы также ускоряли протоны до энергий в 30 мегаэлектронвольт (МэВ) или выше. В арктических областях, где магнитное поле Земли создает наименьшую защиту, протоны проникали до высот 50 км и давали дополнительную энергию ионосфере. В

результате, протонный ливень солнечной бури 1859 г. уменьшил количество озона в земной стратосфере на 5%. Для восстановления озонового слоя потребовалось четыре года [38, 39].

Так как полярные сияния распространяются от высоких широт к низким, сопровождающие их ионосферные и авроральные электрические токи индуцируют интенсивный, соединяющий континенты ток на поверхности Земли. Именно эти токи проникли в телеграфную систему. Многоамперные высоковольтные нагрузки и привели к тому, что сгорели несколько телеграфных станций. Цивилизация того времени еще не достигла нынешних технологических высот, удар солнечной бури 1859 г. не сказался серьезным образом на повседневной жизни. Если бы такая вспышка произошла в наши дни, то разрушений было бы гораздо больше: выведенные из строя космические спутники, сбой радиосвязи, отключение электричества на целых континентах, для восстановления которого потребовались бы недели, а то и месяцы. Хотя буря подобной мощности как в 1859 г. происходит редко, но бури половинной мощности происходят примерно раз в 50 лет.

Как и у всех планетарных образований, у Солнца, присутствует смена полярности магнитных полюсов. Период смены магнитных полюсов Солнца составляет примерно 22 года. Половина данного цикла составляет соответственно 11 лет и называется циклом солнечной активности. В соответствие с этим сильные геомагнитные возмущения происходят в период данного цикла. Максимальные пики активности Солнца из последних наблюдений приходятся на 1980, 1990, 2002 и 2013 года.

Воздействие на нормальное функционирование систем электроснабжения вследствие ГМБ датируется 1940 годом. Об отключении СТ и нарушениях баланса реактивной мощности в 1940 году сообщили электроэнергетические компании Канады и Соединенных Штатов. С этого времени началась регистрация нарушений в странах с развитыми протяженными сетями, в основном стран расположенных в высоких широтах.

За последние 30 лет наблюдается значительное увеличение количества сильных солнечных штормов.

Для представления характеристик разновидностей геомагнитных возмущений, обусловленных активностью Солнца, существуют индексы активности геомагнитного поля. На данный момент всех больше используют локальный индекс K , и планетарные индексы K_p, D_{st} вычисляемые из определенного количества обсерваторий объединенных в сеть. Данные индексы измеряются в единицах нТл.

K индекс – вычисляется по значениям от определенной обсерватории расположенной в конкретной области с трехчасовым интервалом. K индекс выражается значениями от 0 до 9 для интервалов в три часа. Определена нормальная кривая суточного геомагнитного поля в промежутке состоящем из трех часов, и соответственно каждое значение K индекса определяется отклонением от этого нормального вида. Другой индекс, K_p это планетарный индекс и он вычисляется из сети связанных обсерваторий (13 обсерваторий по всему миру) и является средним значением полученным от этой сети обсерваторий. Также на замену K_p индексу предложен A_p индекс, который является средним значением вариаций геомагнитного поля. Сравнение индексов A_p и K – представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение индексов A_p и K

A_p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K	0	3	7	15	27	48	80	140	240	>400

Возмущенность магнитного поля сильно меняется с широтой – ее максимум приходится на зону полярных сияний, поэтому шкала определения K – индекса имеет разную амплитуду. В таблице 1.2 приведены интенсивности геомагнитных бурь для обсерватории Москва, а также и их воздействия на СЭС [18].

Таблица 1.2 – Измерение интенсивности ГМБ для московской обсерватории

Класс ГМБ	A_p	K	Вариации геоэлектрического поля, нТл	Степень влияния на СЭС
Умеренная	0-7	0-2	0-20	Не влияет
Слабое возмущение	30-48	5	70-120	Стохастические отклонения различных значений в малых пропорциях в СЭС
Среднее возмущение	50-140	6-7	120-330	Дополнительный нагрев СТ из квазипостоянной составляющей, ложное срабатывание РЗА
Сильное возмущение	240-400+	8-9	330- 550+	Возможность выхода из строя СТ, ложное срабатывание РЗА, возможен блекаут энергосистемы

Необходимо указать, что индекс K , не берет в расчет возможный причиненный ущерб СЭС от геомагнитной бури. Это невозможно потому-что данный индекс не учитывает скорость изменения перемен геомагнитного поля.

1.4 Влияние квазипостоянных токов на работу систем электроснабжения

Непосредственной причиной геомагнитных бурь (ГМБ) являются возмущённые потоки солнечного ветра на орбите Земли, содержащие необходимую для генерации геомагнитной бури ориентацию межпланетного магнитного поля. Источниками этих потоков, в свою очередь, являются выбросы корональной массы и корональные дыры. При выбросе с верхних слоев атмосферы, корональное вещество движется в космическом пространстве со скоростью ~ 1200 км/с. В режиме реального времени за активностью Солнца, следит космический аппарат «SOHO».

Процесс образования геомагнитной бури можно описать следующим образом. В космическое межпланетное пространство с поверхности Солнца излучаются потоки частиц, солнечного ветра. Достигая Земли, солнечный ветер взаимодействует с магнитосферой. Ионизированные частицы не достигают поверхности планеты, но из-за взаимодействия с ионосферой и магнитосферой, индуцируются сильные токи в атмосфере Земли. Так происходит возмущение геоэлектрического поля планеты.

Существуют три типа ГМБ:

1. ГМБ с характером сильного возмущения и внезапным их началом. Принято, что они образуются за счет корональных дыр и вспышек на Солнце в периоды 11 летней максимальной активности Солнца.

2. Рекурсивные бури. Данные бури имеют периодический характер и повторяются примерно каждые 27 суток. Происходит это из-за вращения Солнца вокруг собственной оси. А так как пятна на Солнце могут производить свое влияние несколько месяцев подряд с той же силой, то и воздействие на ионосферу и магнитосферу при прохождении данного промежутка времени усиливается.

3. Существует также слабое возмущение от ГМБ, оно не зависит от каких-либо особенных факторов, а происходит от действия солнечного ветра.

ГМБ индуцирует поверхностные потенциалы Земли с различной амплитудой, зависящей от многих факторов, но главным образом от класса напряженности линии электропередач (ЛЭП). Между заземленными точками нейтралей силовых трансформаторов подстанций систем электроснабжения возникает электродвижущая сила (ЭДС). В протяженных высоковольтных воздушных линиях (ВЛ) электропередач (400 – 500 км), ЭДС может достигать нескольких киловольт и по электрическим сетям циркулирует квазипостоянный ток, достигая значений от нескольких десятков до нескольких сотен ампер на фазу.

Основное воздействие КПТ на системы электроснабжения заключается в следующем:

- насыщение магнитной системы силовых трансформаторов;
- вследствие насыщения магнитной системы силовых трансформаторов возрастают несинусоидальные намагничивающие токи, которые также циркулируют по СЭС;
- происходит дополнительный нагрев металлических элементов конструкции и токоведущих частей силовых трансформаторов, масла;
- силовой трансформатор становится генератором высших гармоник тока и напряжения;
- нарушается нормальная работа устройств релейной защиты, автоматики, телемеханики и устройств регулирования нагрузки.

Исходя из выше перечисленных воздействий КПТ на системы электроснабжения, следует, что вероятны определенные экономические риски, связанные с возможностью повреждения дорогостоящего оборудования систем электроснабжения.

Покажем наглядно действие КПТ в высоковольтных линиях электропередач СЭС при геомагнитных бурях. На рис. 1 показан прямолинейный участок высоковольтной воздушной линии электропередач с заданной длиной l , между двумя трансформаторными подстанциями. Обмотки трансформаторов Т1 и Т2 имеют заземления в двух точках – А и В. Между точками А и В возникает квазипостоянная ЭДС $E = E_{xy} \cdot l$, имея различные вариации поверхностных потенциалов, которая генерирует квазипостоянные токи.

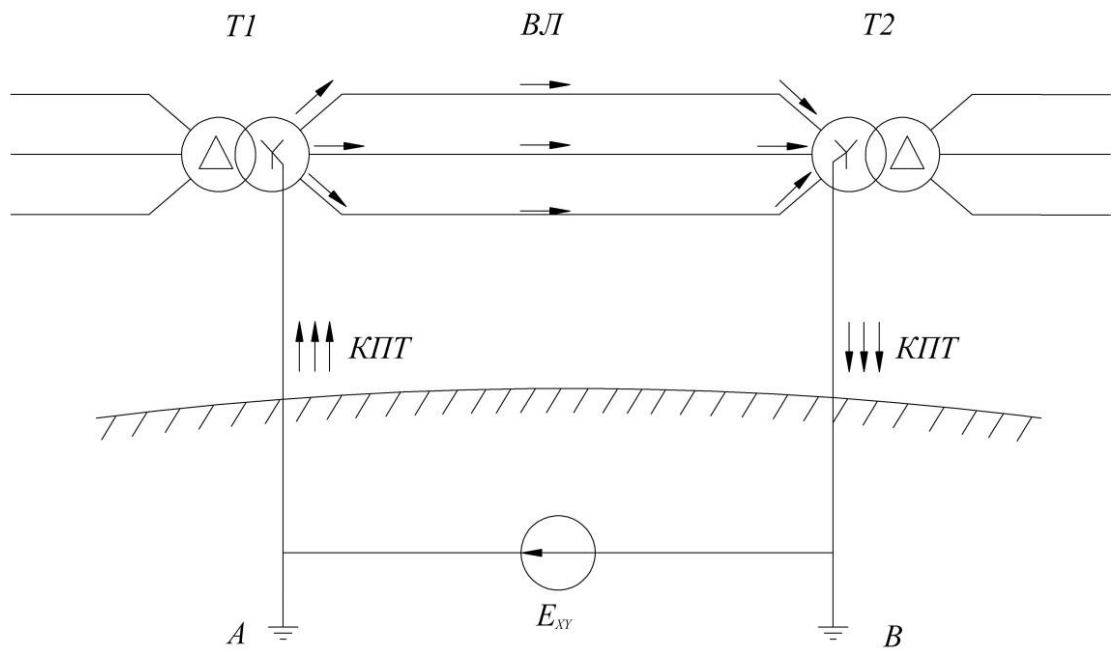


Рис. 1.4 Протекание КПТ по обмоткам высокого напряжения трансформаторов и высоковольтной линии электропередач СЭС

1.5 Выводы по 1 разделу

1. Рассмотрены основные причины возникновения нарушений в работе систем электроснабжения. Показано, что системные аварии могут являться следствием технических неисправностей, ошибок обслуживающего персонала, а также природных опасных явлений.

2. Показан более подробный анализ проблемы связанной с нарушением работы систем электроснабжения в периоды опасных природных явлений. Приведены исследования зарубежных ученых (Китай, Греция) об опасности ГМБ для работы систем электроснабжения (силовых трансформаторов особенно).

3. Рассмотрен процесс образования КПТ и влияние их на работу систем электроснабжения

2 Исследование влияния КПТ в зависимости от конструкции трехфазного силового трансформатора

2.1 Анализ конструкции трехфазного силового трансформатора

Для оценки воздействия геоиндуцированных токов на силовые трансформаторы систем электроснабжения было принято решение проанализировать конструкцию трехфазных силовых трансформаторов, так как это наиболее распространенный тип силовых высоковольтных трансформаторов систем электроснабжения

Существует два наиболее часто применяемых типа конструкций магнитопроводов силовых трансформаторов:

1. Стержневой
2. Броневой

Для анализа конструкции было выбрано два силовых трансформатора:

1. ТРДН – 63000/110/6
2. ТДЦ – 400000/220/20

Первым был рассмотрен силовой трансформатор ТРДН – 63000/110/6.

Силовой трехфазный двухобмоточный трансформатор (с масляным охлаждением), ориентирован на трансформацию энергии переменного тока одного класса напряжения (110 кВ) в класс напряжения 10 кВ или 6 кВ.

Условное обозначение силового трансформатора ТРДН:

Т – трехфазный силовой трансформатор

Р – обмотка низшего напряжения расщеплена (НН)

Д – охлаждение происходит за счет принудительной циркуляции потоков воздуха и с естественным охлаждением маслом

Н – регулирование напряжения под нагрузкой

Трансформатор имеет остов с трехстержневой шихтованной магнитной системой, собранной из листов холоднокатаной электротехнической стали. Обмотки из медного провода цилиндрические, размещены на стержнях остова концентрически. Линейные и нейтральный вводы высокого напряжения (ВН) снабжены трансформаторами тока. Бак трансформатора колокольного типа с нижним разъемом снабжается арматурой для заливки, отбора проб, слива и фильтрации масла, подключения системы охлаждения и вакуум-насоса.

Регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) осуществляется переключающим устройством в нейтрали обмотки ВН в пределах $\pm 9 \times 1,78\%$ номинального напряжения.

Основные технические характеристики силового трансформатора ТРДН – 63000/110/6 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики ТРДН 63000/110/6

Мощность	63000 кВА
Число фаз	3
Рабочая частота	50 Гц
Схема соединения	Ун/Д/Д-11-11
Рабочее напряжение:	
ВН	115000 В $\pm 9 \times 1,78\%$
НН	6300 – 6300 В
Мощность обмоток:	
ВН	63000 кВА
НН	31500 – 31500 кВА

Силовой трансформатор ТРДН – 63000/110/6 имеет магнитопровод стержневого типа представленного на рисунке 2.1.

Магнитопровод собран из листов холоднокатаной электротехнической стали марки 3407-0,3 (ГОСТ 21427.1 – 83). На рисунке 2.1 изображены средние длины магнитных линий, основные геометрические параметры

магнитопровода: диаметр стержня, высота окна, межосевые расстояния. Сечение стержня составляет - $2862,048 \text{ см}^2$, ярма – $2958,24 \text{ см}^2$.

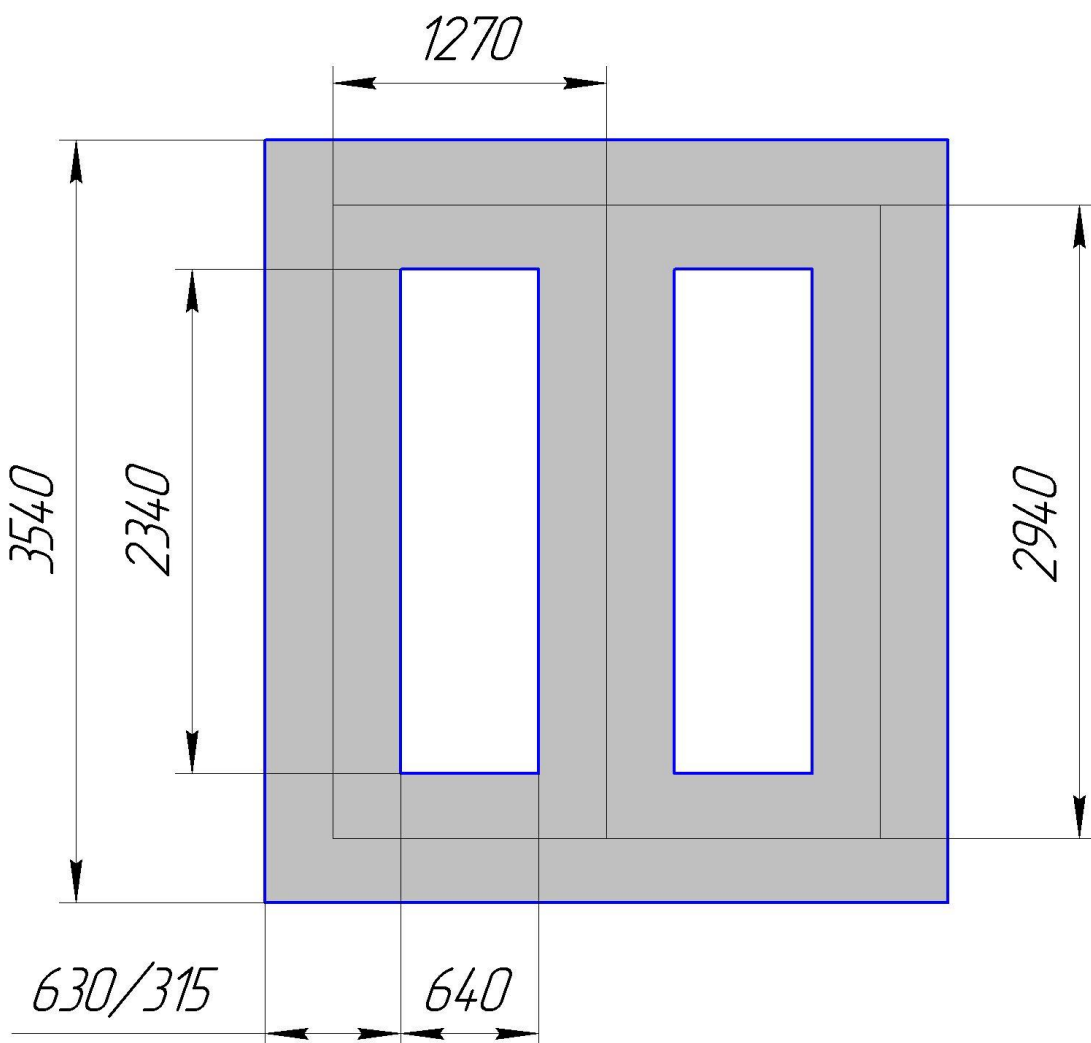


Рисунок 2.1 – Магнитопровод стержневого типа силового трансформатора ТРДН – 63000/110/6

Далее проведен анализ конструкции силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20.

Трансформатор типа ТДЦ-400000/220/20 масляный силовой трехфазный двухобмоточный с принудительной циркуляцией воздуха и масла, с ненаправленным потоком масла предназначен для работы в блоках электростанций.

Условное обозначение силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20:

Т – трансформатор трехфазный;

ДЦ – принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла;

400000 – номинальная мощность, кВ·А;

220 – класс напряжения обмотки ВН, кВ;

20 – класс напряжения обмотки НН, кВ.

Условия эксплуатации силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20: высота над уровнем моря не более 1000 м, температура окружающего воздуха от минус 45 до 40°С. Конструкция трансформатора в части требований безопасности должна соответствовать ГОСТ 12.2.007.2-75, трансформатор выпускается в соответствии с ГОСТ 17544-85.

Вывод линейных концов обмоток ВН производится с помощью маслonaполненных герметичных вводов класса напряжения 220 кВ усиленного или нормального исполнения. Вывод нейтрали наружу - с помощью маслonaполненного герметичного ввода класса напряжения 110 кВ усиленного или нормального исполнения. Отводы НН выполнены собственным обмоточным проводом и медными шинами. Вывод концов отводов наружу производится с помощью шести маслоподпорных вводов класса напряжения 20 кВ. Бак трансформатора прямоугольный колокольного типа с разъемом на уровне нижнего ярма. Трансформатор комплектуется следующей измерительной, контрольной и сигнальной аппаратурой: по два встроенных трансформатора тока с коэффициентами трансформации 2000-1500-1000-750/1 или 5 А на вводах 220 кВ. Трансформатор имеет масляное охлаждение с дутьем и принудительной циркуляцией воздуха и масла (вид охлаждения ДЦ). Для охлаждения используются восемь охлаждающих устройств с маслоохладителями.

Основные технические характеристики силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики ТДЦ 400000/220/20

Мощность	400 МВА
Число фаз	3
Рабочая частота	50 Гц
Схема соединения	Ун/Д-11
Рабочее напряжение:	
ВН	242000 В
НН	20000 В
Мощность обмоток:	
ВН/НН	400 МВА/400 МВА

Силовой трансформатор ТДЦ – 400000/220/20 имеет магнитопровод бронестержневого типа представленного на рисунке 2.2.

Магнитопровод собран из листов холоднокатаной электротехнической стали марки 3407-0,3 (ГОСТ 21427.1 – 83). На рисунке 2.2 изображены средние длины магнитных линий, основные геометрические параметры магнитопровода: диаметр стержня, высота окна, межосевые расстояния, которые сведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные геометрические параметры магнитопровода силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20

Диаметр стержня	1280 мм
Высота окна	2655 мм
Межосевые расстояния	М01 2120 мм М02 1420 мм
Сечение:	
стержня	10932,764 см ²
ярма	6277,038 см ²
	5568,278 см ²

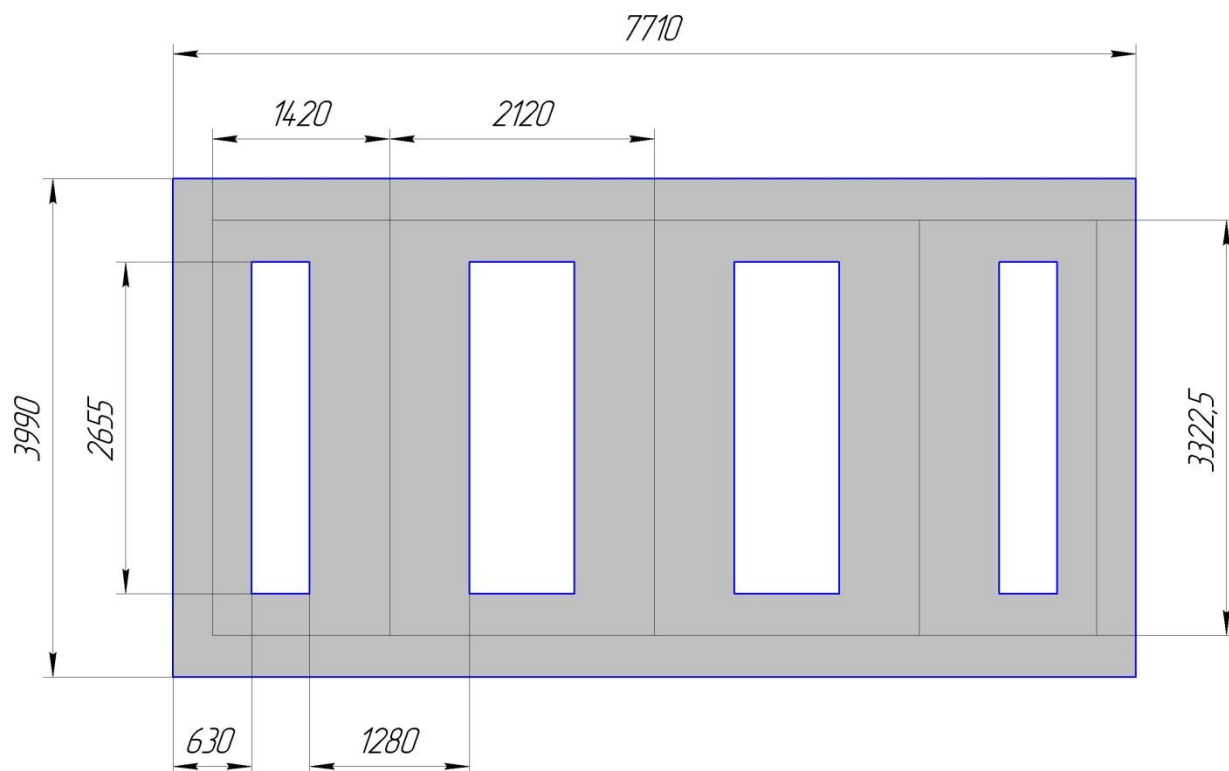


Рисунок 2.2 – Магнитопровод бронестержневого типа силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20.

2.2 Исследование влияния квазипостоянных токов на параметры ветви намагничивания силового трансформатора

Сначала необходимо провести анализ характеристики намагничивания электротехнической стали с учетом области технического насыщения. Магнитопроводы силовых трансформаторов ТРДН 63000/110/6 и ТДЦ 400000/220/20 изготовлены из холоднокатаной электротехнической стали марки, Э – 330.

Средняя плотность, содержание кремния и среднее удельное электрическое сопротивление стали указано в [11].

Э – электротехническая сталь

3 – группа стали по степени легирования кремнием

3 – гарантированные электромагнитные свойства

0 – холоднокатаная текстурированная сталь

Физико-механические свойства электротехнической стали зависят от содержания кремния и присутствия примесей.

Магнитные свойства электротехнической стали работающие в оборудовании на переменном токе при одинаковой толщине и структуре зависят от толщины листа стали и частоты перемагничивания. Оптимальное соотношение между частотой перемагничивания и толщиной стали приведено в [11].

Наилучшие магнитные свойства при частоте 50 Гц имеют стали в диапазоне 0,25 – 0,30 мм толщины, а не в получившей распространение стали толщиной 0,35 мм.

Указанная для трансформаторов индукция составляет:

1. ТРДН – 63000/110/6: в стержне – 1,6255 Тл, в ярме – 1,5726 Тл.
2. ТДЦ – 400000/220/20: в стержне – 1,648 Тл, в ярме – 1,582 Тл; 1,453 Тл.

Рекомендуемая индукция для холоднокатаной электротехнической стали Э – 330 в стержнях магнитной системы для силовых трансформаторов мощностью 160 кВА и более должна составлять (1,55 – 1,6) Тл, а для силовых трансформаторов мощностью более 100 МВА рекомендуемая индукция составляет до 1,7 Тл.

Характеристика намагничивания холоднокатаной электротехнической стали марки Э – 330 представлена на графике зависимости $B=f(H)$ магнитной индукции В от напряженности Н магнитного поля, на рисунке 2.3.

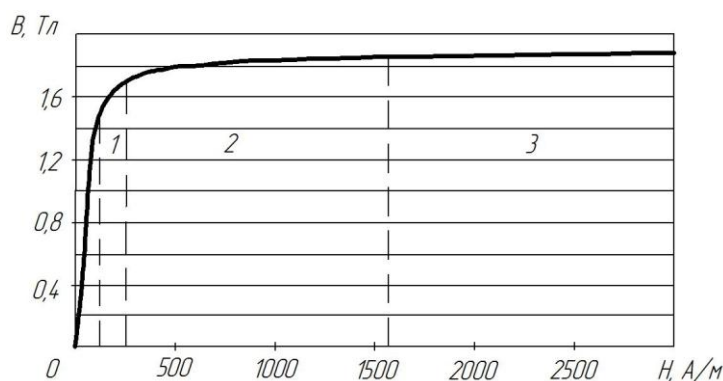


Рисунок 2.3 – Характеристика намагничивания холоднокатаной электротехнической стали марки Э – 330.

Характеристика намагничивания холоднокатаной электротехнической стали марки Э – 330 представлена тремя точками: 1 – рабочая область, 2 – намагничивание магнитопровода за счет сильного внешнего магнитного поля, 3 – область стадии технического насыщения магнитопровода. Указанные значения индукции в магнитной системе силовых трансформаторов, как видно из рисунка 2.3 находятся в первой области, так называемой рабочей области и соответствуют работе силового трансформатора при номинальном напряжении. Соответственно при увеличении напряжения до уровня $(1,1 \div 1,2) U_{ном}$, индукция в магнитной системе силового трансформатора будет пропорционально увеличиваться до 1,9 Тл и силовой трансформатор перейдет в область технического насыщения.

Для дальнейшей оценки влияния КПТ на насыщение магнитной системы силового трансформатора необходимо провести анализ воздействия КПТ на силовой трансформатор с стержневой конструкцией магнитопровода и на силовой трансформатор с бронестержневой конструкцией магнитопровода.

Анализ влияния КПТ на насыщение магнитной системы силового трансформатора стержневого типа проведем в координатах $\Psi=f(i_m)$.

В периоды ГМБ Мгновенные значения потокосцепления помимо гармонической составляющей, обусловленной синусоидальным напряжением, содержит постоянную составляющую $\Psi_{гит}$, обусловленную протеканием КПТ через заземленные обмотки ВН.

$$\Psi(t) = \Psi_m \cdot \cos \omega t + \Psi_{гит} \quad (2.1)$$

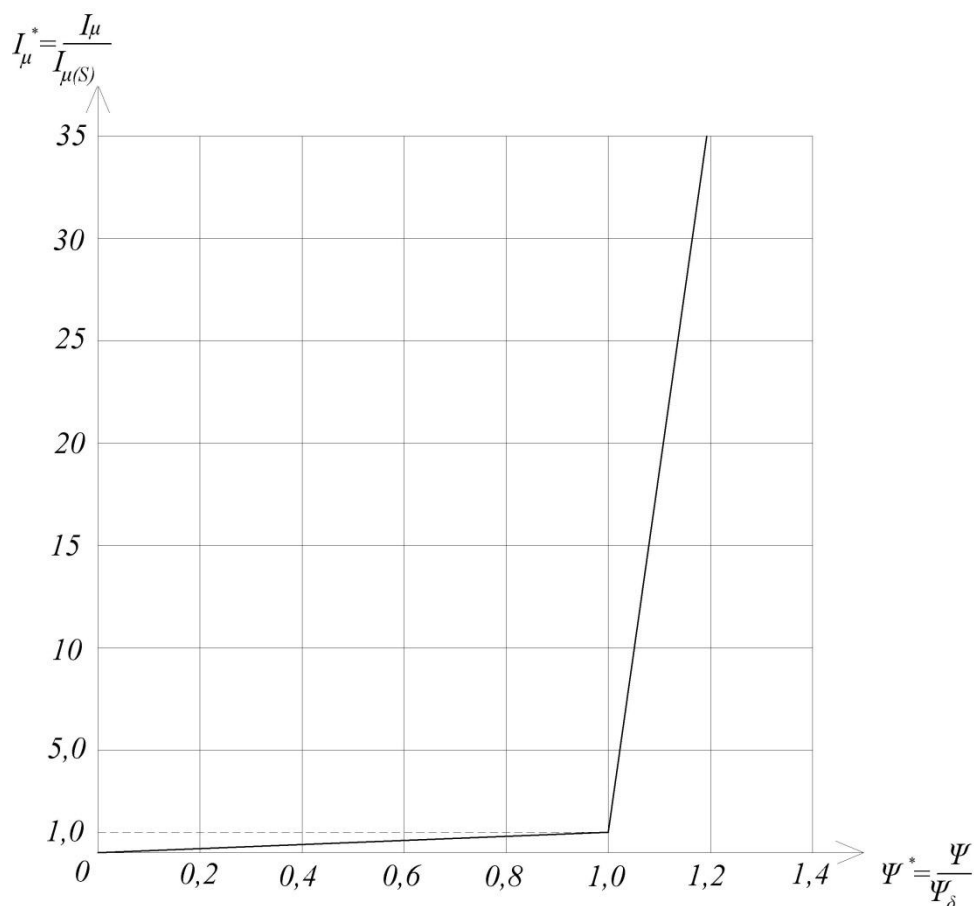


Рисунок 2.4 – Характеристика намагничивания силового трансформатора с магнитопроводом стержневого типа

Главным образом воздействие КПТ на силовой трансформатор исходит из пути протекания $\Phi_{\text{КПТ}}$, созданного протеканием КПТ по заземленным обмоткам высокого напряжения. Соответственно исходя из конструкции силового трансформатора с магнитопроводом стержневого типа следует, что магнитный поток от протекания КПТ, совпадает с магнитным поток нулевой последовательности силового трансформатора и замыкается главным образом в немагнитных средах с постоянной магнитной проницаемостью (масло, воздух, воздушные зазоры, бак и т.д.). Следовательно, можно считать, что индуктивность созданная протеканием КПТ по заземленным обмоткам высокого напряжения равняется постоянной величине, т.е. $L_{\text{гит}} = \text{const}$, так как данная величина не будет зависеть от величины КПТ.

Воздействие КПП на силовые трансформаторы с бронестержневой конструкцией магнитопровода выглядит иначе. При одинаковой величине КПП, его воздействие на силовой трансформатор с бронестержневой конструкцией магнитопровода будет значительно выше, чем на силовой трансформатора со стержневой конструкцией магнитопровода. Главным образом это обусловлено тем, что в данном случае магнитный поток $\Phi_{\text{КПП}}$ создаваемый протеканием КПП по заземленным обмоткам высокого напряжения будет совпадать с основным магнитным поток и будет замыкаться по крайним стержням.

Соответственно исходя из выше сказанного индуктивность ветви намагничивания силового трансформатора с бронестержневой конструкцией магнитопровода будет зависеть от величины протекаемого по заземленным обмоткам КПП.

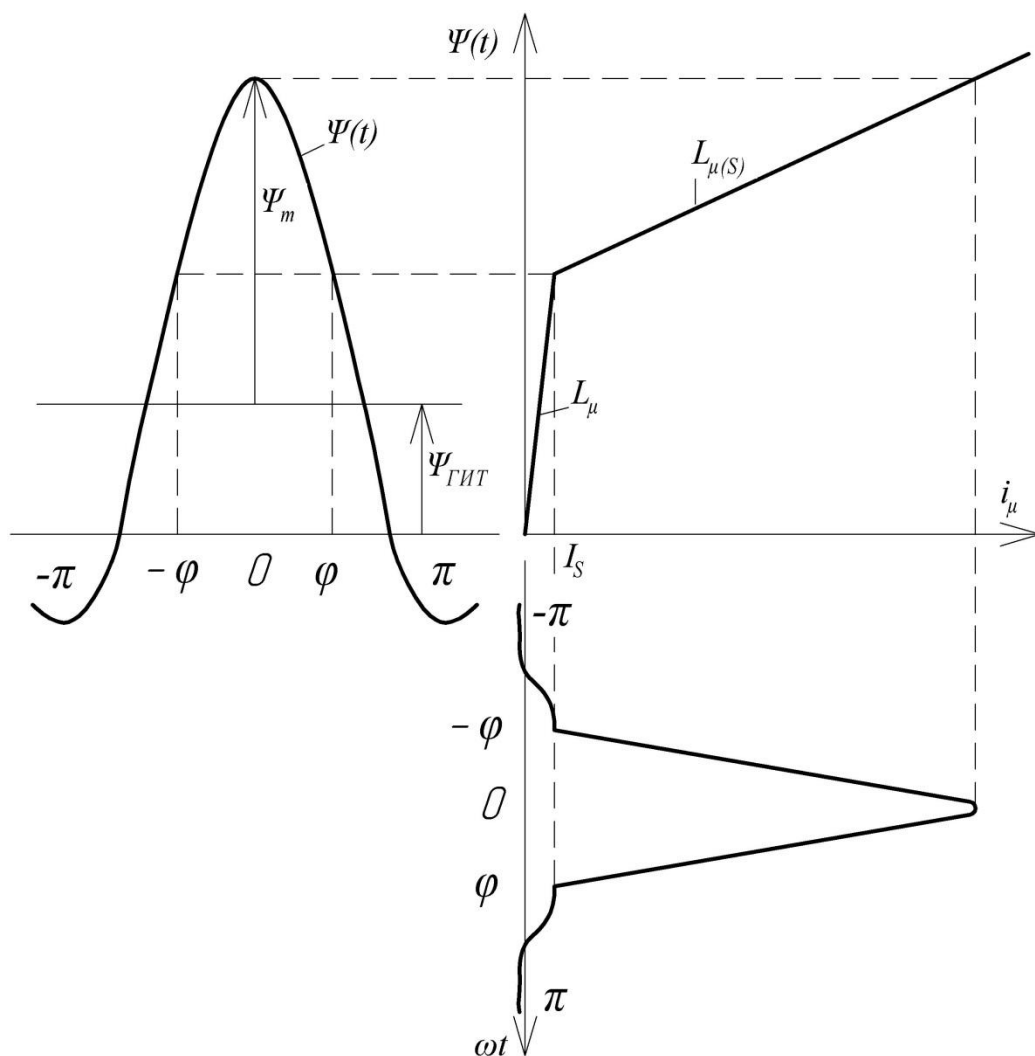


Рисунок 2.5 – Формирование несинусоидальной кривой намагничивающего тока для силового трансформатора с бронестрежневой конструкцией магнитопровода.

2.3 Выводы по 2 разделу

1. Исследованы особенности конструкции силовых трансформаторов с различными типами магнитопроводов. Анализ проведен на силовых трансформаторах ТРДН 63000/110/6 и ТДЦ 400000/220/20, со стержневой конструкцией магнитопровода и броневой соответственно.

2. Показано различие во влиянии протекающих по заземленным обмоткам высокого напряжения квазипостоянных токах в зависимости от типа конструкции магнитопровода силового трансформатора. При стержневом типе магнитопровода силового трансформатора величина КПТ не имеет особого значения, когда как при броневом типе магнитопровода, магнитный поток от протекания КПТ замыкается по боковым стержням и сильно влияет на работу. Индуктивность ветви намагничивания силового трансформатора с бронестержневой конструкцией магнитопровода будет зависеть от величины протекаемого по заземленным обмоткам КПТ.

3 Разработка расчетной модели силового трансформатора при воздействии КИТ

3.1 Разработка алгоритма определения параметров схемы замещения силового трансформатора при воздействии КИТ

В силу особенностей воздействия квазипостоянных токов на силовые трансформаторы систем электроснабжения, а также экономической составляющей – натурные испытания на силовых трансформаторах включенных в работу нецелесообразно. Поэтому для дальнейшего исследования воздействия квазипостоянных токов на силовые трансформаторы систем электроснабжения, необходимо воспользоваться возможностями физико-математического моделирования, в частности компьютерного моделирования.

Для дальнейшего составления компьютерной модели силового трансформатора систем электроснабжения необходимо определить алгоритм схемы замещения силового трансформатора при воздействии на него квазипостоянного тока.

Для начала следует привести существующие схемы замещения силовых трансформаторов и впоследствии определить, дополнительные параметры возникающие в связи с воздействием квазипостоянного тока на работу силовых трансформаторов.

Одним из основных методов изучения работы силового трансформатора является эквивалентная схема замещения, в которой магнитная связь между обмотками силового трансформатора заменяется эквивалентной электрической связью (так как $k=1$, то и $-E_1=E_2$), а параметры вторичной обмотки приводятся к напряжению первичной обмотки. Таким образом, получаем T-образную схему замещения силового трансформатора.

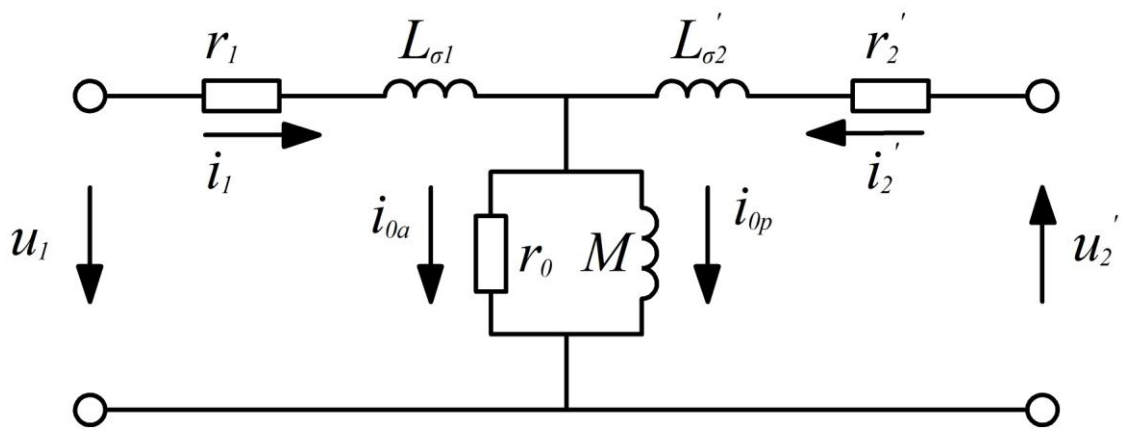


Рис. 3.1 – Схема замещения однофазного двухобмоточного СТ

Однофазный двухобмоточный силовой трансформатор можно описать математической моделью с помощью системы дифференциальных уравнений напряжений:

$$\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + k_{12} M \frac{di_{op}}{dt}; \\ -u_2 &= r_2' i_2' + L_{\sigma 2}' \frac{di_2'}{dt} + M \frac{di_{op}}{dt}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где – r_1 – активное сопротивление в первичной обмотке; $r_2' = k_{12}^2 * r_2$ – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки; $L_{\sigma 1}$ – индуктивность рассеяния первичной обмотки; $L_{\sigma 2}' = k_{12}^2 * L_{\sigma 2}$ – приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки; r_0 – активное сопротивление магнитных потерь; M – взаимная индуктивность ветви намагничивания; u_1 – мгновенное значение напряжения первичной обмотки; u_2' – мгновенное значение приведенного напряжения вторичной обмотки; $k_{12} = w_1/w_2$ – коэффициент трансформации; w_1 – число витков первичной обмотки; w_2 – число витков вторичной обмотки; i_1 – мгновенное значение тока первичной обмотки; i_2' – мгновенное значение приведенного тока вторичной обмотки; i_0 – ток холостого хода (намагничивающий ток).

Данная система дифференциальных уравнений (3.1) не учитывает насыщение магнитной системы силового трансформатора при одновременном намагничивании постоянным и переменным магнитными полями.

Известно, что зависимость средней магнитной проницаемости для переменного магнитного поля от величины напряженности постоянного магнитного поля имеет нелинейный характер. Так как ферромагнитный сердечник из электротехнической стали намагничивается одновременно переменным и постоянным магнитными полями, то рабочая точка на кривой намагничивания стали $\mathcal{E} - 303 \text{ В} = f(H)$, смещается в область насыщения.

Амплитуда магнитного потока переменного магнитного поля остается неизменной при разных режимах работы силового трансформатора, так как частота питающей сети f , питающее напряжение первичной обмотки U_m и количество витков обмотки высокого напряжения w_1 , остаются неизменными и находятся по формуле:

$$\Phi_m = \frac{U_m}{2\pi f * w_1} \quad (3.2)$$

Взаимная индуктивность ветви намагничивания силового трансформатора создает основной рабочий поток магнитного поля. Необходимо учитывать, что при протекании квазипостоянного тока по обмоткам высокого напряжения взаимная индуктивность становится нелинейной функцией и может быть определена по формуле:

$$M_{\text{КПТ}} = k \frac{w_1^2 * S_{\text{сер}}}{l_{\text{ср}}} \mu_0 * \mu_{\text{ср}}(H_{\text{КПТ}}) \quad (3.3)$$

где - $S_{\text{сер}}$ – площадь сечения стержня сердечника, $l_{\text{ср}}$ – длина средне магнитной линии магнитопровода, μ_0 – магнитная постоянная

Из выражения (3.3) следует, что величина взаимной индуктивности прямо пропорциональна средней магнитной проницаемости для переменного магнитного поля, то есть зависит от расположения рабочей точки на кривой намагничивания холоднокатаной электротехнической стали. Так как положение рабочей точки на кривой намагничивания определяется величиной квазипостоянного тока протекающего по заземленным обмоткам высокого напряжения силового трансформатора, создавая при этом постоянное магнитное поле

С учетом (3.3) формулу (3.1) можно преобразовать, тогда получим:

$$\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + k_{12} M_{\text{КПТ}} \frac{di_{0p}}{dt}; \\ -u_2 &= r_2' i_2' + L_{\sigma 2}' \frac{di_2'}{dt} + M_{\text{КПТ}} \frac{di_{0p}}{dt}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

Следовательно, схема замещения однофазного двухобмоточного силового трансформатора учитывающая нелинейность взаимной индуктивности ветви намагничивания при геомагнитных бурях, примет вид:

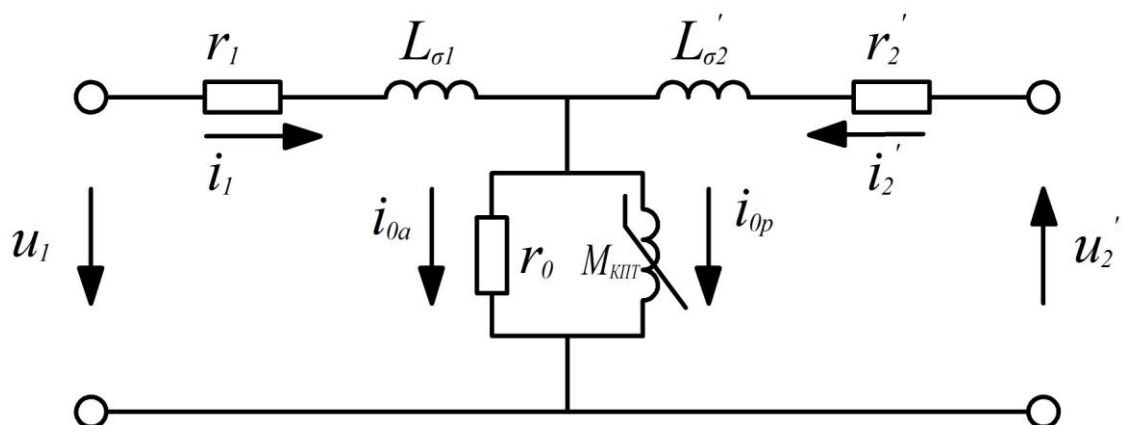


Рис. 3.2 – Т – образная схема замещения однофазного двухобмоточного силового трансформатора при протекании КПТ по обмотке высокого напряжения

3.2 Компьютерная модель работы силового трансформатора при протекании КПТ по обмоткам высокого напряжения

Для расчета режимов работы силовых трансформаторов при протекании квазипостоянных токов по заземленным обмоткам высокого напряжения могут использоваться различные программные продукты. В их числе такие среды моделирования, как: Mathcad, FEMM, PSCAD, Matlab и т.п. В данной работе, для моделирования работы силовых трансформаторов при протекании КПТ по обмоткам высокого напряжения использовалась среда моделирования Matlab пакет Simulink, так как данная программная среда обладает достаточной степенью адекватности встроенных в её библиотеку (Simulink и SymPowerSystems) моделей электротехнических устройств, а также ненужностью большого объема данных, так как в данной среде моделирования процесс построения модели описывается количественным характером, в графическом виде, а не качественно-логическим, что в свою очередь позволяет сделать модель более наглядной и простой для анализа и последующих внесений изменений. Еще одним важным критерием выбора в качестве среды компьютерного моделирования программы Matlab (пакета расширения Simulink), является то, что в данном программном продукте возможна установка управляемого источника напряжения. Данный признак является весомым, так как компьютерное моделирование воздействия квазипостоянных токов на работу силовых трансформаторов систем электроснабжения достигается именно установкой управляемого источника напряжения между глухозаземленными нейтралями обмоток высокого напряжения.

В новой версии программы Matlab 2015 стала доступна функция выбора конструкции магнитопровода моделируемого силового трансформатора. Возможен выбор трех доступных конструкций магнитопроводов силовых трансформаторов. В списке представлены магнитопровод броневого типа и магнитопровод стержневого типа. Для моделирования трехфазного силового

трансформатора использующего в качестве модели три однофазных силовых трансформатора, выбирается пункт «Three single-phase transformer». Данный тип моделирования трехфазного силового трансформатора используется при симуляции работы многомощных силовых трансформаторов в местных сетях (сотни мВт). Для моделирования трехфазного силового трансформатора с магнитопроводом стержневого типа выбирается пункт «Three-limb core». При моделировании данный тип магнитопровода представляет более точные результаты измерений при несимметричных коротких замыканиях и в линейных и нелинейных моделях (включая данные о насыщении). При несимметричных значениях напряжения магнитный поток нулевой последовательности замыкается не по магнитопроводу силового трансформатора, а по воздушным зазорам, маслу и баку силового трансформатора. Таким образом, индуктивность нулевой последовательности L_0 в таком типе магнитопровода обычно очень мала (за исключением обмотки соединенной D) от $0,5 < L_0 < 2$ о. е., тогда как в модели трехфазного силового трансформатора использующего для моделирования работы три однофазных трансформатора индуктивность нулевой последовательности составляет $L_0 > 100$ о. е. Такое низкое значение L_0 влияет на напряжения, токи и магнитный поток, приводя к дисбалансу во время расчета линейных операций и насыщения. Для моделирования трехфазного силового трансформатора с магнитопроводом броневого типа следует выбрать в выпадающем списке значение «Five-limb core». Силовые трансформаторы с магнитопроводом броневого типа используются очень редко. Данная конфигурация магнитопровода выбирается обычно для уменьшения высоты трансформатора, для улучшения характеристик транспортировки трансформатора. В отличие от трехфазного трансформатора стержневого типа, при несимметричных коротких замыканиях, магнитный поток в силовом трансформаторе с бронестержневым типом магнитопровода замыкается не по воздушным зазорам, баку и т.д., а по самому магнитопроводу, по его внешним ярам. Таким образом индуктивность

нулевой последовательности для силовых трансформаторов с данной конструкцией магнитопровода очень велика и составляет порядка $L_0 > 100$ о. е.

При создании модели определенного элемента СЭС могут использоваться, как встроенные (стандартные) библиотеки блоков (Simulink и SimPowerSystems), так и блоки созданные пользователем. Для расчета режимов СЭС при геомагнитных бурях вводятся следующие параметры: значение напряженности геоэлектрического поля E и продолжительность действия импульса геоэлектрического поля.

Перед началом расчета режимов работы СЭС происходит инициализация созданной модели. Для моделирования нелинейных SimPowerSystems-блоков используются Simulink-модели из библиотеки powerlib_models или модели разработанные самим пользователем. Нелинейные Simulink-модели соединяются с линейной частью схемы с помощью входных и выходных переменных. Нелинейные модели включаются в цепи обратных связей линейной части Simulink-модели.

Для расчета модели СЭС с установившегося режима предварительно необходимо провести инициализацию модели и расчет параметров установившегося режима электрических машин. Данную инициализацию следует провести инструментом Machine Initialization блока Powergui.

Для выполнения инициализации необходимо ввести исходные данные в правой части окна ввода параметров (рис. 3.3).

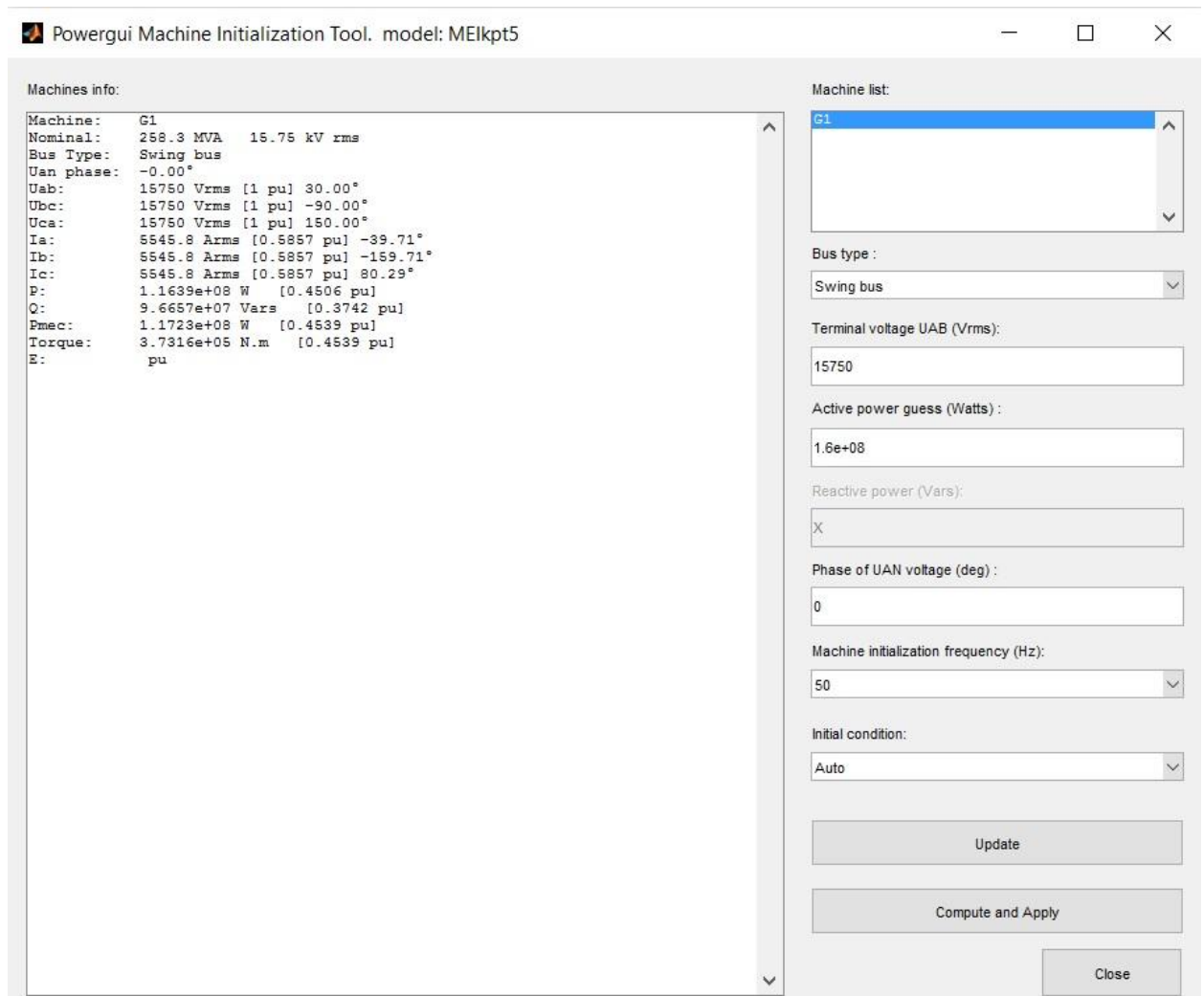


Рис. 3.3 – Окно ввода начальных параметров инструмента «Machine Initialization»

В расчетах электрических режимов как правило применяют Г-образную схему замещения (рисунок 3.4), которая позволяет вести расчет режима в именованных единицах и получать натуральные значения напряжений в узлах и токов ветвей на различных ступенях трансформации сети.

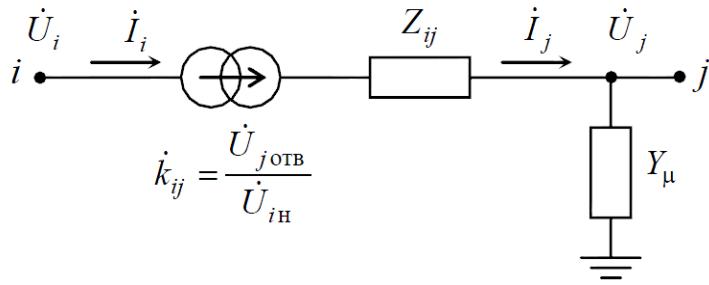


Рисунок 3.4 – Г-образная схема замещения трансформаторных ветвей

Параметры Г-схемы определяются по каталожным данным трансформаторов. Активная и реактивная проводимости ветви намагничивания $Y_\mu = g_\mu + jb_\mu$ учитывают потери холостого хода ΔP_{xx} и ток намагничивания I_{xx} и вычисляются по формулам:

$$g_\mu = \frac{\Delta P_{xx}}{U_{BHн}^2}, \quad (3.5)$$

$$b_\mu = \sqrt{y_\mu^2 - g_\mu^2}, \quad (3.6)$$

$$y_\mu = \frac{I_{xx}}{100} \cdot \frac{S_H}{U_{BHн}^2}. \quad (3.7)$$

Активное и индуктивное сопротивления продольной ветви $Z_{ij} = (r + jx)_{ij}$ приведенные к стороне высшего напряжения (ВН), вычисляются по формулам:

$$r_{ij} = \frac{\Delta P_{кз} U_{BHн}^2}{S_H^2}, \quad (3.8)$$

$$x_{ij} = \sqrt{z_{ij}^2 - r_{ij}^2}, \quad (3.9)$$

$$z_{ij} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{омε}^2}{S_H}, \quad (3.10)$$

$$U_{омε} = U_{BHн} \left(1 \pm n_{омε} \frac{\Delta U_{омε}}{100} \right). \quad (3.11)$$

где $\Delta P_{кз}$ – потери короткого замыкания,

$U_{к}$ – напряжение короткого замыкания для выбранной отпайки с напряжением $U_{отв}$, если известны значения на различных отпайках, в противном случае используется значение для основного (номинального) вывода,

$n_{отв}$ – номер отпайки РПН/ПБВ, отсчитываемый от основного вывода, и степень регулирования напряжения.

Действительный коэффициент трансформации равен

$$k_{ij} = \frac{U_{отв}}{U_{ННн}}. \quad (3.12)$$

Для n -обмоточных трансформаторов ($n \geq 3$) применяются схемы замещения в виде n -лучевой звезды. Для таких трансформаторов после расчета по каталожным данным параметров n -лучевой звезды каждый луч между фиктивным узлом схемы замещения и узлами различных ступеней напряжения, кроме луча к узлу высшего напряжения, представляется Г- схемой.

Рассмотренные ранее силовые трансформаторы ТРДН – 63000/110/6 и ТДЦ – 400000/220/20 являются трехфазными двухобмоточными. Трехфазные двухобмоточные силовые трансформаторы моделируются на основе Т – образной схемы замещения. В данную Т – образную схему вносятся соответствующие изменения в связи с тем, что по обмоткам высокого напряжения, в период ГМБ, протекает квазипостоянный ток. В Т – образно схеме замещения представленной на рисунке 3.5, учитывается нелинейность взаимной индуктивности ветви намагничивания моделируемого силового трансформатора.

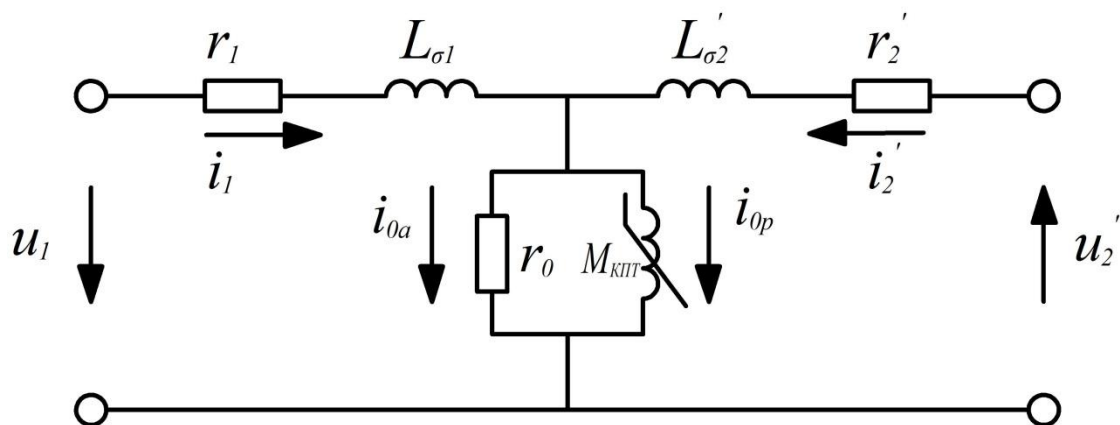


Рис. 3.5 - Т – образная схема замещения однофазного двухобмоточного силового трансформатора.

Разработана компьютерная модель системы электроснабжения в среде Matlab в пакете Simulink, которая позволяет рассчитывать режимы СЭС при геомагнитных бурях при известных параметрах геоэлектрического поля. Данная модель представлена на рисунке 3.6.

Компьютерная модель системы электроснабжения при протекании по ней квазипостоянного тока в периоды геомагнитных бурь состоит из десяти основных элементов. Задействованные в модели элементы находятся в стандартной библиотеке Matlab Simulink – SymPowerSystems. Модель состоит из следующих блоков: генератора, нагрузки на шинах генератора, повышающего силового трансформатора с глухозаземленной обмоткой высокого напряжения, модели линии электропередачи, управляемого источника напряжения включенного между заземлителями силовых трансформаторов подстанций (для имитации воздействия ГМБ на работу СЭС), понижающего трансформатора с глухозаземленной обмоткой высокого напряжения, нагрузки на низкой стороне и различных блоков измерительной, регулирующей и записывающей аппаратуры.

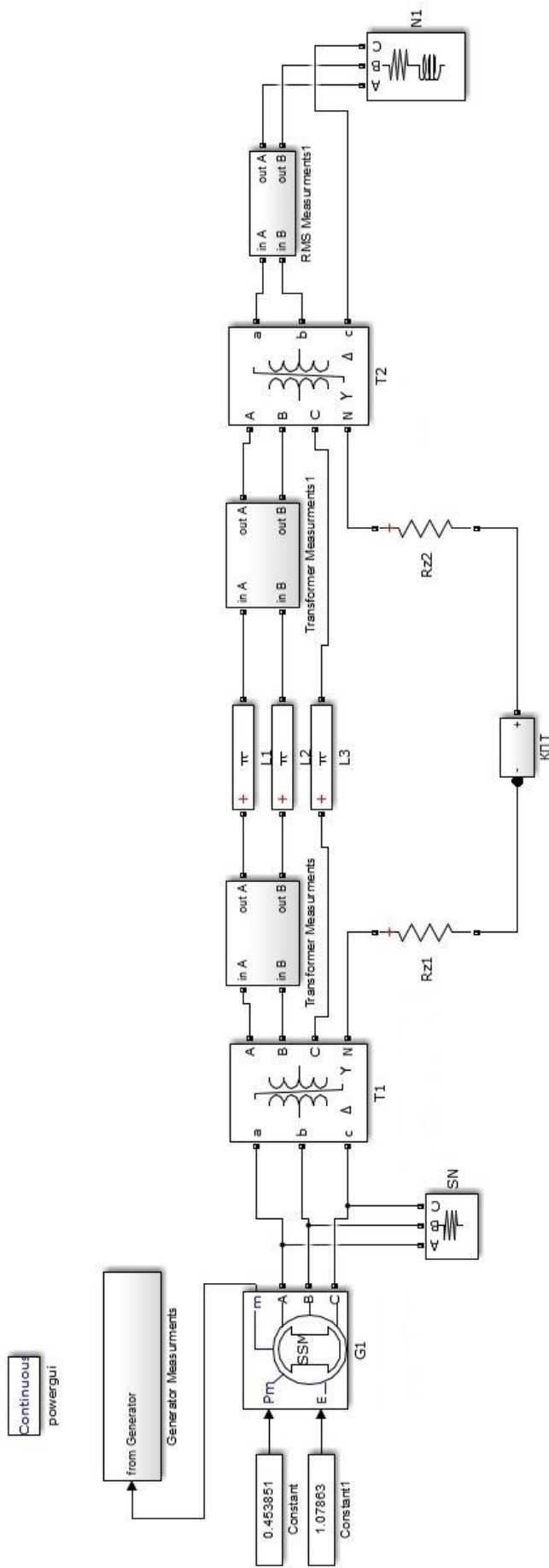


Рис. 3.6 – Компьютерная модель системы электроснабжения при воздействии КЛТ на СТ

Турбогенератор серии ТВВ предназначен для сопряжения с паровой турбиной и установкой на ТЭС и АЭС. Турбогенератор ТВВ имеет водородно-водяное охлаждение. Обмотки статора турбогенератора ТВВ охлаждаются дистиллированной водой, обмотки ротора форсированно охлаждаются водородом. Сердечник статора и внешняя поверхность ротора, также охлаждаются водородом. Данный турбогенератор серии ТВВ имеет мощность порядка 220 МВт на 3000 об/мин. Перечислим основные технические характеристики турбогенератора серии ТВВ: КПД составляет 98,6 %, напряжение 15,75 кВ, частота вращения 3000 об/мин и общий вес 220 тонн.

Компьютерное моделирование турбогенератора производилось блоком из стандартной библиотеки SymPowerSystems, пиктограмма которого представлена на рисунке 3.7. Данный блок представляет собой упрощенную модель синхронной машины. В блоке учитываются оба параметра упрощенной модели синхронной машины – электрические и механические характеристики. Электрическая система каждой фазы турбогенератора состоит из источника напряжения соединенным последовательно с RL полным сопротивлением, которое включает в себя также и внутреннее полное сопротивление генератора. Значение активного сопротивления может равняться нулю, но значение индуктивного должно быть положительным.

Механическая характеристика блока упрощенной модели синхронной машины описывается следующим образом:

$$\Delta\omega t = \frac{1}{2H} \int_0^t Tm - Te dt - Kd\Delta\omega t \quad (3.13)$$

$$\omega t = \Delta\omega t + \omega_0 \quad (3.14)$$

где

$\Delta\omega$ – изменение частоты вращения относительно скорости работы

H – постоянная составляющая инерции

Tm – механический момент

Te – электромагнитный момент

Kd – коэффициент затухания представленный демпферными обмотками

ωt – механическая скорость ротора

ω_0 – скорость работы (в о.е.)

Хотя параметры могут задаваться, как в единицах системы СИ, так и в относительных единицах в диалоговом окне, все же внутренние расчеты производятся в относительных единицах. Модель вычисляет отклонение по отношению к скорости работы, то есть учитывается не абсолютная скорость сама по себе.

Коэффициент затухания Kd симулирует эффект демпферных обмоток, обычно используемых в синхронных машинах. Когда электрическая машина подключена к источнику бесконечной мощности (с нулевым импедансом), изменение мощности угла дельта δ в результате изменения механической мощности P_m может быть аппроксимировано следующей передаточной функцией второго порядка:

$$\frac{\delta}{P_m} = \frac{\omega_s \ 2H}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

где

δ – угол дельта, угол между приложенным ЭДС и напряжением на клеммах, в радианах

P_m – механическая мощность в о.е.

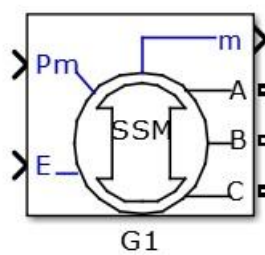
ω_n – частота электромеханических колебаний

ζ – коэффициент демпфирования

ω_s – электрическая частота рад/с

P_m – максимальная мощность в о.е. передаваемая через реактивное сопротивление X на клеммах V_t и внутреннем ЭДС E .

H – постоянная инерции



TBB-220/15.75

Рис. 3.7 – Пиктограмма блока турбогенератора TBB 220/15.75

В блоке модели турбогенератора TBB – 220/15.75 задаются следующие параметры:

1) Вкладка «Конфигурация»

a. Connection type. Способ соединения обмоток генератора. В выпадающем списке можно выбрать два типа соединения обмоток генератора – трехпроводное соединение звездой и четырехпроводное соединение звездой

b. Mechanical input. Присутствует возможность выбора моделирования механического воздействия электрического генератора.

2) Вкладка «Параметры»

a. В данной области происходит ввод значений таких параметров, как: номинальная мощность (ВА), линейное напряжение (В), частота (Гц).

b. Internal impedance. Данная строка позволяет ввести значения полного внутреннего сопротивления R и X (о.е.).

c. Initial conditions. В данной области задаются начальные условия работы генератора.

Окно задания параметров модели упрощенной синхронной машины после приведено на рисунке 3.8.

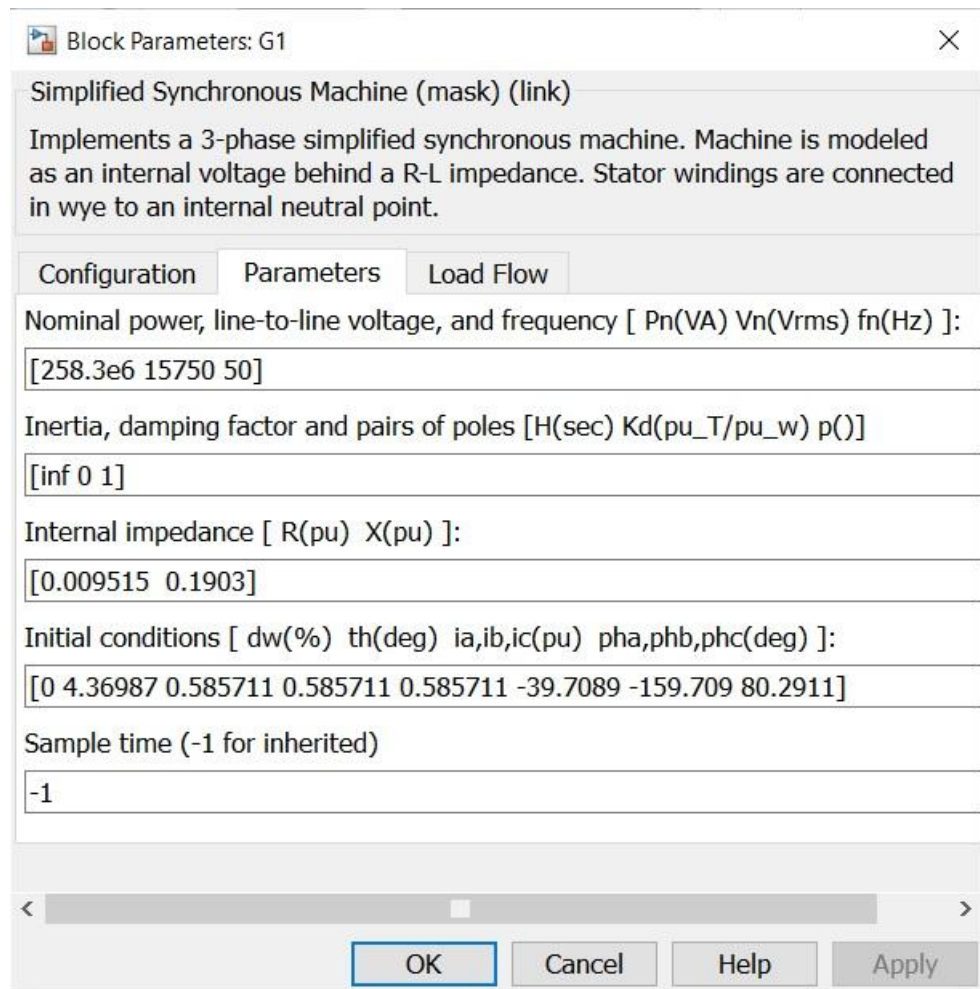


Рисунок 3.8 – Окно задания параметров модели упрощенной синхронной машины

Нагрузка на шинах турбогенератора моделируется блоком из встроенной библиотеки Simulink. Блок нагрузки является трехфазной RLC цепью с последовательным соединением и представляет собой сбалансированную трехфазную нагрузку, реализуемую за счет комбинации из RLC элементов. При заданной в параметрах модели частоте, нагрузка обладает постоянным полным сопротивлением. Расходуемые активная и реактивная мощности в нагрузке, пропорциональны квадрату приложенного к нагрузке напряжения. В пиктограмме блока отображаются только значения которых не равны нулю. Пиктограмма данного блока представлена на рисунке 3.9 и имеет следующие изменяемые пользователем характеристики:

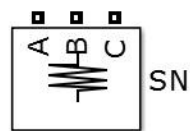


Рис. 3.9 – Пиктограмма блока трехфазной нагрузки на шинах турбогенератора

1) Вкладка «Parameters»

а. В данной области представляется возможным выбрать тип соединения фаз нагрузки. Способы соединения представлены четырьмя видами: Y с глухозаземленной нейтралью, Y с изолированной, Y с эффективно-заземленной нейтралью и соединением в треугольник. При изменении данного параметра пиктограмма нагрузки соответствующе меняется.

б. Номинальное межфазное напряжение в Вольтах.

в. Номинальная частота в Гц.

г. Активная мощность потребляемая трехфазной нагрузкой в Вт.

д. Индуктивно-реактивная мощность потребляемая трехфазной нагрузкой.

е. Емкостная реактивная составляющая потребляемая трехфазной нагрузкой.

ж. Параметры измерений в блоке нагрузки представляют собой выпадающий список. При выборе параметра «Branch voltages» напряжение будет измеряться на каждой фазе модели блока трехфазной нагрузки. Для соединения звездой напряжения будут измеряться между фазой и землей или между фазой и нейтралью. При соединении фаз в треугольник будут измеряться междуфазные напряжения. При выборе параметра «Branch currents» будут измеряться токи

(сумма R , L , C токов) протекающих через каждую фазу трехфазной нагрузки. При соединении фаз треугольником измеряемые токи будут представлять собой токи в каждой ветви треугольника. При выборе параметра «Branch voltages and currents» соответственно будут измеряться три значения напряжения и три значения тока в трехфазной нагрузке. Для более удобного отображения измеряемых параметров в созданную модель необходимо поставить мультиметр, который будет отображать выбранные измеряемые параметры в течение процесса моделирования.

2) Вкладка «Load flow»

Параметры данной области используются только для инициализации модели блоком Powergui. Задаваемые характеристики не имеют никакого влияния на блок нагрузки в модели и также не влияют на производительность.

Линия электропередачи моделируется встроенным в библиотеку Simulink блоком. Пиктограмма блока линии электропередач представлена на рисунке 3.10. Данный блок реализует однофазную линию электропередачи с параметрами сосредоточенными в П-образных секциях. Для линии электропередачи такие параметры, как сопротивление, индуктивность, емкость равномерно распределены по периметру всей длины линии. Аппроксимированная модель распределенных параметров передачи реализуется путем каскадного подключения идентичных П-образных секций, включающих в себя емкость, сопротивление и индуктивность. В отличие от другого блока присутствующего в библиотеке элементов и имитирующего работу линии электропередач, который имеет бесконечное число состояний, линейная модель П-образной схемы имеет конечное число состояний, которые и позволяют вычислить линейную модель пространства состояний. Количество П-образных секций, которые будут использоваться в модели зависит от заданной рабочей частоты.

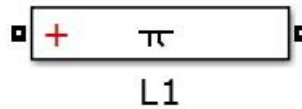


Рис. 3.10 – Пиктограмма блока модели линии электропередачи

В математической модели линии электропередачи считается, что активное сопротивление, индуктивность и емкость равномерно распределены вдоль линии. Приближенная модель высоковольтной воздушной линии может содержать от одной до нескольких П-образных идентичных секций с сосредоточенными параметрами (рисунок 3.11). Кабельные линии электропередачи также можно представить П-образной схемой замещения.

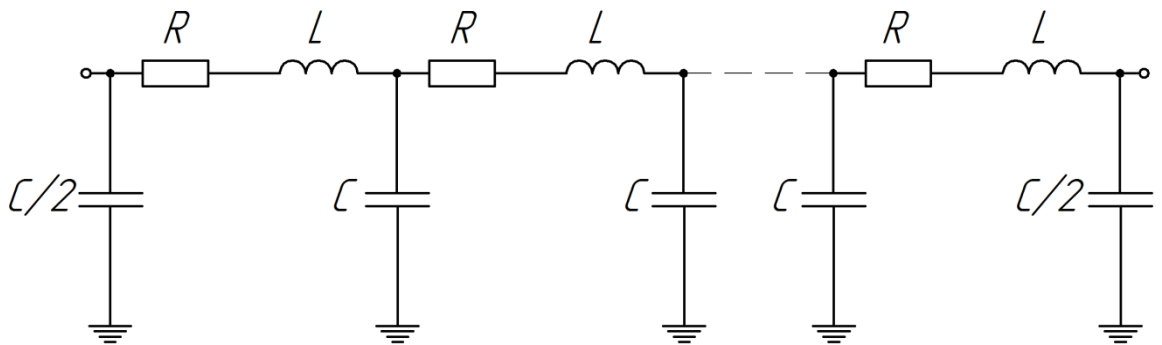


Рисунок 3.11 – Цепочечная модель ЛЭП для одной фазы

Число секций зависит от частотного диапазона, который необходимо охватить при моделировании СЭС. Приблизительно число секций можно определить из выражения:

$$f_{\max} = \frac{Nv}{8l}, \quad (3.15)$$

где f_{\max} – максимальная частота;

$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – скорость распространения электрического поля;

N – число секций в цепочечной модели.

В данном блоке возможно задание следующих характеристик:

1) Частота используемая для RLC. Частота f для которой на единицу длины рассчитываются параметры RLC. Гиперболическая поправка применяемая для RLC П-образных секций использует именно эту заданную частоту.

2) Сопротивление. Активное сопротивление на единицу длины. Измеряется в Ом/км.

3) Индуктивность. Индуктивность на единицу длины. Измеряется в Гн/км. Данный параметр не может равняться нулю, так как это привело бы к недопустимости вычисления скорости распространения электрической энергии.

4) Емкость. Емкость на единицу длины. Измеряется в Ф/км. Данный параметр также не может быть равен нулю, иначе это привело бы к недопустимости вычисления скорости распространения.

5) Длина. Длина модели линии электропередачи в км.

6) Количество П-образных секций модели линии электропередачи. Минимально допустимое значения для данного параметра может равняться единице.

7) Измерения. Если выбрать параметр входные и выходные напряжения, то на блок измерений будут отсылаться данные о напряжениях на входном и выходном портах модели линии электропередачи.

При выборе пункта входные и выходные токи, на блок измерений будут отправляться данные о токах на входном и выходном портах модели линии электропередач.

Параметр «Все напряжения и токи П-образных секций» на блок измерений будут подаваться токи и напряжения на

каждой П-образной секции данной модели линии электропередачи.

Трехфазные двухобмоточные силовые трансформаторы моделируются блоком Three-Phase Transformer (Two Windings), пиктограмма которого представлена на рисунке 3.12

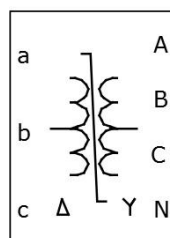


Рис. 3.12 – Пиктограмма блока трехфазного двухобмоточного силового трансформатора

Окно задания характеристик моделируемого силового трансформатора представлено на рисунке 3.13 и представляет собой функциональное программное окно с тремя вкладками, в которых можно задавать следующие параметры:

- 1) Вкладка «Configuration»
 - a. Winding 1 connection. Способ соединения первичной обмотки, который можно выбрать из выпадающего списка. В выпадающем списке представлены различные соединения обмоток: Y, Yn, Yg, D1, D11.
 - b. Winding 2 connection. Способ соединения вторичной обмотки.
 - c. Saturable core. При активации данного параметра, при расчете моделируемый трехфазный силовой трансформатор будет учитывать насыщение магнитопровода.
 - d. Simulate hysteresis. При активации пункта «Saturable core» появится данный пункт, который позволяет

учитывать характеристики насыщения силового трансформатора, такие как петля гистерезиса.

e. Hysteresis mat file. Данный пункт активен, при активации пункта «Simulate hysteresis» и позволяет загружать описание кривой гистерезиса в виде ее математического описания с расширением .mat.

f.Specify initial fluxes. Пункт также доступен при активации параметра «Saturable core». Если данный параметр активирован, то возможно задать характеристики начальных значений магнитного потока.

g. Measurements. Данный параметр позволяет производить различные измерения в модели силового трансформатора и записывать их в блок «Multimeter».

2) Вкладка «Parameters»

a. Units. Позволяет производить выбор используемых единиц измерения между «SI» и «pu».

b. Nominal power and frequency. Номинальные мощность и частота трансформатора в ВА и Гц соответственно.

c. Winding 1 parameters. Параметры первичной обмотки. Напряжение V_{rms} в вольтах, активное сопротивление $R1$ в о.е. и индуктивное сопротивление $L1$ в о.е..

d. Winding 2 parameters. Параметры первичной обмотки. Напряжение V_{rms} в вольтах, активное сопротивление $R2$ в о.е. и индуктивное сопротивление $L2$ в о.е..

e. Magnetization resistance. Активное сопротивление ветви намагничивания R_m в о.е..

f.Magnetization inductance. Индуктивное сопротивление ветви намагничивания силового трансформатора L_m , в о.е., активируемое для силовых трансформаторов без насыщения.

g. Saturation characteristic. Данный параметр возможно активировать, только если активен параметр насыщающегося магнитопровода в конфигурационной таблице параметров. Представляет собой характеристики насыщения для трансформаторов с насыщающимся магнитопроводом. Включает в себя такие параметры, как ток и магнитный поток (в о.е.), начальное значение составляет (0,0).

h. Initial fluxes. В данной области указываются значения начального магнитного потока для каждой фазы силового трансформатора. Данный параметр активен только если заданы параметры начального магнитного потока и выбрана опция насыщающегося магнитопровода трансформатора в конфигурационной таблице. Если значения начального магнитного потока не выбраны при старте моделирования, то программа автоматически задаст условия для устойчивой работы трансформатора. Рассчитанные значения сохраняются в параметрах «Initial fluxes» и переписываются при каждом новом значении.

3) Вкладка «Advanced»

a. Break Algebraic loop in discrete saturation mode. При использовании блока силового трансформатора в дискретной системе, создается так называемая «алгебраическая петля». Данная алгебраическая петля необходима для точного решения поставленной, при моделировании, задачи, что в свою очередь приводит также к увеличению времени необходимого для расчета модели. Чтобы процесс моделирования протекал более быстрее, в некоторых случаях, можно деактивировать алгебраическую петлю. Для этого нужно активировать параметр «Break Algebraic loop» в дискретной модели насыщения трансформатора.

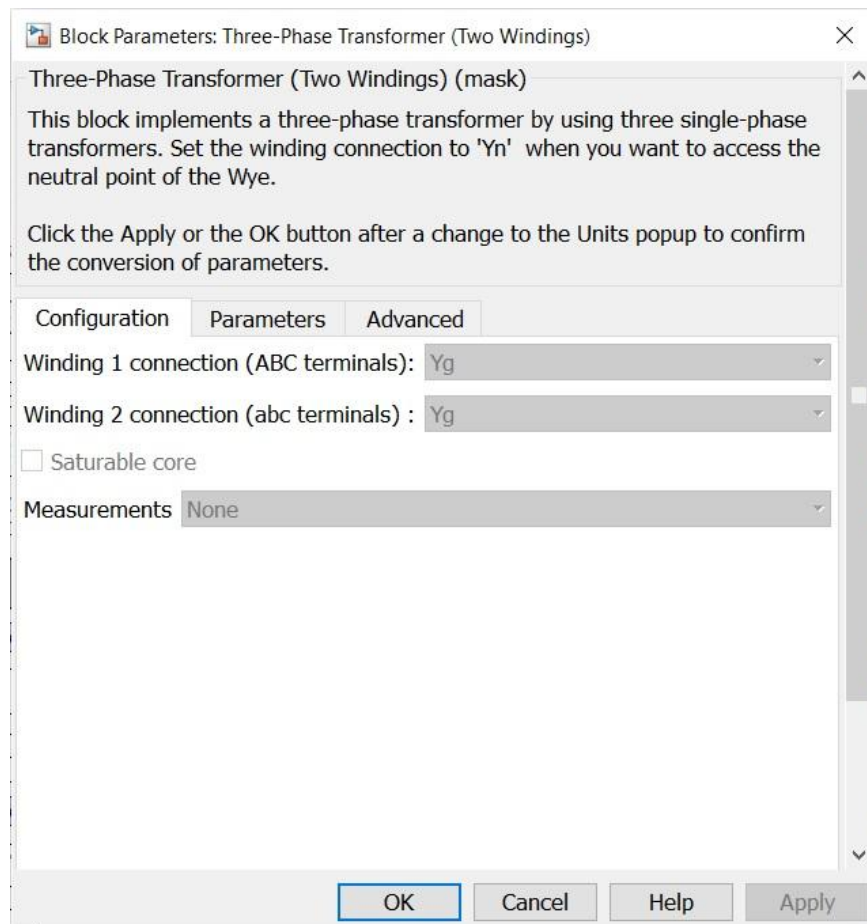


Рис. 3.13 – Окно задания характеристик моделируемого силового трансформатора в программной среде Matlab Simulink

Блок «КПТ» выполнен в виде маски подсистемы. Внутри подсистемы с помощью определенного алгоритма задаются характеристики напряженности геоэлектрического поля, длина линии и проводятся необходимые измерения. Моделирование воздействия квазипостоянного тока на работу силового трансформатора системы электроснабжения происходит главным образом за счет блока «Управляемый источник напряжения». Пиктограмма блока «Управляемый источник тока» представлена на рисунке 3.14.

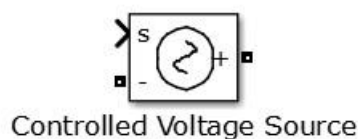


Рис. 3.14 – Пиктограмма блока управляемого источника напряжения

Управляемый источник тока в Simulink конвертирует входной сигнал в эквивалентный источник напряжения. Сгенерированное напряжения управляется входным сигналом на блок. Можно инициализировать управляемый источник напряжения и тогда представится возможным задание определенных значений переменного или постоянного напряжения. Чтобы начать моделирование в Simulink в стационарном режиме, то к входу должен быть подключен источник синусоидального или постоянного напряжения, соответствующего начальным значениям.

При использовании управляемого источника напряжения входной сигнал Simulink должен быть комплексным значением, иначе библиотека SimPowerSystems не сможет автоматически преобразовать входной сигнал из временной области значений в комплексное значение.

В управляемом источнике тока задаются следующие характеристики модели:

- 1) При активации параметра инициализации будут доступны следующие функции управляемого источника напряжения: начальное напряжение, начальный фазовый угол и начальная частота.
- 2) Тип источника. Данный параметр не доступен если инициализация не активирована. Параметр представляет возможность выбора типа управляемого источника напряжения между управляемым источником переменного напряжения и управляемым источником постоянного напряжения.
- 3) Начальное напряжение модели управляемого источника напряжения с включенным параметром инициализации.
- 4) Начальный фазовый угол. Соответственно параметр не может быть определен для управляемого источника постоянного напряжения. Значения задаются в градусах.

5) Начальная частота управляемого источника напряжения. Данный параметр, в свою очередь не может быть задан для управляемого источника постоянного напряжения.

б) Измерения. При выборе пункта «Напряжение» и выпадающего списка будет измеряться напряжение на выводах управляемого источника напряжения.

В модели присутствуют блоки выполненные в качестве подсистем для более удобной работы. В основном это подсистемы предназначенные для измерений необходимых результатов моделирования, а также для исследования воздействия квазипостоянного тока на работу силового трансформатора. На рисунке 3.15 представлена подсистема для измерений в турбогенераторе ТВВ 220/15.75.

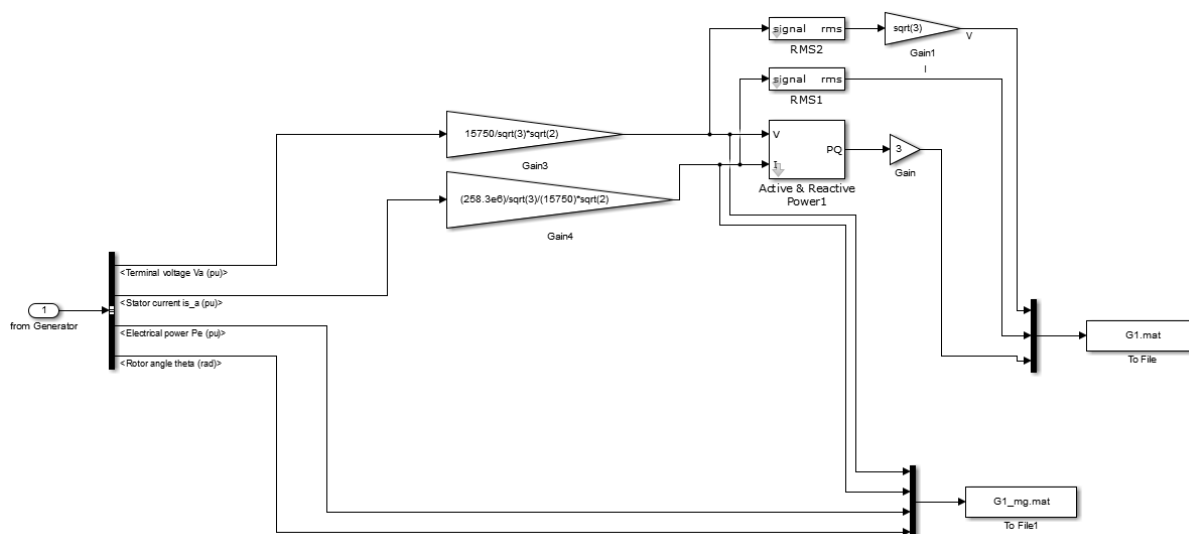


Рис. 3.15 – Вид подсистемы предназначенной для измерений параметров генератора G1

В подсистеме «Generator measurements» измеряется выдаваемая генератором мощность, напряжение и ток, как в действующих, так и в мгновенных значениях. В процессе расчета модели данные записываются в файлы с расширением .mat которые Matlab преобразует в матричные массивы

данных и затем с помощью определенного алгоритма преобразует в необходимый для пользователя вид. В данном случае значения напряжения на клеммах генератора, токов обмотки статора и электрической мощности записываются в о.е., а угол θ в рад. Мгновенные значения записываются в файл под названием G1_mg.mat, действующие же значения записываются в файл с расширением G1.mat и потом преобразуется в другой модели в зависимости $x = f(t)$, где x – входные данные из .mat файлов.

В подсистеме «Transformer measurements» представлена модель для измерений на повышающем силовом трансформаторе T1. В данной модели проводятся измерения значений напряжения на высокой стороне силового трансформатора V_1 , тока вторичной обмотки I_1 и тока намагничивания $I_{\mu 1}$, как в мгновенных так и действующих значениях. Вид подсистемы «Transformer measurements» представлен на рисунке 3.16.

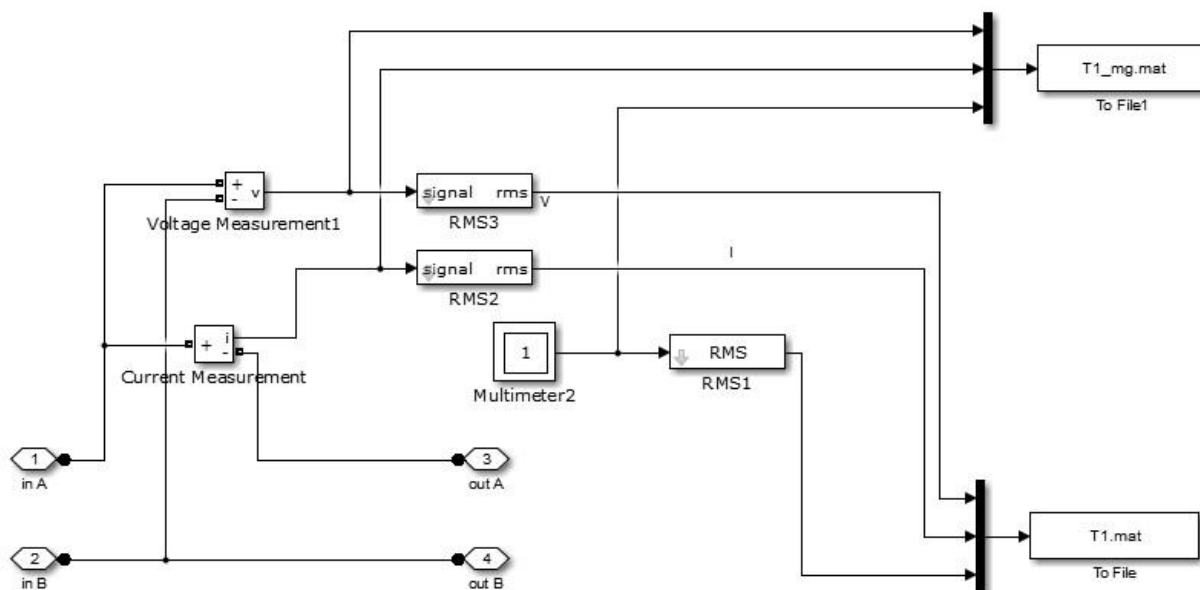


Рис. 3.16 – Вид подсистемы предназначенной для измерений в силовом трансформаторе T1

Мгновенные значения напряжения и токов записываются в файл с расширением T1_mg.mat, действующие в файл T1.mat. Далее файлы с

расширением .mat считываются в другой разработанной модели и преобразуется в графики зависимости входных значений от времени.

В подсистеме «RMS measurements» производятся измерения мгновенных значений тока и напряжения и действующих значений. Запись данных о действующих значениях токов и напряжений на нагрузке происходит в файл nagruzka.mat, а мгновенных значений в файл с названием nagruzka_mg.mat. Вид модели разработанной для измерений токов и напряжений на нагрузке представлен на рисунке 3.17.

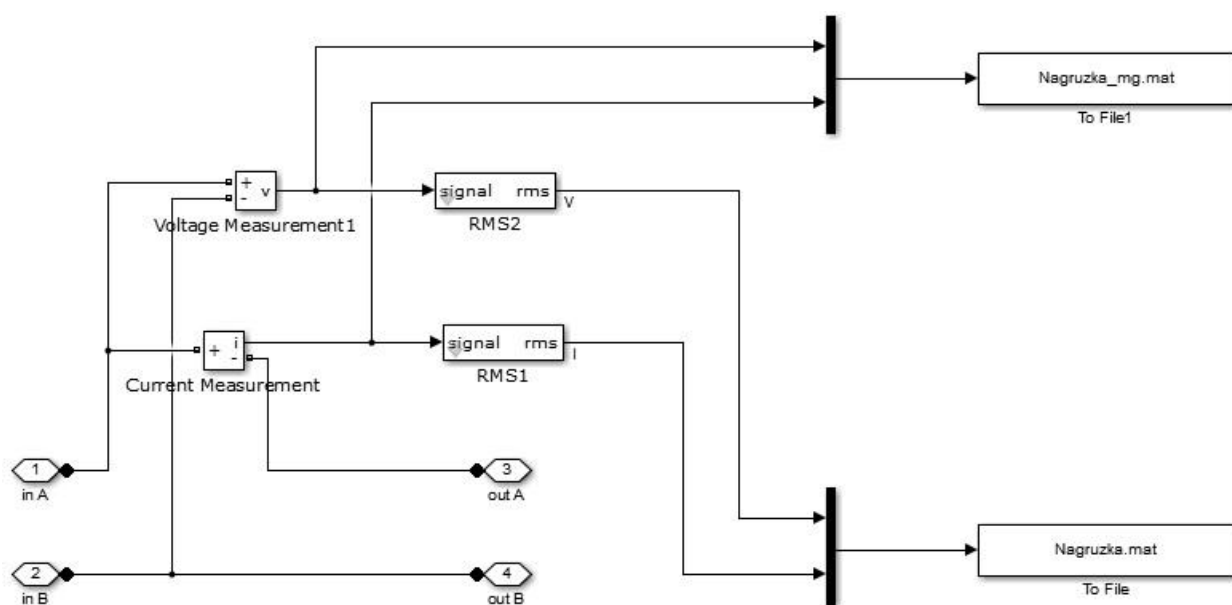


Рис. 3.17 – Вид подсистемы предназначенной для измерений на нагрузке разработанной модели

3.3 Анализ результатов моделирования

При исследовании влияния КПТ на работу силовых трансформаторов систем электроснабжения в основном исследуются рабочие токи силового трансформатора, кривая тока намагничивания.

Моделирование проводилось при трех разных значениях напряженности геоэлектрического поля E . Длина линии была принята значением в $l = 100$ км. Так как начальные условия для модели не были заданы, то Matlab сам

определил начальные условия для всех задействованных блоков в которых возможна активация параметра «Initial parameters».

Постоянный ток, проходя по обмоткам трансформатора, сильно насыщает его сердечник, смещая рабочую точку по кривой намагничивания $B = f(H)$ трансформаторной стали (рисунок 3.18) от положения 1 до положения 2, в крайнем случае.

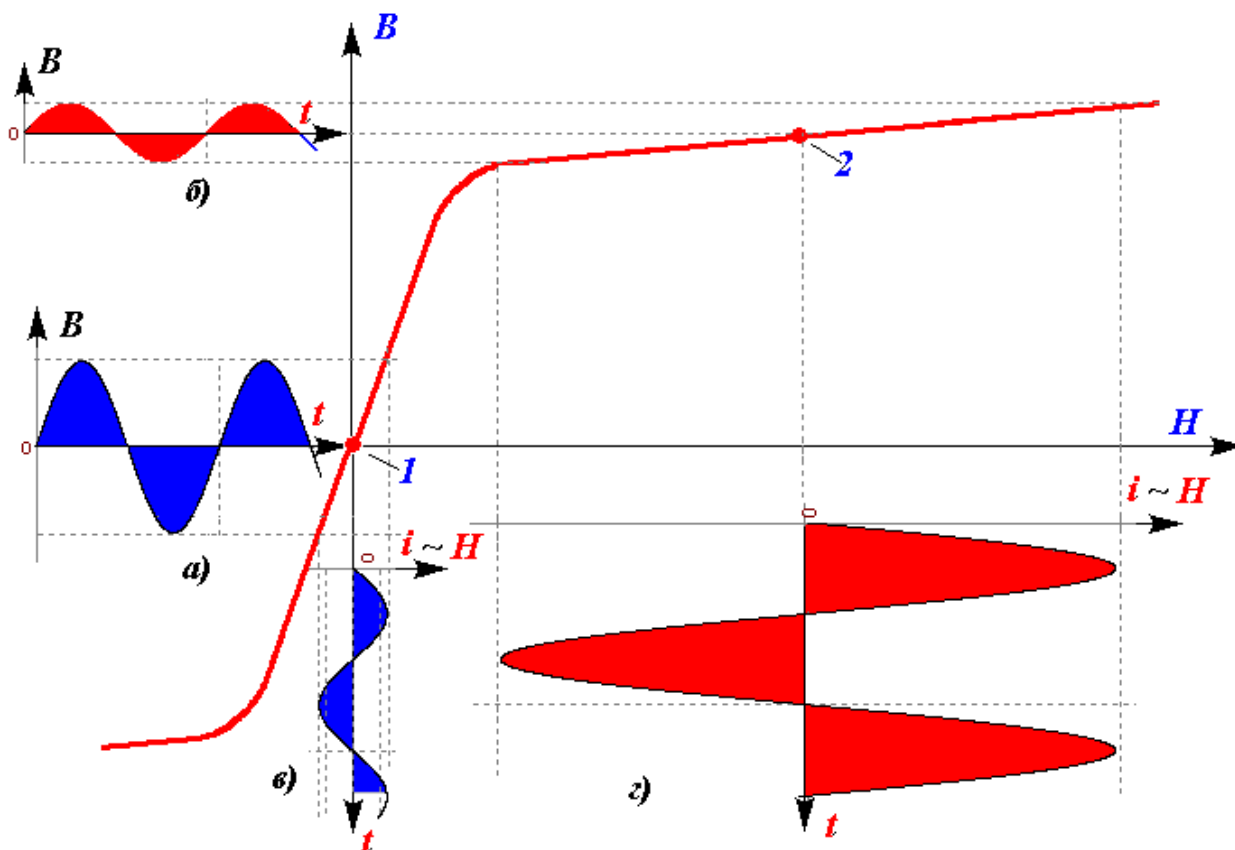


Рисунок 3.18 - Характеристика намагничивания трансформатора

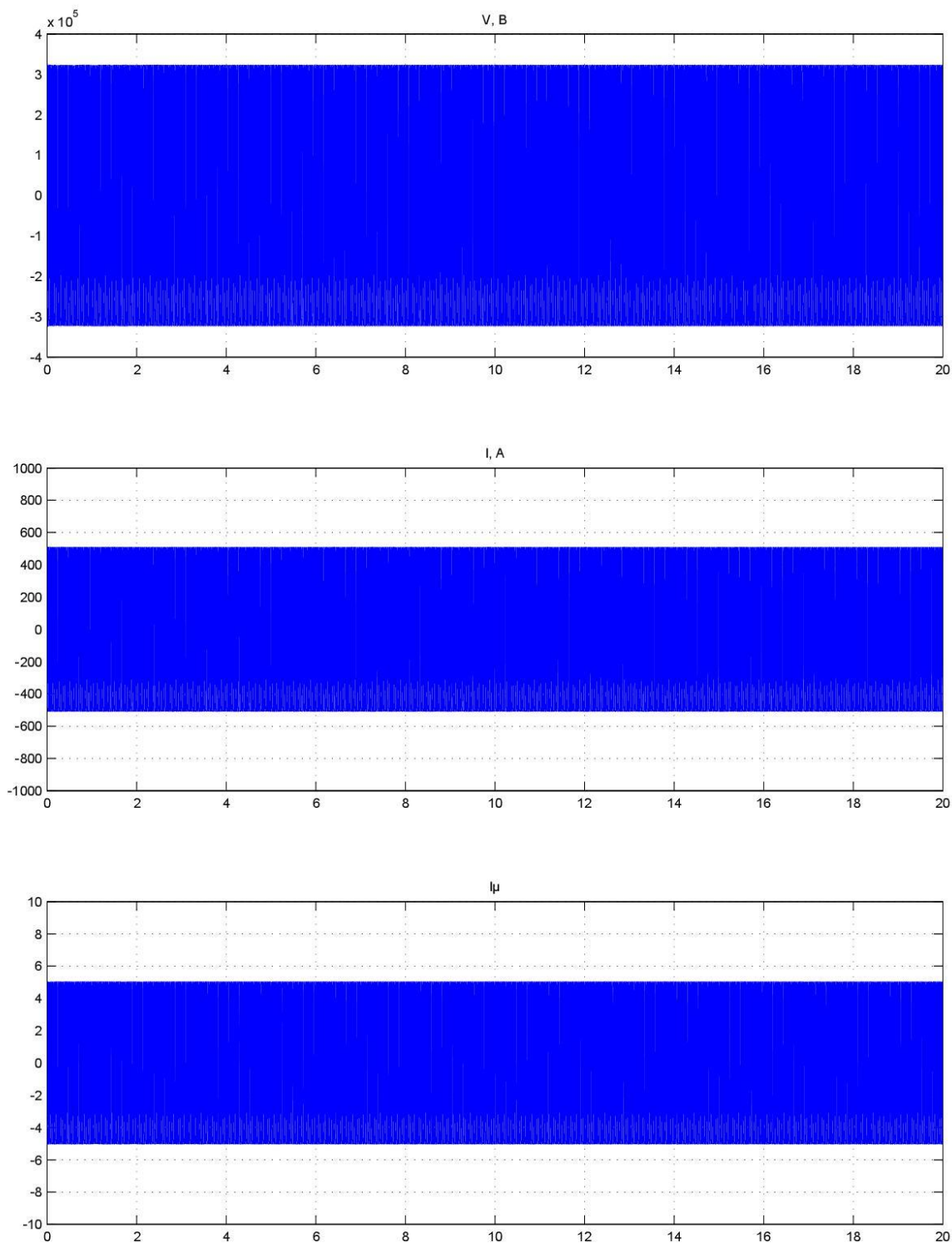
В результате этого даже меньшее изменение магнитной индукции B переменного тока частотой 50 Гц, показанное на рисунке 3.18, б (по сравнению с рисунке 3.18, а), приводит к гораздо большему увеличению (в десятки раз) напряженности магнитного поля H и синусоидального тока i в обмотке трансформатора (рисунок 3.18 г и в). В силу такого резкого увеличения как постоянного, так и переменного тока обмотки высокого напряжения и

сердечник трансформатора быстро нагреваются, а обмотки при этом могут расплавиться и сгореть.

Квазипостоянные токи имеют низкую частоту от 0.001 - 0,1 Гц. Постоянная составляющая в токе силового трансформатора появляется также в момент его включения, поэтому реле защиты силовых трансформаторов обычно отстроены от постоянной составляющей в токе и не реагируют на нее.

Первое значение напряженности было выбрано $E = 0$ В/км, для наглядного представления отображения влияния КПТ на работу силовых трансформаторов. На рисунке 3.19 представлены три зависимости напряжения на высокой стороне, рабочего тока обмотки высокого напряжения и кривой тока намагничивания силового трансформатора от времени t .

Процесс моделирования равен $t = 20$ с, на рисунке 3.19 видно, что при напряженности геоэлектрического поля $E = 0$ В/км, в работе силового трансформатора не наблюдается никаких нарушений. Напряжение V , ток I и кривая тока намагничивания I_μ имеют линейный характер. Форма сигнала для всех трех графиков имеет синусоидальную форму, в чем можно убедиться на представленных на рисунке 3.20 графиках. Приближение по шкале времени составляет от $t = 3$ с до $t = 4$ с, так как в модели блока имитирующего воздействие на систему электроснабжения КПТ влияние последнего начиналось в период времени $t = 3$ с.



Time offset: 0

Рис. 3.19 – Графики напряжения, рабочего тока на обмотке высшего напряжения и тока намагничивания силового трансформатора при $E = 0$ В/км

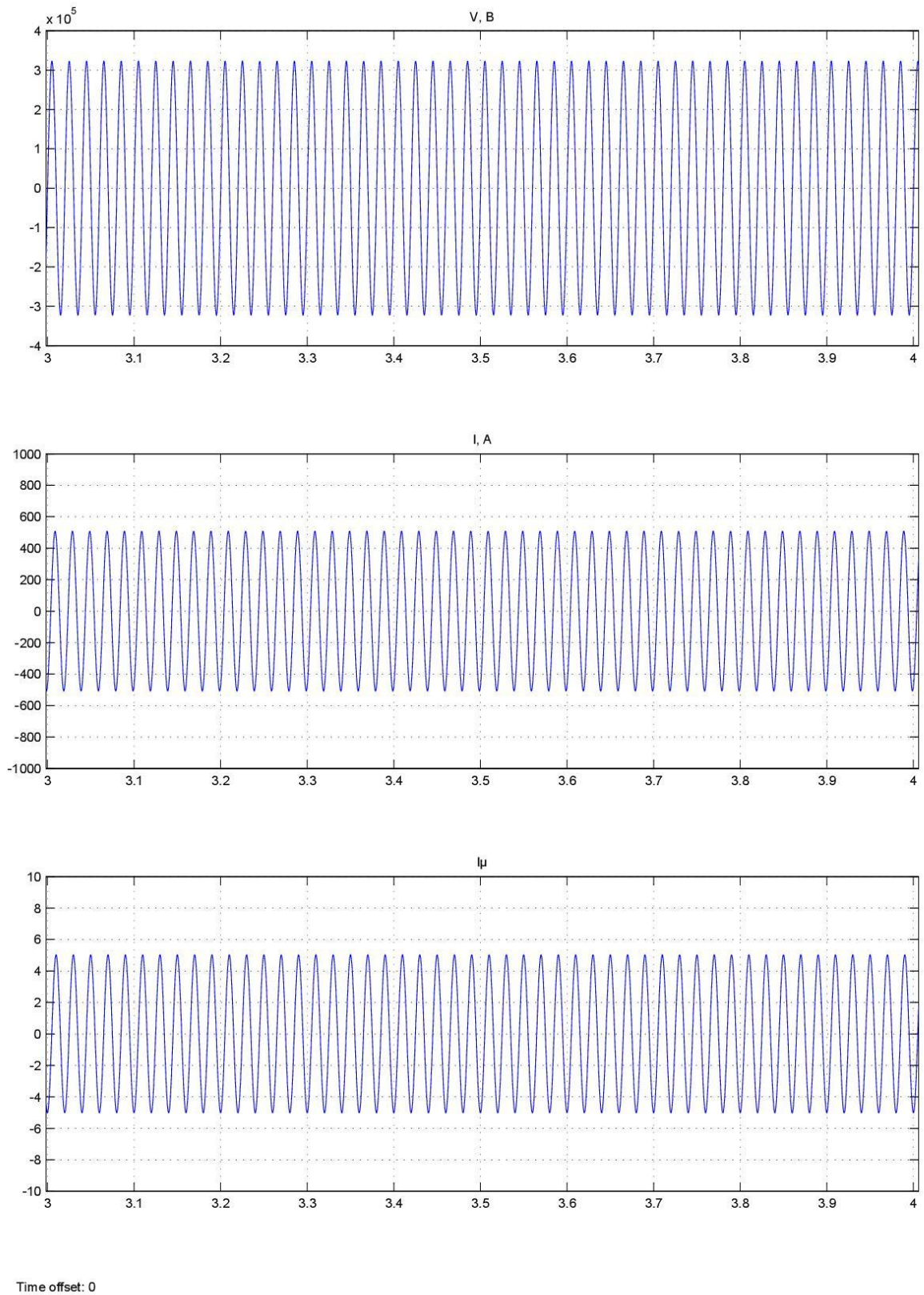


Рис. 3.20 – Графики напряжения, рабочего тока на обмотке высшего напряжения и тока намагничивания силового трансформатора при $E = 0$ В/км в период времени t с 3 до 4 с.

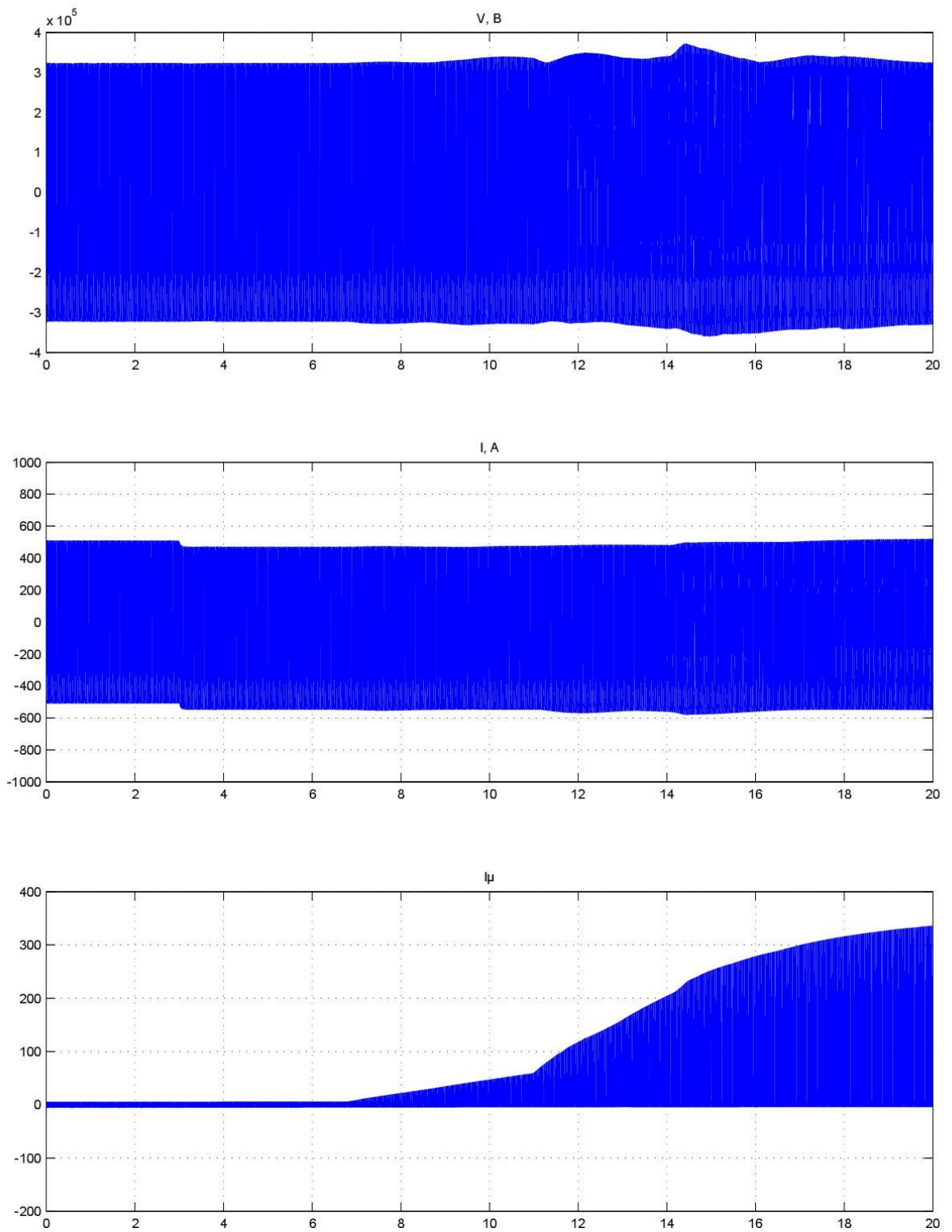
Далее для наглядности и сравнения приведем графики зависимостей линейного напряжения на высокой стороне, рабочего тока обмотки высокого напряжения и тока намагничивания силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при разных значениях напряженности геоэлектрического поля $E = 3$ В/км и $E = 13$ В/км в разные периоды времени проведенного моделирования. Заданное время моделирования составило $t = 20$ с. Задающее воздействие КПТ также начинало свое влияние в период времени $t = 3$ с.

График измеряемых электрических характеристик, линейного напряжения на обмотке высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 3$ В/км показан на рисунке 3.21.

График измеряемых электрических характеристик, линейного напряжения на обмотке высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 3$ В/км в период времени $t = 3 \div 4$ с показан на рисунке 3.22.

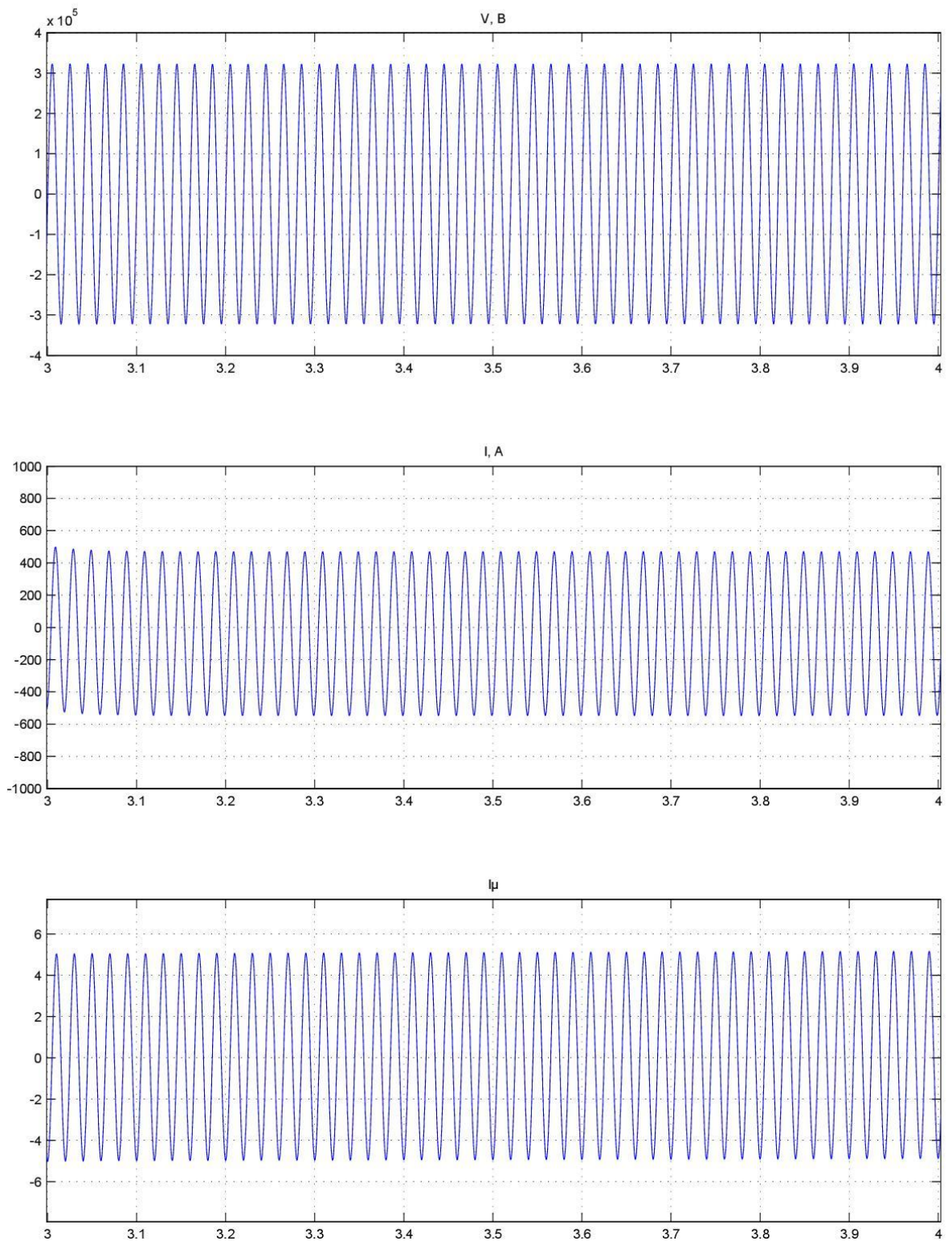
График измеряемых электрических характеристик, линейного напряжения на обмотке высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 3$ В/км в период времени $t = 6.8 \div 7$ с показан на рисунке 3.23.

График измеряемых электрических характеристик, линейного напряжения на обмотке высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 3$ В/км в период времени $t = 9 \div 10$ с показан на рисунке 3.24.



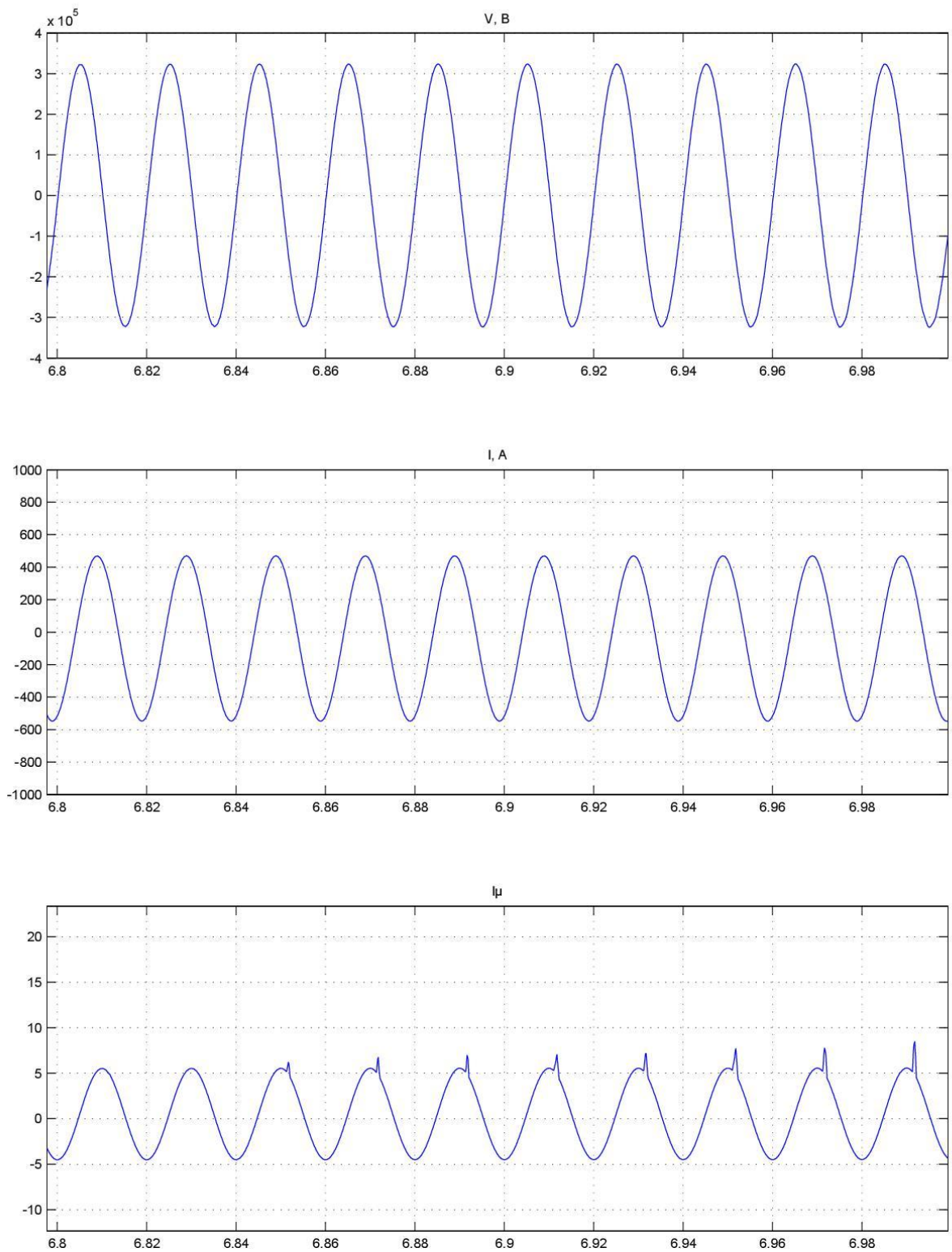
Time offset: 0

Рис. 3.21 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 3$ В/км



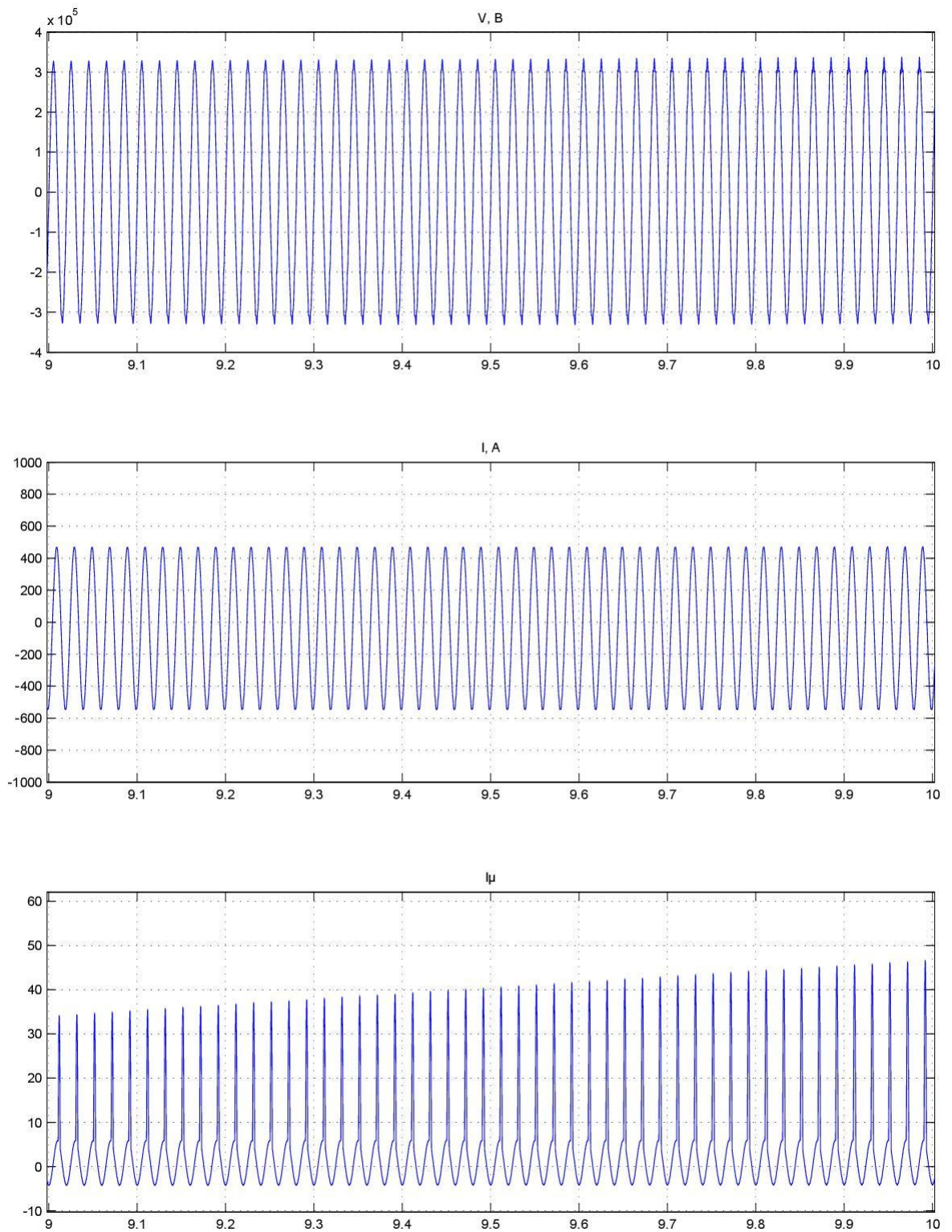
Time offset: 0

Рис. 3.22 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 3$ В/км в период времени $t = 3 \div 4$



Time offset: 0

Рис. 3.23 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 3$ В/км в период времени $t = 6.8 \div 7$ с



Time offset: 0

Рис. 3.24 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 3$ В/км в период времени $t = 9 \div 10$

График измеряемых электрических характеристик, линейного напряжения на обмотке высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 3$ В/км в период времени $t = 13 \div 13.20$ с показан на рисунке 3.25.

График измеряемых электрических характеристик, линейного напряжения на обмотке высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 3$ В/км в период времени $t = 19 \div 19.20$ с показан на рисунке 3.26.

Графики зависимости линейного напряжения на стороне высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 13$ В/км показаны на рисунке 3.27.

Графики зависимости линейного напряжения на стороне высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 13$ В/км в период времени $t = 3 \div 4$ с показаны на рисунке 3.28.

Графики зависимости линейного напряжения на стороне высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 13$ В/км в период времени $t = 6.8 \div 7$ с показаны на рисунке 3.29.

Графики зависимости линейного напряжения на стороне высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 13$ В/км в период времени $t = 9 \div 10$ с показаны на рисунке 3.30.

Графики зависимости линейного напряжения на стороне высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 13$ В/км в период времени $t = 13 \div 13.20$ с показаны на рисунке 3.31.

Графики зависимости линейного напряжения на стороне высокого напряжения V , рабочего тока обмотки высокого напряжения I и тока намагничивания I_μ силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при напряженности геоэлектрического поля $E = 13$ В/км в период времени $t = 19 \div 19.20$ с показаны на рисунке 3.32.

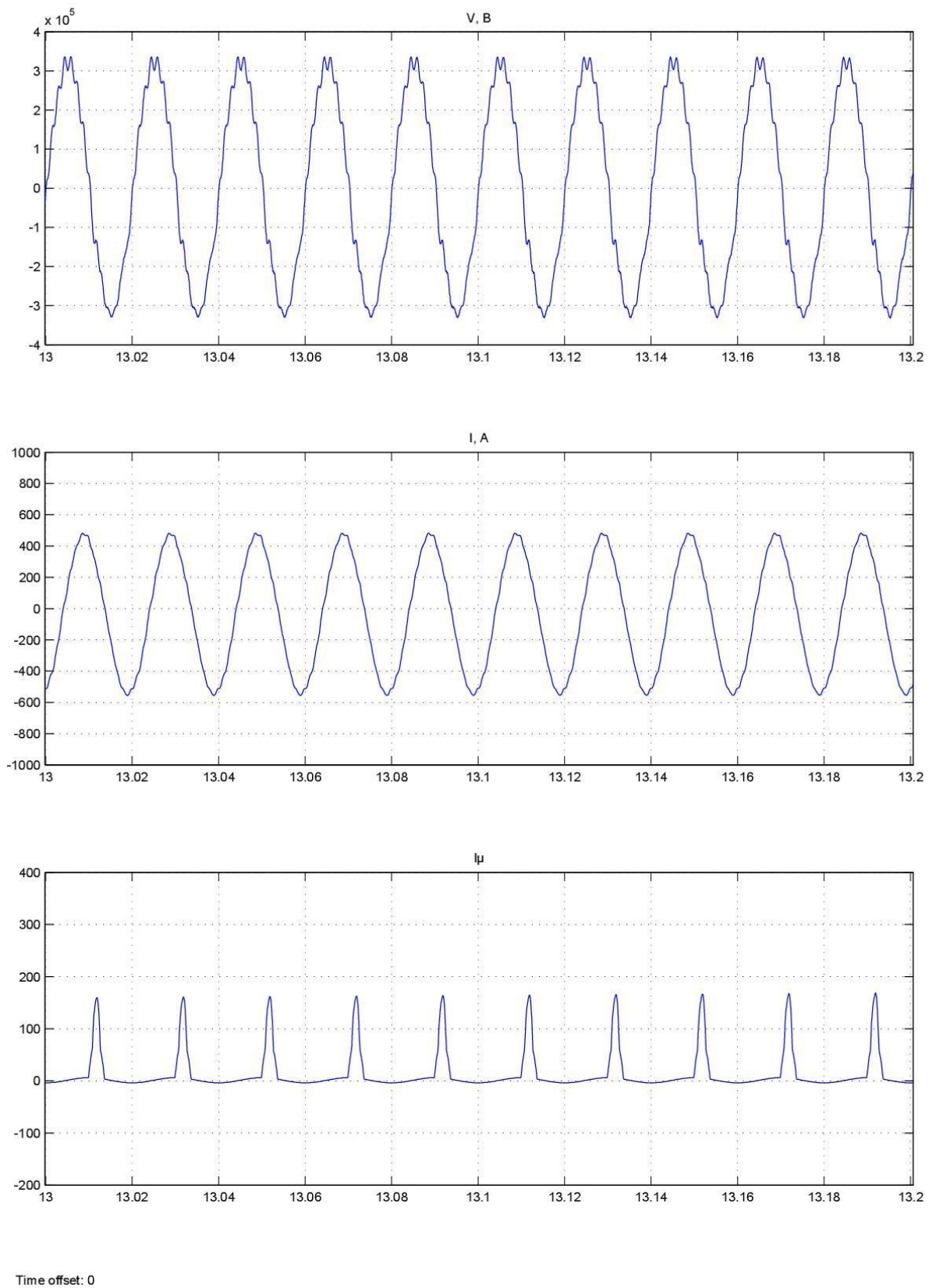


Рис. 3.25 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 3$ В/км в период времени $t = 13 \div 13.20$

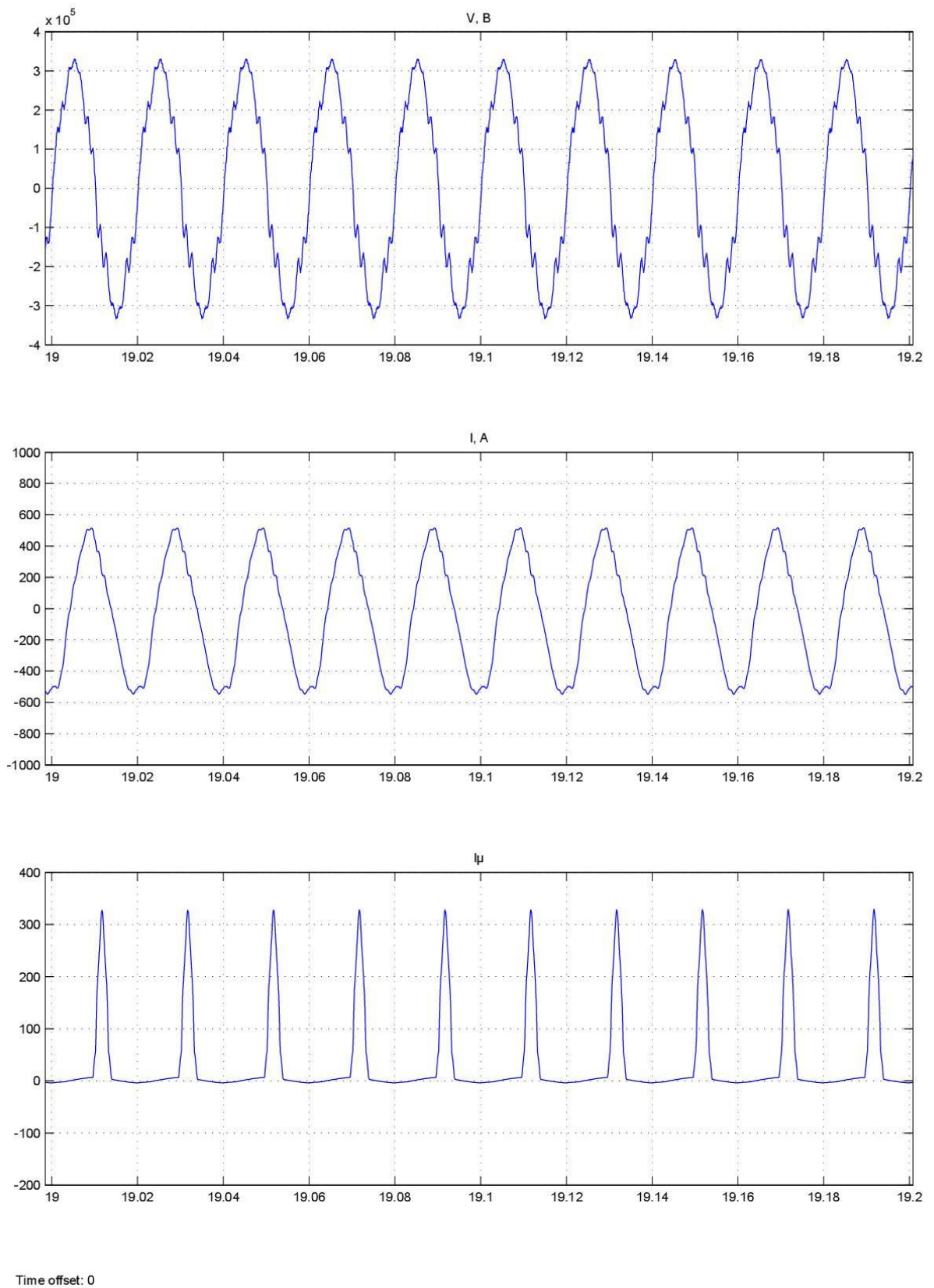


Рис. 3.26 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 3$ В/км в период времени $t = 19 \div 19.20$

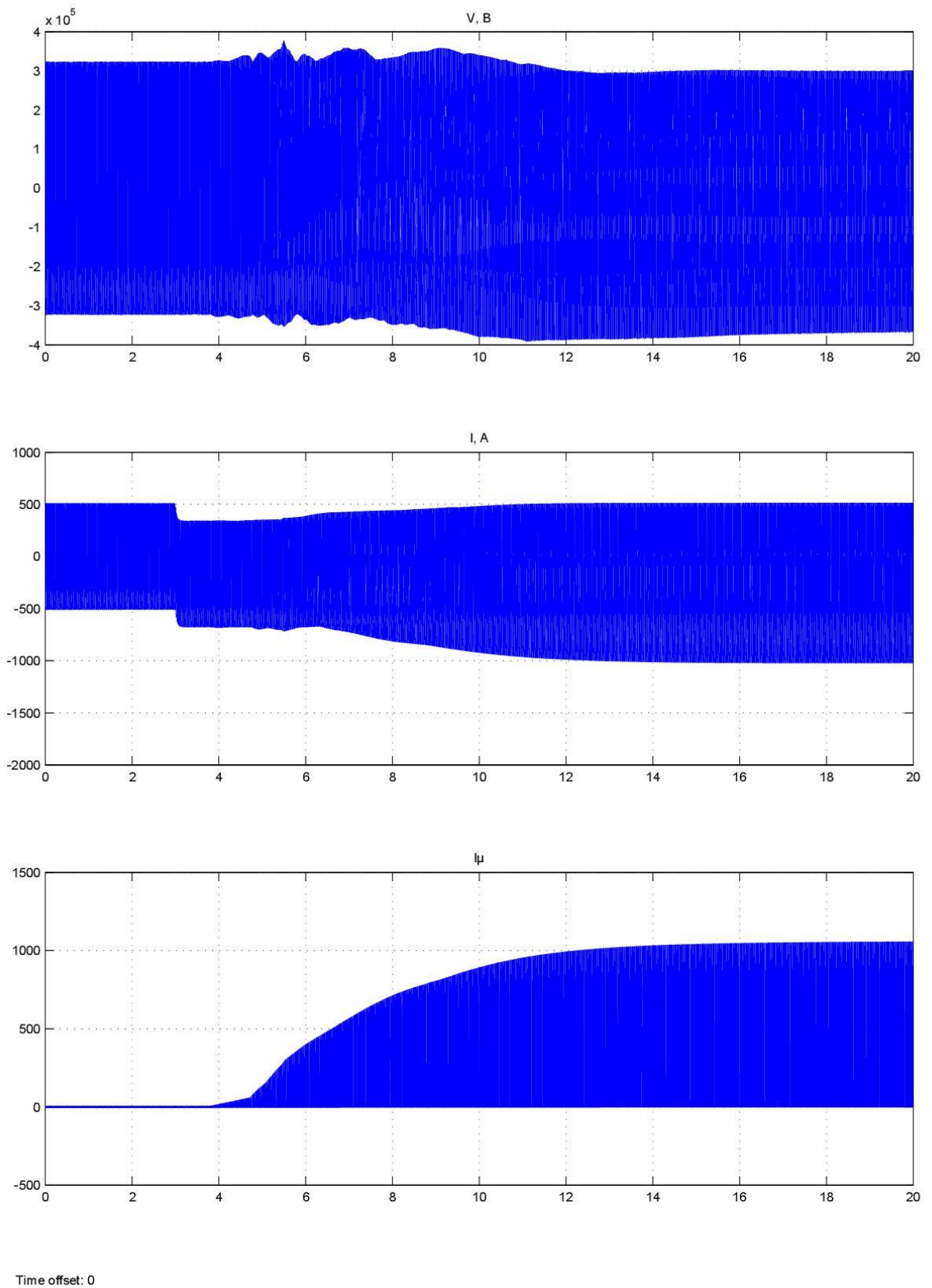


Рис. 3.27 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 13$ В/км

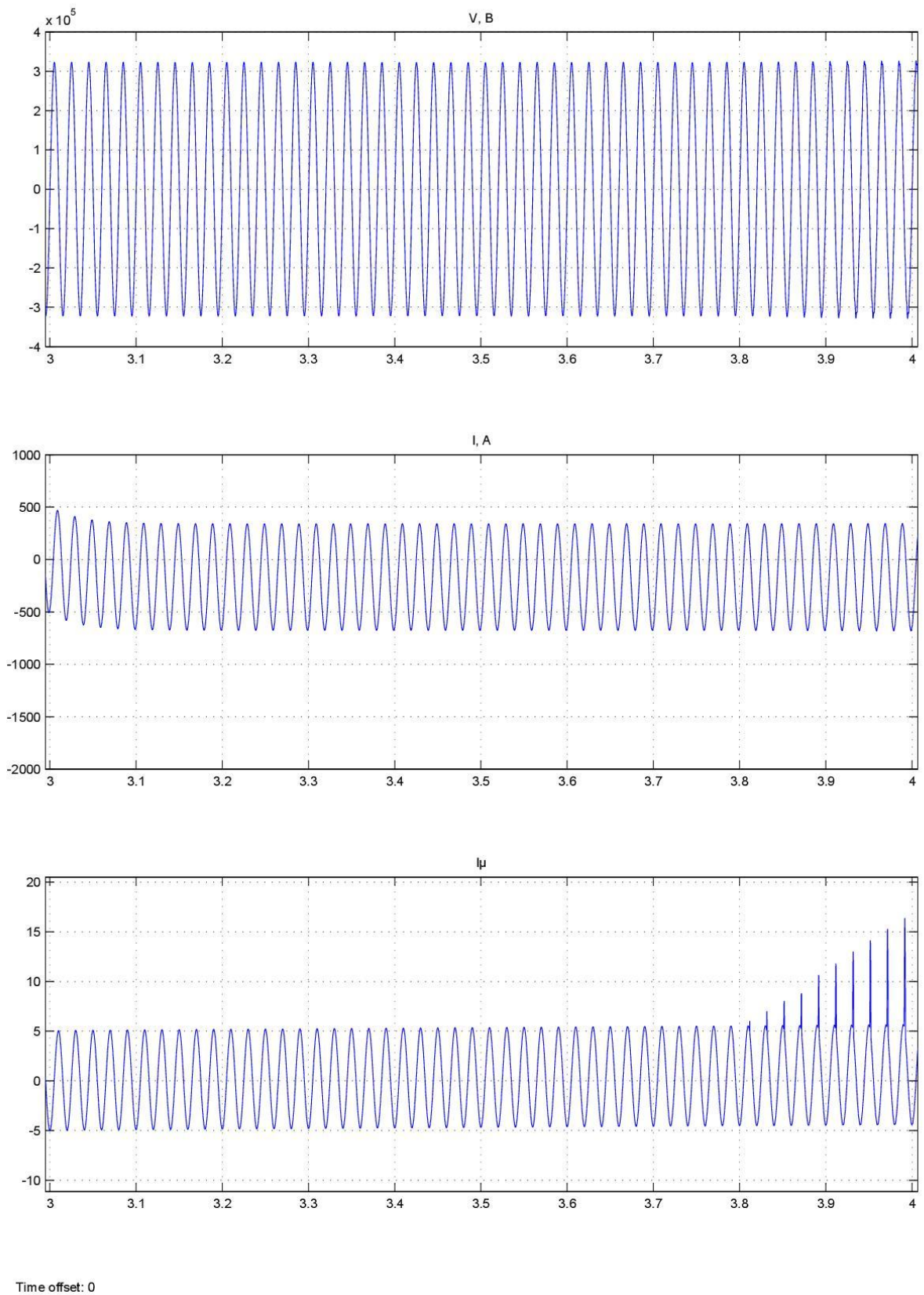


Рис. 3.28 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 13$ В/км в период времени $t = 3 \div 4$

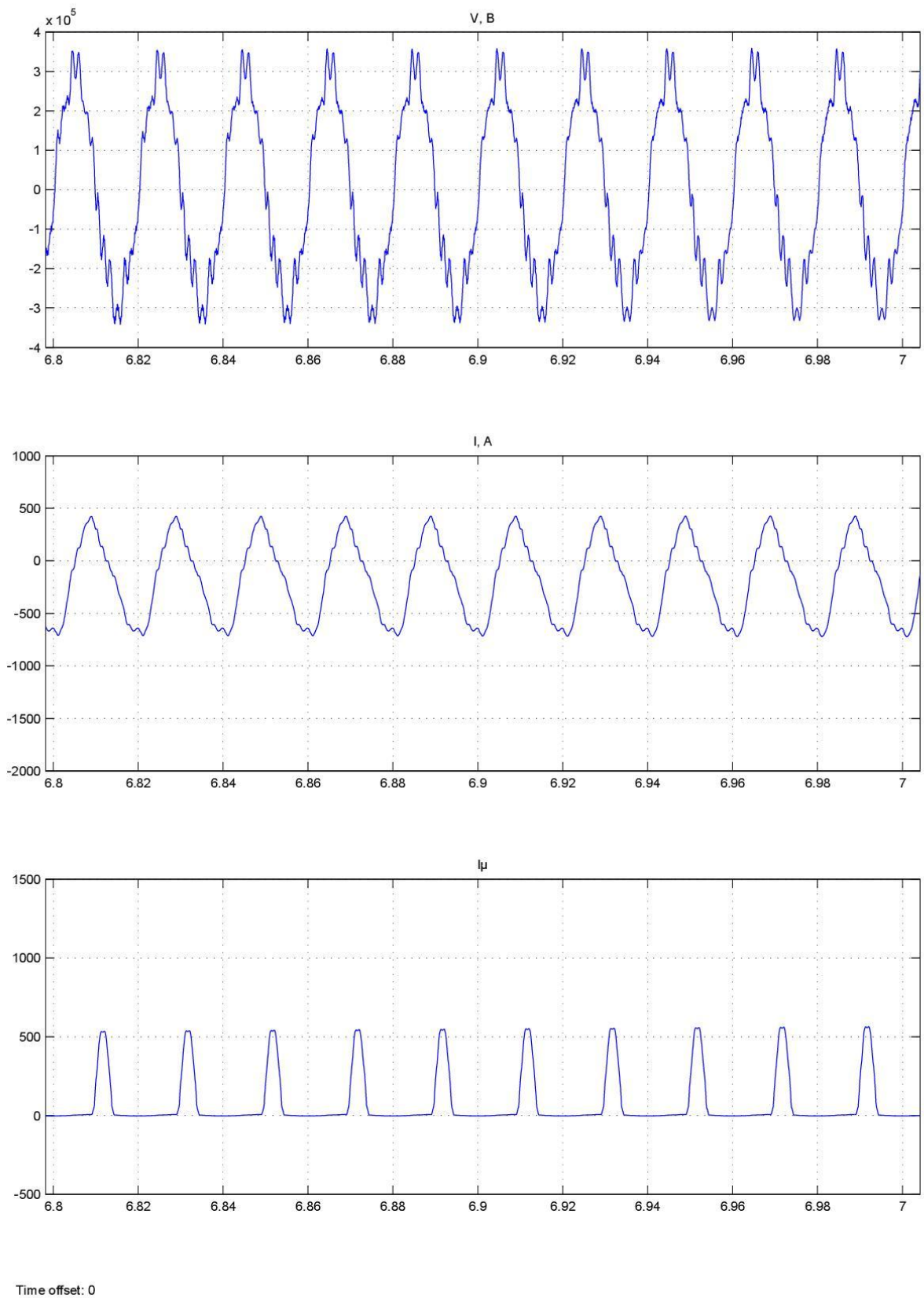


Рис. 3.29 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 13$ В/км в период времени $t = 6.8 \div 7$ с

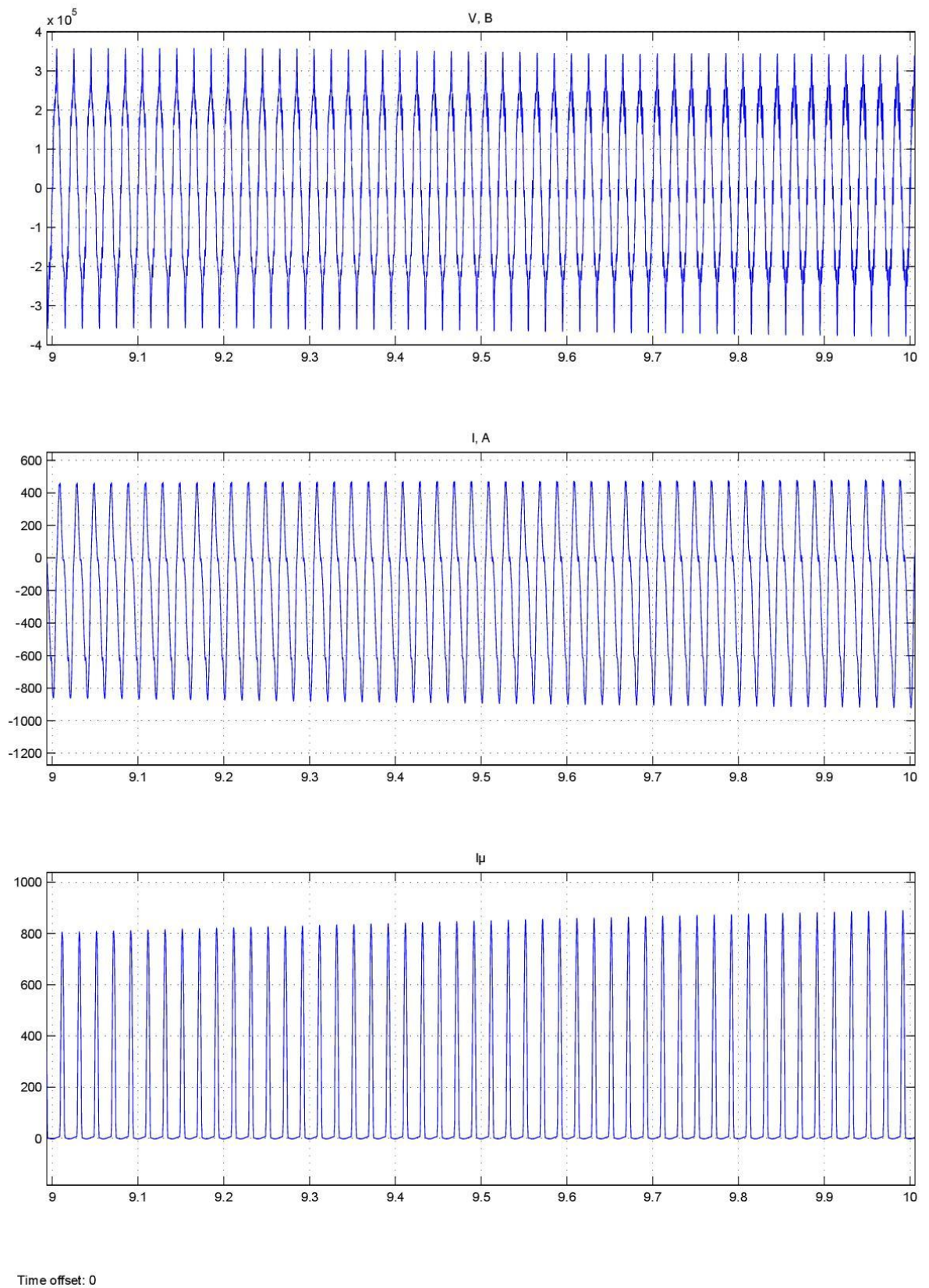


Рис. 3.30 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_{μ} при $E = 13$ В/км в период времени $t = 9 \div 10$ с

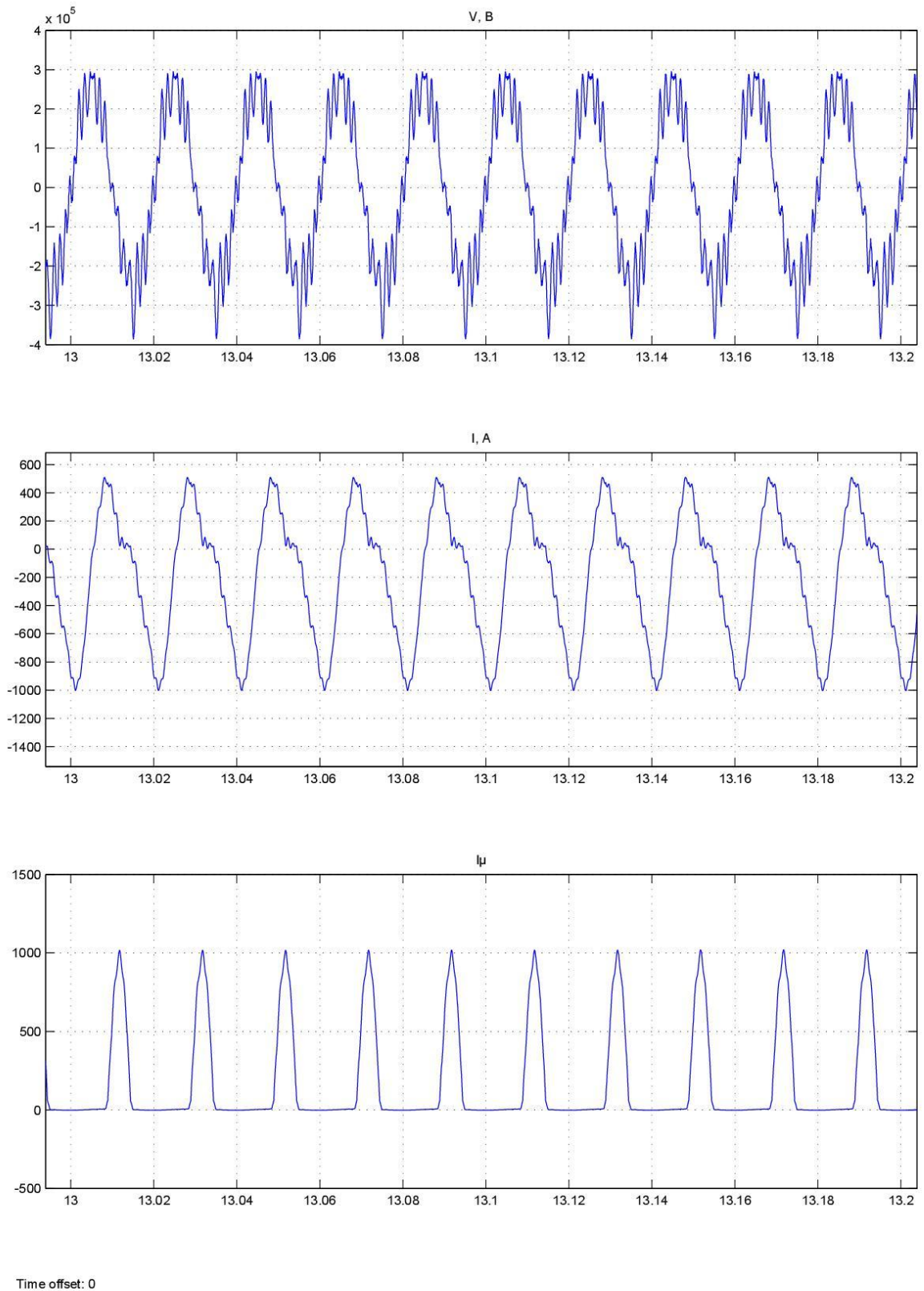


Рис. 3.31 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 13$ В/км в период времени $t = 13 \div 13.20$ с

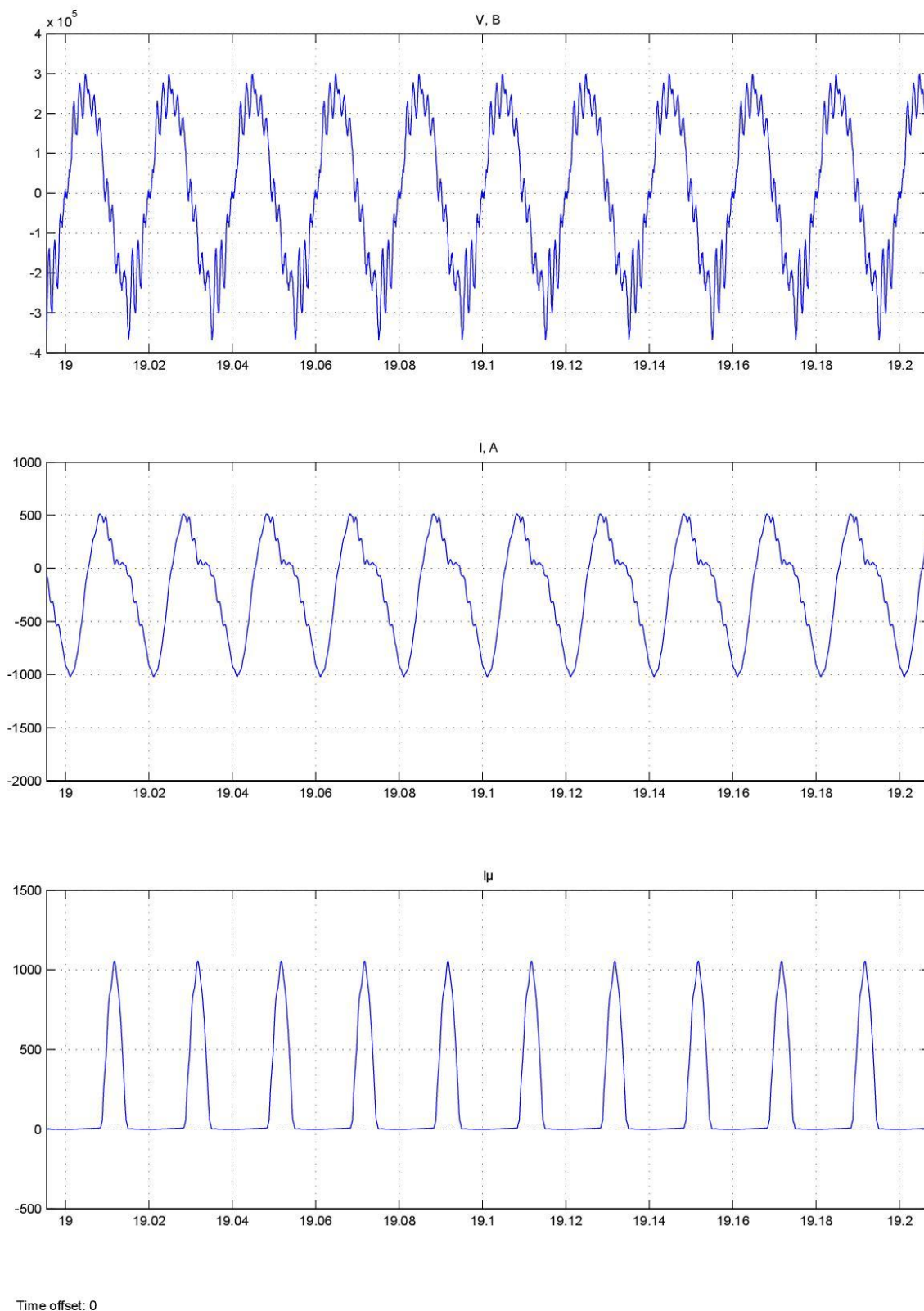


Рис. 3.32 – График изменения линейного напряжения V , рабочего тока I и тока намагничивания I_μ при $E = 13$ В/км в период времени $t = 19 \div 19.20$ с

Из рисунков 3.21 – 3.32 видно, что при протекании КПТ через СТ, увеличивается амплитуда тока намагничивания. За счет действия КПТ (дополнительное подмагничивание магнитопровода) происходит смещение рабочей точки на нелинейный участок кривой намагничивания, что вызывает значительные искажения синусоидальной кривой тока во время одной половины периода.

Как следует из проведенных экспериментов при увеличении значения напряженности геоэлектрического поля E , а следовательно и увеличении значения $I_{\text{КПТ}}$ (при постоянной длине воздушной линии $l = 100$ км), происходит резкое возрастание тока намагничивания силового трансформатора, и, следовательно, это приводит к уменьшению времени, при котором наступает процесс насыщения магнитопровода силового трансформатора [4].

3.4 Меры по защите силовых трансформаторов при функционировании в периоды геомагнитных бурь

Во время ГМБ для обеспечения безаварийного функционирования силовых трансформаторов с глухозаземленными нейтральными требуется их защита от воздействия КПТ. Это достигается путем установки комплекта защиты в нейтраль силового трансформатора.

Оперативный персонал, оценивая аварийное положение по указателям релейной защиты, учитывают принципы их действия, виды повреждений, на которые реагируют защиты, и зоны их действия. При этом принимается во внимание возможность неправильных отключений неповрежденного оборудования одновременно с поврежденным, а также отказы в отключении поврежденного оборудования. Личные наблюдения персонала и поступившие сообщения о замеченных аварийных явлениях (толчках тока, вспышках, пожаре) могут дополнить информацию о месте повреждения. Общее представление об аварии составляется на основании всей информации, затем намечается ориентировочный план действия по ее ликвидации.

Возможны следующие варианты выполнения защит силовых трансформаторов от геомагнитно-индуцированных токов:

- резистивное заземление нейтрали;
- емкостное заземление нейтрали;
- активное заземление нейтрали.

Резистивное заземление нейтрали. Резистивное заземление нейтралей силовых трансформаторов и автотрансформаторов используется для ограничения уровней токов однофазных коротких замыканий наряду с такими мерами, как частичное разземление нейтралей (обычно допустимо только для трансформаторов 110 кВ) и включение в нейтрали токоограничивающих реакторов [1, 41].

Резистивное заземление нейтралей силовых трансформаторов рассмотрено в качестве способа ограничения величины КПТ, протекающего в период ГМБ по заземленным нейтралям, обмоткам ВН и фазным проводам ВЛ под воздействием горизонтальной составляющей $E(x,y)$ напряженности геоэлектрического поля у поверхности земли (рисунок 3.33).

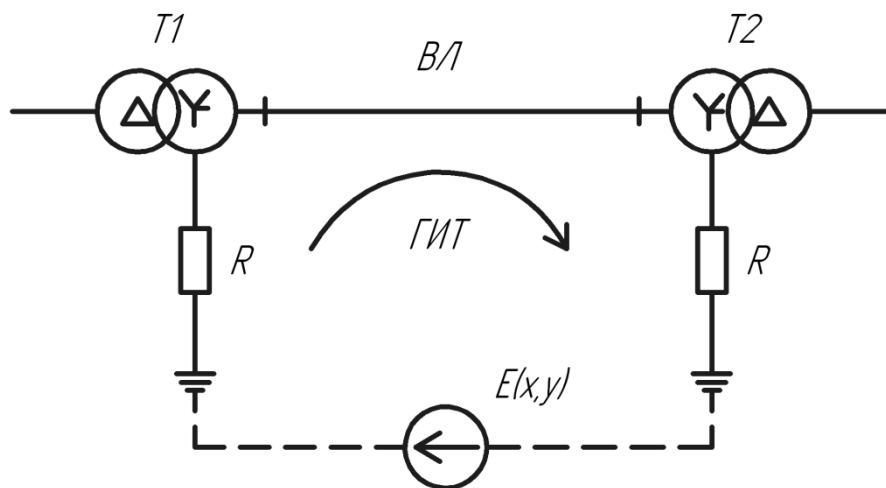


Рисунок 3.33 – Резистивное заземление нейтралей силовых трансформаторов

В периоды ГМБ величина КПТ ограничивается на уровне, определяемом выражением

$$I_{\text{ГИТ}} = \frac{E}{(r_{T1} + r_{T2} + r_{\text{Л}}) + R}, \quad (3.16)$$

где E – величина ЭДС, равная разности потенциалов заземляющих устройств силовых трансформаторов T_1, T_2 , возникающей под воздействием геоэлектрического поля; $r_{T1}, r_{T2}, r_{\text{Л}}$ – активные сопротивления обмоток ВН трансформаторов T_1, T_2 и фазных проводов ВЛ соответственно; R – сопротивление заземляющего резистора.

Емкостное заземление нейтрали. Одно из решений заключается во включении в нейтраль трансформатора токоограничивающего элемента емкостного типа (мощного конденсатора) допускающего протекание через него в нормальном режиме работы переменного тока промышленной частоты (вызванного несимметрией фазных токов), но препятствующего протеканию низкочастотного индуцированного геомагнитного тока.

Емкостное заземление нейтрали может служить более эффективным средством защиты силового трансформатора от воздействия КПТ, поскольку конденсаторные батареи C_{N1}, C_{N2} в нейтралях силовых трансформаторов T_1, T_2 полностью блокируют протекание КПТ по обмоткам ВН и исключают возможность насыщения магнитной системы (рисунок 3.34).

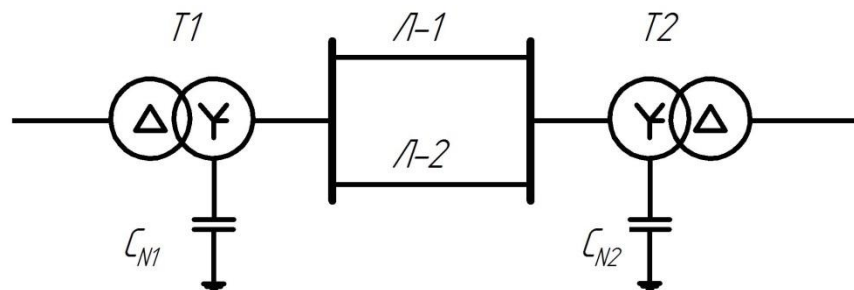


Рисунок 3.34 - Емкостное заземление нейтралей силовых трансформаторов

Для уменьшения мощности конденсаторных батарей необходимо использовать систему емкостного заземления нейтрали силового трансформатора Т, изображенную на рисунке 3.35 [22, 27].

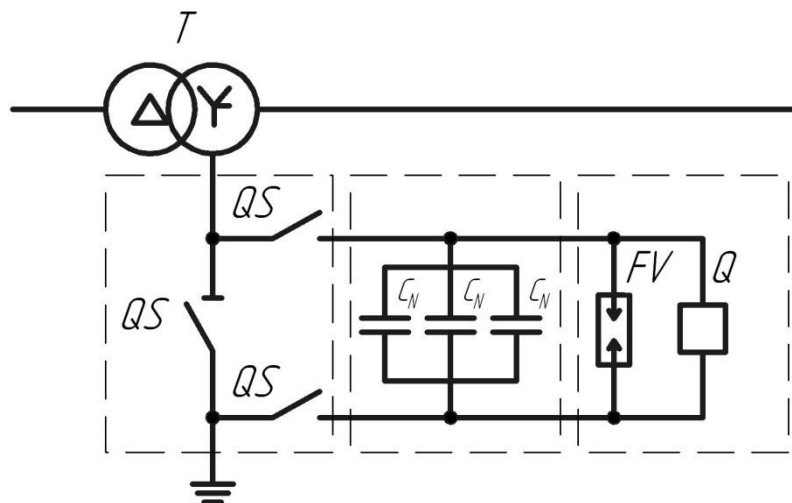


Рисунок 3.35 - Система емкостного заземления нейтрали силового трансформатора

Коммутационный модуль, образованный разъединителями QS, обеспечивает глухозаземленный режим нейтрали во время нормальной эксплуатации и переход в режим емкостного заземления на периоды прогнозируемой геомагнитной активности.

Шунтирующий модуль содержит разрядник FV, в качестве которого могут использоваться искровой промежуток, вентильный разрядник или нелинейный ограничитель перенапряжения, и выключатель Q (обычно вакуумный). Последний шунтирует разрядник FV с конденсаторной батареей C_N и устанавливает глухое заземление нейтрали при возникновении во время ГМБ несимметричного короткого замыкания.

Мощность конденсаторной батареи C_N определяется величиной токов нулевой последовательности основной частоты и высших гармоник. Поэтому непосредственно зависит от степени несимметрии и несинусоидальности напряжения, т.е. определяется качеством электроэнергии в том узле энергосистемы, к которому подключен защищаемый силовой трансформатор.

При этом напряжение на конденсаторной батарее C_N от токов нулевой последовательности с учетом постоянной составляющей в период ГМБ, не должно достигать уровня срабатывания разрядника FV , выбираемого обычно в диапазоне (14÷20) кВ. Этого достаточно для защиты силового трансформатора от воздействия КПТ, а нейтрали от возможных перенапряжений при несимметричных замыканиях на землю в период ГМБ.

Активное заземление нейтрали. Наиболее простой вариант активного заземления нейтрали показан на рисунке 3.36 [4, 22, 27].

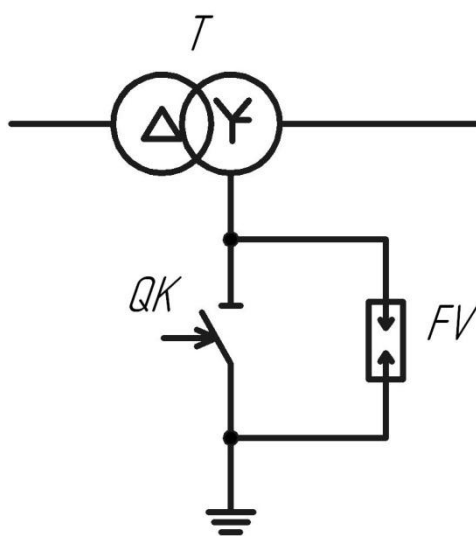


Рисунок 3.36 - Активное заземление нейтрали через искровой промежуток

При отсутствии ГМБ короткозамыкатель QK обеспечивает глухозаземленный режим работы силового трансформатора T . На период прогнозируемой геомагнитной активности короткозамыкатель QK выключается и создает режим изолированной нейтрали, препятствующий протеканию КПТ. Для этого напряжение пробоя искрового промежутка FV должно превышать напряжение нулевой последовательности. При несимметричном коротком замыкании нейтраль силового трансформатора T заземляется через искровой промежуток FV . В качестве недостатков можно отметить нестабильность

разрядного напряжения и недостаточную пропускную способность искрового промежутка.

Более совершенный вариант активного заземления нейтрали может быть реализован на базе вакуумного разрядника 4275 Vi-tron и вакуумного выключателя с механическими контактами, как показано на рисунке 3.37.

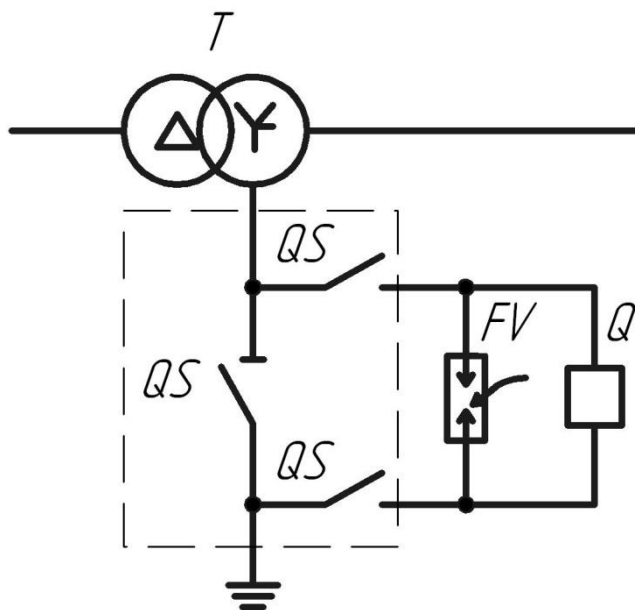


Рисунок 3.37 – Активное заземление нейтрали с помощью вакуумных разрядника и выключателя

Разъединители QS обеспечивают режим глухозаземленной нейтрали в нормальных условиях эксплуатации, а в периоды геомагнитной активности – режим изолированной нейтрали для блокирования КПТ. Вакуумный разрядник FV и вакуумный выключатель Q обеспечивают «быстрое» заземление нейтрали (за время менее 1 мкс) и протекание тока несимметричного короткого замыкания, происходящего в период ГМБ. По окончании аварийного режима вакуумный выключатель Q отключается и работа силового трансформатора Т с изолированной нейтралью может продолжаться до окончания ГМБ.

Следует отметить возможность использования для активного заземления нейтрали отечественных вакуумных управляемых разрядников отпаянной

конструкции серии РВУ, способных коммутировать напряжение до 100 кВ и токи до 200 кА за время менее 1 мкс [7].

Активное заземление нейтрали является перспективным способом защиты силового трансформатора, поскольку также как и емкостное заземление обеспечивает полное блокирование КПТ на весь период ГМБ, но без риска возникновения резонансных и феррорезонансных явлений, способных нарушить нормальный режим работы электрической сети [9, 22, 27]. Однако для реализации активного заземления требуется большое количество различных коммутационных аппаратов – разъединители, вакуумный разрядник и вакуумный выключатель, причем последние используются в течение очень короткого интервала времени, не превышающего 2% рабочего времени.

3.5 Выводы по 3 разделу

1. Разработана модель в программе MATLAB для анализа воздействия квазипостоянных токов на режимы работы силового трансформатора в системе электроснабжения;

2. В результате моделирования системы электроснабжения при воздействии КПТ получены: линейные напряжения на обмотке высокого напряжения, рабочие токи обмотки высокого напряжения, кривые тока намагничивания силового трансформатора ТДЦ – 400000/220/20 при различных уровнях напряженности геоэлектрического поля E .

3. Разработан комплекс мер по защите силовых трансформаторов для их устойчивого функционирования в периоды геомагнитных бурь.

Заключение

1. Исследованы основные причины возникновения нарушений в работе систем электроснабжения. Рассмотрен процесс образования КПТ и их влияние на работу систем электроснабжения.
2. Показаны зарубежные исследования на тему воздействия КПТ на СЭС и силовые трансформаторы.
3. Исследованы зависимости влияния квазипостоянных токов на работу силовых трансформаторов в зависимости от их конструкции. Показан характер формирования несинусоидальной кривой тока намагничивания.
4. Показан характер изменения Т – образной схемы замещения силового трансформатора при протекании по заземленной обмотке высокого напряжения квазипостоянных токов. Разработана модель системы электроснабжения для исследования влияния КПТ на силовые трансформаторы
5. Полученные результаты компьютерного моделирования проанализированы и предложены способы защиты силовых трансформаторов систем электроснабжения при их функционировании в периоды геомагнитных бурь.

Список использованных источников

1. Баранник, М.Б. Разработка системы измерения геоиндуктированных токов на северо-западе России для проекта EURISGIC / М.Б. Баранник, А. Вильянен, А.Н. Данилин, Ю.В. Катъкалов, В.В. Колобов, П.И. Прокопчук, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011(5). – С. 121 – 125.
2. Баранник, М.Б. Исследование влияния геомагнитных возмущений на гармонический состав токов в нейтралях автотрансформаторов / М.Б. Баранник, В.Н. Селиванов, А.Н. Данилин, В.В. Колобов, Я.А. Сахаров // Труды Кольского научного центра РАН. – 2012 (8). – С. 60 – 67.
3. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л.А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Гардарики, 2006. - 638 с.
4. Вахнина, В.В. Разработка математической модели электроэнергетической системы при воздействии геоиндуцированных токов / В.В.Вахнина, Т.А.Рыбалко, М.О. Зюзин //Международный научно-исследовательский журнал : Сборник по результатам XXII заочной научной конференции Research Journal of International Studies / под ред. А.В. Миллер. – Выпуск 12 (19), Часть 1. – Екатеринбург: МНИЖ, 2013. –С.115-119.
5. Вахнина, В.В. Компьютерное моделирование и анализ высших гармонических составляющих в системе электроснабжения при воздействии геоиндуцированных токов / В.В.Вахнина, Т.А.Рыбалко // Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings: Papers of the 5th International Scientific Conference (February 12, 2014) / Cibunet publishing / New York, USA. 2014. 228 p.

6. Вахнина, В.В. Оценка влияния геоиндуцированных токов на электроэнергетические системы путем компьютерного моделирования / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.А. Шаповалов, А.Н. Черненко, Д.А. Кретов, В.А. Кузнецов, Т.А. Рыбалко // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сборник статей V международной научно - практической конференции. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2014. – 33-38 с.

7. Гершенгорн, А.И. Воздействия геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем / А.И. Гершенгорн // Электрические станции. – 1993. – № 6. – С. 54 – 63.

8. Гершенгорн, А.И. Исследование возмущений в электроэнергетических системах / А.И. Гершенгорн // Энергохозяйство за рубежом. – 1982. – № 5. – С. 28 – 35.

9. Глосслийд, Д. Регистрация системных аварий / Д. Глосслийд // Компоненты и технологии. – 2010.- №10. – С.11-18.

10. Голов, П.В. Система математических моделей для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах / П.В. Голов, Ю.В. Шаров, В.А. Строев //– Электричество, - 2007. - № 5, С. 65-67.

11. ГОСТ 27430 – 87 (МЭК 34 – 10). Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения для описания электрических машин.

12. ГОСТ Р 51317.4.7 - 2008. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – Введ. 2008-12-25. – М. : Стандартиформ, 2009. – 39 с.

13. ГОСТ Р 52719 - 2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

14. ГОСТ Р 54149 – 2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2013-01-01. – М. : Стандартиформ, 2012. – 20 с.
15. Дьяконов, В.П. MATLAB и Simulink в электроэнергетике : справочник / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с.
16. Дьяконов, В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / В.П. Дьяконов. – М. : ДМК - Пресс, 2008. – 784 с.
17. Жежеленко, И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
18. Евдокунин, Г.А. Математическое моделирование элементов электроэнергетических систем / Г.А. Евдокунин, С.В. Смоловик, О.В. Щербачев. Учебное пособие. – Л.: ЛПИ, 1980.
19. Кощеев, Л. А. Системные аварии в западном энергообъединении США / Л. А.Кощеев, В. А.Семенов // Электричество. 1997. №10. с. 24—28.
20. Мозгалев, К.В. Об эффективности заземления нейтралей автотрансформаторов через реактор или резистор / К.В. Мозгалев, Б.Н. Неклепаев, А.В. Шунтов // Электричество. – 2004. – №1. – С. 32 – 39.
21. Овчаренко, Н.И. Автоматика энергосистем: учебник для вузов. — 3-е изд., исправленное / Н.И. Овчаренко ; под ред. чл.-кор. РАН, докт. техн. наук, проф. А.Ф. Дьякова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 476 с.: ил.
22. Ополева, Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник: учебное пособие / Г.Н. Ополева. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М. – 2006. – 480 с.

23. Правила расследования аварий в электроэнергетике. Постановление Правительства Российской Федерации от 28.10.2009 № 846.
24. Правила устройств электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005.
25. РД 16 363-87. Трансформаторы силовые. Транспортирование, разгрузка, хранение, монтаж и ввод в эксплуатацию
26. Рыбалко, Т.А. Применение компьютерного моделирования для исследования работы системы электроснабжения при воздействии геомагнитных бурь / Т.А. Рыбалко, М.О. Зюзин // Проблемы и перспективы развития науки и образования в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции 18 февраля 2014г. Липецк, Липецкая областная общественная организация Всероссийского общества изобретателей и рационализаторов. - 2014. – 165-168 с.
27. Рясин, В. И. Энергетическая безопасность региона в условиях реформирования электроэнергетики. / В. И. Рясин // Иваново: Иван. гос. ун-т, - 2005. - 216 с.
28. Сивоконь, В.П. Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов / В.П. Сивоконь, А.С. Сероветников, А.В. Писарев // Электро. – 2011. – № 3. – С. 30 – 34.
29. Скопинцев, В.А. Влияние космической погоды на надежность работы электрической сети / В.А. Скопинцев, Д.Р. Любарский // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – С. 90 – 93.
30. Скопинцев, В.А. Влияние космических факторов на повреждаемость в электрических сетях / В.А. Скопинцев, Д.В. Маркитанов // Энергетик. – 2012. – № 10. – С. 8 – 11.

31. Тертышников, А.В. Индексы геомагнитной активности: учебное пособие / А.В. Тертышников, М.А. Морозов, С.А. Нечаев, А.Н. Зайцев, Н.А. Зоболотная, А.В. Сыроешкин, В.А. Буров, В.И. Денисова, В.Н. Заболотнов, Г.Н. Чиквиладзе. – Москва: Изд-во ТАВ, 2013. – 86 с.
32. Тертышников, А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций: учеб. пособие / А.В. Тертышников. – Москва, 2011. - 261 с.
33. Файбисович, Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей. 3-е издание. – М. изд-во: НЦ ЭНАС, 2009. – 392 с.
34. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
35. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года (Постановление Правительства Российской Федерации от 13.11.2006 г. № 1715-р).
36. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 г., 1715 - р.). М., 2009.
37. Albertson, V.D. The effects of geomagnetic storms on electric power system / V.D. Albertson, T.J. Thorson, S.A. Miske // IEEE Transactions on Power Apparatus and System. – 1974. – №4 (93). – P. 1031 – 1044.
38. Kappenman, J.G. Geomagnetic storms and Their Impact on Power Systems: Lessons Learned from Solar Cycle 22 and the Outlook for Solar Cycle 23 / J.G. Kappenman // IEEE Power Engineering Review. – 1996. – № 5. – P. 5 – 8.
39. Blackout History Project . URL: <http://blackout.gmu.edu/home.html>. Дата обращения 10.10.2015 г.
40. Chunming Liu. Observations and modeling of GIC in the Chinese large-scale high-voltage power networks [Электронный ресурс] / Chunming Liu Yunlong Li and Risto Pirjola // J. Space Weather Space Clim. 4 (2014)

A03 — Режим доступа: <http://www.swsc-journal.org/articles/swsc/pdf/2014/01/swsc130009.pdf>

41. Ioannis Panayiotis Zois. Solar activity and transformer failures in the Greek national electric grid [Электронный ресурс] / Ioannis Panayiotis Zois // J. Space Weather Space Clim. 3 (2013) A32 — Режим доступа: http://www.swsc-journal.org/articles/swsc/full_html/2013/01/swsc120058/swsc120058.html

42. Кувшинов, А.А. Анализ механизмов распространения геоиндуцированных токов в системообразующих сетях различной топологии / Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Кузнецов В.А., Рыбалко Т.А., Зюзин М.О. // ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. – 2015. – № 5. – с. 36–46.

43. Зюзин, М.О. Влияние квазипостоянных токов на режимы работы силовых трансформаторов/ Зюзин М.О., Крюковский М.П. // Энергетика. Проблемы и перспективы развития: тезисы докладов первой региональной студенческой конференции / под ред. Д. Ю. Муромцева [и др.]; ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 88с.

44. Зюзин, М.О. Влияние квазипостоянных токов на режимы работы систем электроснабжения / Зюзин М.О., Кузнецова А.И. // Материалы докладов X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 3 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 304 с.

45. Кувшинов, А.А. Сравнительный анализ способов защиты силовых трансформаторов систем электроснабжения от воздействия геоиндуцированных токов / Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.А., Зюзин М.О. // ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА – 2014. – № 8. – с. 30–35.

46. Зюзин, М.О. Разработка математической модели электроэнергетической системы при влиянии геоиндуцированных токов / Зюзин М.О., Рыбалко Т.А. // Проблемы и перспективы развития науки и

образования в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции 18 февраля 2014г. Липецк, Липецкая областная общественная организация Всероссийского общества изобретателей и рационализаторов / Липецк, 2014. – 226 с.