

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование влияния геоиндуцированных токов на работу силовых трансформаторов в составе ЭЭС

Студент

В.Н. Кузнецов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, В.А. Шаповалов

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

Тольятти 2021

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ проблем, возникающих при воздействии геоиндуцированных токов на ЭЭС. Расчет геоиндуцированных токов	6
1.1 Общее представление о проблемах, возникающих при воздействии геоиндуцированных токов на ЭЭС.....	6
1.2 Механизм протекания геоиндуцированных токов через заземленные нейтрали трансформаторов	9
1.3 Анализ негативных последствий влияния геоиндуцированных токов на работу силовых трансформаторов.....	13
1.4 Анализ проблем, возникающих при воздействии геоиндуцированных токов на ЭЭС	18
1.4.1 Анализ поведения системы в условиях возрастания потребления реактивной мощности.....	18
1.4.2 Тепловое воздействие на трансформаторы	19
1.4.3 Уязвимость оборудования ЭЭС к появлению гармоник	21
1.4.5 Гибкие (адаптивные) системы передачи электроэнергии переменным током (FACTS).....	22
1.5 Расчет геоиндуцированных токов	23
1.5.1 Схема расчета геоиндуцированных токов.....	23
1.5.2 Данные наблюдений за магнитным полем Земли	24
1.5.3 Данные об удельной проводимости верхних слоев Земли.....	25
1.5.4 Расчет индуцированного геоэлектрического поля	28
1.5.5 Сведения о структуре и элементах ЭЭС.....	29
1.5.6 Расчет ГИТ	30
1.5.7 Расчет индуцированного геоэлектрического поля	33
1.5.8 Расчет ГИТ	38
1.5.9 Метод узловых потенциалов.....	39
1.5.10 Матрично-топологический метод	41

2 Моделирование влияния геоиндуктированных токов на режимы работы силового трансформатора.....	46
2.1 Схема моделирования влияния геоиндуктированных токов на режимы работы силового трансформатора	46
2.2 Математическая модель магнитной системы силового трансформатора	47
2.2.1 Нахождение магнитной индукции и магнитных потоков	47
2.2.2 Метод конечных элементов	50
2.2.3 Метод магнитных цепей.....	55
2.3 Задание кривой намагничивания и её производной.....	60
3 Реактивная мощность и высшие гармоники	68
3.1 Реактивная мощность	68
3.2 Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока намагничивания при воздействии ГИТ	73
Заключение	79
Список используемых источников.....	81

Введение

«В периоды геомагнитных бурь (ГМБ) в протяженных электрических сетях возникают геоиндуцированные токи (ГИТ), протекающие через заземленные обмотки силовых трансформаторов и провода воздушных линий электропередач. Мониторинг ГИТ осуществляется в электрических сетях многих стран, в частности более 20 лет в США, Канаде и Финляндии. Наблюдаемые значения ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов в годы со средней геомагнитной активностью достигают 100 А и более, а в годы с высокой геомагнитной активностью могут превышать 200 А. В предположении симметрии электрической сети значения ГИТ при сильных геомагнитных бурях в фазных проводах линий электропередач могут превышать 67 А и быть сопоставимы с их рабочими токами» [23].

«Воздействие ГИТ на электрическую сеть заключается в насыщении магнитной системы силовых трансформаторов (СТ), приводящее к многократному возрастанию несинусоидальных токов намагничивания. Это одинаково опасно как для силовых трансформаторов, поскольку возникает дополнительный нагрев обмоток, изоляции, масла, так и для режима электрической сети, поскольку увеличивается потребление реактивной мощности» [23].

Влияние геомагнитных возмущений, вызванных солнечной активностью, на силовые трансформаторы и электроэнергетические системы наблюдается в течение многих десятилетий и во многих частях мира. Эти события создали достаточно высокий уровень обеспокоенности в электроэнергетике, связанный с последствиями от воздействия ГИТ, протекающих в нейтралях мощных силовых трансформаторов.

Неблагоприятная ситуация возникает при протекании в электроэнергетической системе ГИТ. Эти токи попадают в ЭЭС через заземлённые нейтралы СТ, оказывая существенное влияние на работу СТ. Как показывают исследования, существенная доля аварийных отключений СТ в ЭЭС в северных широтах, может быть отнесена к отключениям в результате воздействия ГИТ.

В связи с этим возникает необходимость в проведении исследований влияния геоиндуцированных токов на работу силовых трансформаторов в составе ЭЭС. Поскольку опасность могут представлять не только интенсивные ГИТ, способные непосредственно повредить силовые трансформаторы, но и менее интенсивные ГИТ, достаточные для создания дефицита реактивной мощности, что может спровоцировать развитие системной аварии или крупного технологического нарушения в электрической сети с отключением большого объема потребителей, – то тема магистерской диссертации носит актуальный характер.

Итак, основными элементами ЭЭС, подверженными воздействию ГИТ, являются силовые трансформаторы и автотрансформаторы (АТ) с глухозаземлёнными нейтральными. Особенно восприимчивы к воздействию ГИТ трёхфазные четырёх- и пятистержневые, а также однофазные СТ и АТ [5], [54].

Негативное влияние ГИТ на силовые трансформаторы помимо теплового воздействия на трансформатор вызывает появление гармоник в токе намагничивания трансформатора и возрастание потребления реактивной мощности. Воздействие ГИТ приводит к многократному возрастанию несинусоидальных токов намагничивания.

Целью магистерской диссертации является оценка негативного влияния геоиндуцированных токов на работу силовых трансформаторов в составе ЭЭС.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) Анализ механизма протекания геоиндуцированных токов через заземленные нейтрали трансформаторов. Анализ негативных последствий влияния геоиндуцированных токов на работу силовых трансформаторов.

- 2) Исследование теплового режима силового трансформатора при воздействии геоиндуцированного тока.

- 3) Исследование возникающих гармоник тока и реактивной мощности силового трансформатора при воздействии геоиндуцированного тока.

1 Анализ проблем, возникающих при воздействии геоиндуцированных токов на ЭЭС. Расчет геоиндуцированных токов

1.1 Общее представление о проблемах, возникающих при воздействии геоиндуцированных токов на ЭЭС

Когда силовой трансформатор подвергается воздействию постоянного тока, в сердечнике возникает дополнительный однонаправленный магнитный поток от постоянного тока. Величина этого потока зависит от величины постоянного тока, числа витков обмоток, по которым протекает постоянный ток, и магнитного сопротивления на пути этого потока. В результате магнитный поток, связанный с постоянным током, нелинейным образом взаимодействует с магнитным потоком, связанным с переменным током. Режим работы силовых трансформаторов (СТ) и автотрансформаторов (АТ) существенно изменяется, его магнитная система переходит в режим насыщения. Ток намагничивания СТ при этом приобретает несинусоидальность с ярко выраженной полупериодной несимметрией [7], [10], [59].

При переходе СТ в режим насыщения магнитной системы возрастает потребление реактивной мощности СТ, они становятся источником высших гармоник.

Протекание ГИТ приводит также к изменению теплового режима СТ. Параметры теплового режима СТ могут превысить нормативные значения. В результате сильного насыщения увеличивается тепловая мощность, рассеиваемая в обмотках и баке СТ, приводя к повышенному нагреву СТ, ускорению процесса старения изоляции и влияя на срок службы оборудования. В случае значительного тока подмагничивания дополнительное количество теплоты может вызвать повышение температуры наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки сверх критического значения (140–160 °С), вызывая разложение изоляции и масла с образованием пузырьков газа и снижая электрическую прочность изоляции. С увеличением концентрации влаги в изоляции

(свыше 2 %) критическая температура снижается [6].

При этом дополнительный нагрев СТ при протекании ГИТ обусловлен как увеличением тепловых потерь в обмотках (основные и вихревые потери), так и в баке (вихревые потери).

Несинусоидальность тока намагничивания приводит к появлению гармоник в ЭЭС. Гармонический анализ тока намагничивания является важной задачей. В режиме насыщения ток намагничивания становится импульсом короткой длительности с высоким пиком. Длительность этого импульса находится в пределах от $1/6$ до $1/10$ периода. Короткая продолжительность импульса тока намагничивания приводит к значительным амплитудам как гармоник низкого, так и высокого порядка. Высокие уровни гармоник 2-го порядка могут создать ошибочное воздействие на дифференциальные реле, настроенные на низкий уровень содержания 2-ой гармоники, чтобы различать начальные броски тока и условие аварии. Гармоники 3-го порядка могут вызвать срабатывание реле, приводящее к отключению линий электропередачи во время воздействия ГИТ, создавая неустойчивость сети и отключения в системе [32].

В работе [32] проанализированы случаи воздействия ГИТ на СТ и ЭЭС.

Один из них связан с броневым трансформатором, повышающим генераторное напряжение и принадлежащим компании PSE&G (Public Service Electric and Gas Company) в штате Нью-Джерси, США, который испытал значительный перегрев проводников обмотки низкого напряжения (НН) во время явления К9 13 марта 1989 г. Неделями позже трансформатор был выведен из работы из-за значительного газообразования. Трансформаторы такой же конструкции в том же местоположении испытали похожий перегрев, хотя и меньшего уровня. Это были старые трансформаторы броневых типа, которые имели старую конструкцию проводников обмоток, что сделало их подверженными перегреву.

Другой случай – это броневой трансформатор, у которого нагревались стенки бака во время того же явления. В таких трансформаторах имеются де-

ревянные брусья, расположенные между сердечником и стенками бака. Когда сердечник проходит через насыщение в пределах полупериода, часть магнитного потока сердечника и потока рассеяния проходит через стенку бака, вызывая местные вихревые потери в баке. Будучи закрытыми деревянными брусьями, эти области трансформатора перегревались. Повышение температуры привело к обесцвечиванию окраски бака в областях бака, находящихся напротив деревянных брусьев. Новые конструкции позволяют исправить охлаждение стенок бака в этих областях.

В источнике [42] сообщается, что в течение 2-х лет, начиная с вызвавшего ГИТ явления 1989 г., 11 АЭС испытали отказы нескольких повышающих генераторное напряжение трансформаторов. В течение этого периода ряд из этих отказов был изучен и было установлено, что они были вызваны работой в режиме обратного питания. В этом режиме работы трансформаторы, повышающие генераторное напряжение, недостаточно защищены от коммутационных и молниевых неблагоприятных воздействий, и электрическое демпфирование в электрической цепи является очень медленным, делая их подверженными переходным перенапряжениям

Значительный перегрев обмоток нескольких силовых трансформаторов с большими сердечниками произошел в ЮАР во время периода между 2003 г. и 2004 г. Было установлено, что эти случаи связаны с перегревом обмоток, вызванным явлением образования проводящего сульфида меди, вызывающего отказы трансформаторов по всему миру. Это было отнесено к высокому содержанию серы в некоторых типах трансформаторного масла во время этого периода. Вероятно, что увеличение температуры обмоток, вызванное ГИТ, могло ускорить образование сульфида меди в обмотках этих трансформаторов.

Указывается на ряд мощных силовых трансформаторов на напряжение 400 кВ в южной Швеции, которые подверглись высоким уровням ГИТ в октябре 2003 г. во время появления ГИТ. Не сообщается о каких-либо повреждениях трансформаторов, включая трёхфазный пятистержневой трансфор-

матор, который подвергся, по оценке, ГИТ с пиковым значением 330 А в нейтрали. Сообщается, что произошёл перерыв в электроснабжении в течение 20-50 минут в регионе Мальме, вызванный отключением линии передачи 130 кВ в результате срабатывания реле, которое имело более высокую чувствительность к 3-ей гармонике, чем к колебаниям основной частоты.

Насыщение сердечника в пределах одного полупериода связано с узким импульсом тока намагничивания большой амплитуды в течении периода. Это приводит к потреблению больших значений реактивной мощности в системе, вызывая искажения напряжения системы. С другой стороны, узкий импульс тока заставляет ёмкостные элементы системы такие, как статические компенсаторы реактивной мощности и т.п., увеличивать свои токи, в результате чего они могут стать перегруженными и отключиться, вызывая неустойчивость сети. Кроме того, импульс тока намагничивания приводит к появлению высших гармоник, и, как результат, может произойти резонанс, и устойчивость сети может оказаться под вопросом [49].

Итак, воздействие ГИТ связано с насыщением сердечников трансформаторов и появлением импульсов тока намагничивания с высоким пиком в течение короткого времени. При этом возможны явления перегрева трансформаторов и возникновения системной неустойчивости из-за высоких значений реактивной мощности и значительного уровня гармоник тока.

1.2 Механизм протекания геоиндуцированных токов через заземленные нейтрали трансформаторов

Механизм протекания геоиндуцированных токов через заземленные нейтрали трансформаторов показан на рисунке 1, где $E_{\text{инд}}$ – ЭДС, наведенная в проводах воздушной линии электропередачи (ВЛЭП).

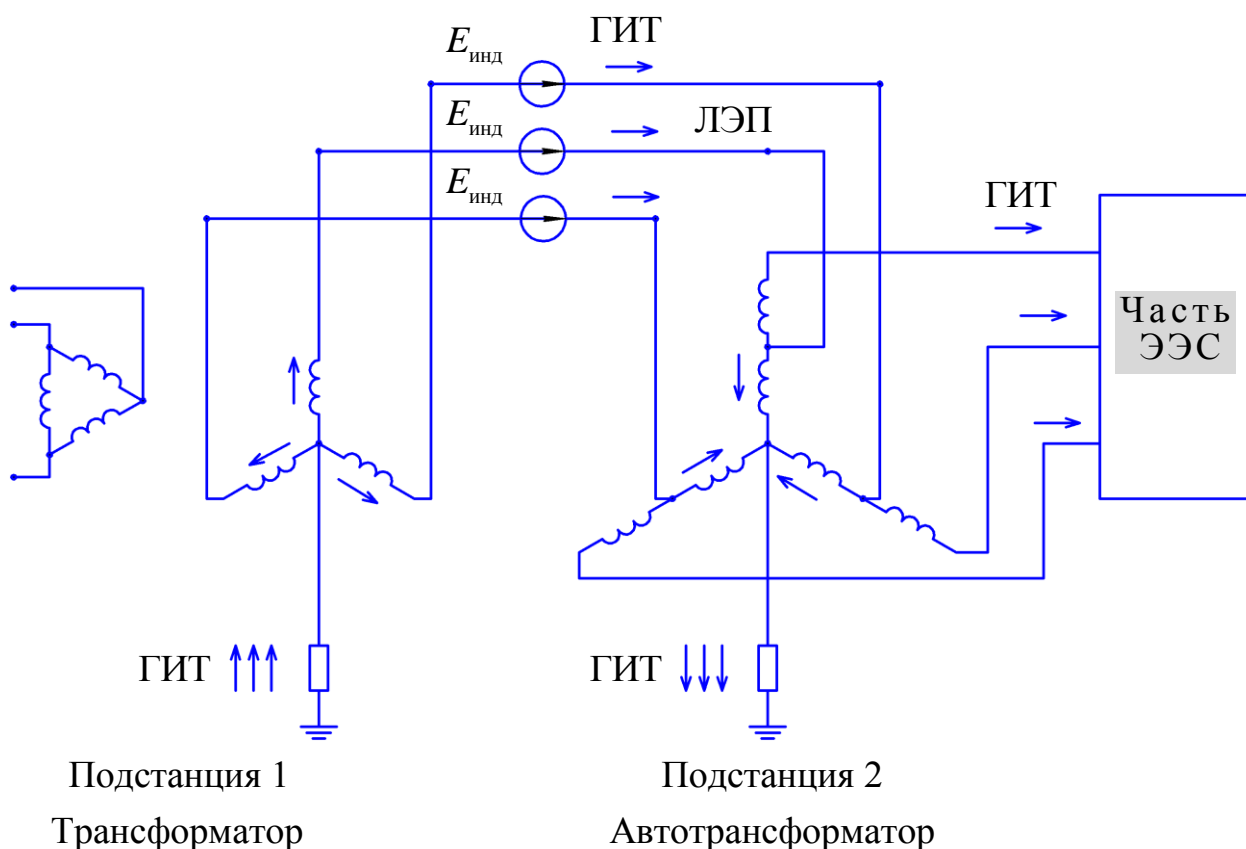


Рисунок 1– Механизм протекания геоиндуцированных токов через заземленные нейтрали трансформаторов

Солнечная активность приводит к возмущениям в магнитосфере Земли – геомагнитным возмущениям (ГМВ). Сильные геомагнитные возмущения называются геомагнитными бурями (ГМБ) [51]. Возмущения геомагнитного поля индуцируют на поверхности Земли квазистационарные электрические поля напряженностью 1 – 20 В/км.

В результате в проводах ВЛЭП наводится (индуцируется) квазипостоянная ЭДС. Если воздушная линия соединяет трансформаторные подстанции (ТП) с трансформаторами, у которых обмотки, связанные с рассматриваемой ВЛЭП, соединены в звезду с глухозаземленной нейтралью, то в образованном замкнутом контуре «провода ВЛЭП – обмотки левого трансформатора – земля – обмотки правого трансформатора» возникнет квазипостоянный ток. Этот ток носит название «геоиндуцированный ток» (ГИТ). Путь протекания ГИТ между двумя ТП показан на рисунке 1.

ГИТ считаются квазипостоянными токами по отношению к токам про-

мышленной частоты 50 (60) Гц по причине их весьма низкой частоты, которая составляет от 0,1 мГц до 1 Гц. С точки зрения моделирования воздействия ГИТ на ЭЭС токи ГИТ можно считать постоянными токами.

Наиболее сильные ГМБ возникают примерно каждые 11 лет. Помимо воздействия на ВЛЭП ГМБ вызывают также проблемы в случае протяженных трубопроводов и линий связи (информационных линий) [27].

Наблюдаемые значения ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов в годы со средней геомагнитной активностью достигают 100 А и более, а в годы с высокой геомагнитной активностью могут превышать 200 А. Указанные значения соответствуют токам $100/3=33,3$ А и $200/3=66,7$ А в фазном проводе.

При насыщении трансформатора влияние магнитного потока в сердечнике, связанного с постоянным током, зависит от магнитного сопротивления на пути этого магнитного потока [52]. Оказывается, что влияние магнитного потока, связанного с постоянным током, в трёхфазном трёхстержневом трансформаторе будет наименьшим среди всех типов сердечника. Это происходит в следствие того, что эта конструкция сердечника даёт на порядки более высокое магнитное сопротивление для магнитодвижущей силы, создаваемой постоянным током, в магнитной цепи сердечник – бак. В случае сердечника данного типа постоянный магнитный поток должен проходить по пути с очень большим магнитным сопротивлением от верхнего ярма сердечника к крышке бака, через стенки бака и возвращаться в нижнее ярмо опять по пути с большим магнитным сопротивлением из дна бака. Сердечники других типов трансформаторов обеспечивают много меньшее магнитное сопротивление для постоянной магнитодвижущей силы, т.к. путь возврата для этого постоянного магнитного потока проходит через сердечник, который имеет на порядки более высокую магнитную проницаемость.

Воспользуемся однофазной схемой замещения для расчета связи между напряжённостью электрического поля и токами ГИТ, которая приводится на рисунке 2.

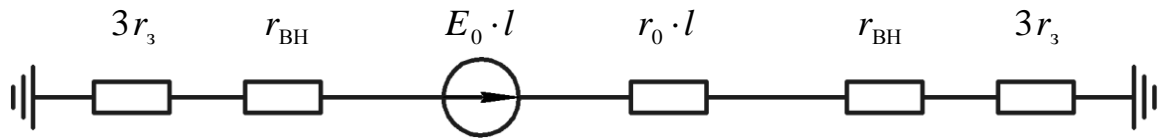


Рисунок 2– Однофазная схема замещения

На рисунке введены следующие обозначения:

r_3 – сопротивление заземления трансформатора (Ом);

$r_{\text{ВН}}$ – активное сопротивление обмотки высокого напряжения (ВН) трансформатора (Ом);

r_0 – погонное активное сопротивление воздушной линии электропередачи;

l – длина воздушной линии электропередачи (км);

$r_0 \cdot l$ – активное сопротивление воздушной линии электропередачи (Ом);

E_0 – напряжённость электрического поля (В / км);

$E_0 \cdot l$ – постоянная ЭДС.

Применяя второй закон Кирхгофа к изображённой цепи, получаем:

$$E_0 \cdot l = (r_0 \cdot l + 2(r_{\text{ВН}} + 3r_3))i_{\text{ГИТ}}. \quad (1)$$

Из формулы (1) видим, что напряжённость электрического поля и ток ГИТ пропорциональны между собой. Для отношения $\frac{E_0}{i_{\text{ГИТ}}}$ имеем:

$$\frac{E_0}{i_{\text{ГИТ}}} = f(l) = r_0 + \frac{2(r_{\text{ВН}} + 3r_3)}{l} \quad (2)$$

Отношение $\frac{E_0}{i_{\text{ГИТ}}}$ является функцией длины воздушной линии электро-

передачи: $\frac{E_0}{i_{\text{ГИТ}}} = f(l)$. При неограниченном возрастании длины воздушной линии это отношение стремится к погонному активному сопротивлению воздушной линии:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \frac{E_0}{i_{\text{ГИТ}}} = r_0. \quad (3)$$

Таким образом, при больших длинах воздушной линии основное влияние на величину тока ГИТ при заданной напряжённости электрического поля оказывает погонное активное сопротивление воздушной линии.

1.3 Анализ негативных последствий влияния геоиндуцированных токов на работу силовых трансформаторов

Исследования, посвященные воздействию геоиндуцированных токов (ГИТ) на электроэнергетические системы (ЭЭС), проводятся во многих странах мира [29], [38], [41], [44] [45], [50]. Среди европейских стран, в первую очередь, следует отметить Швецию и Финляндию [40]. В Западном полушарии особое внимание исследованию влияния геомагнитных возмущений (ГМВ) на работу ЭЭС уделяют США и Канада.

Североамериканская корпорация по вопросам надежности электроснабжения (North American Electric Reliability Corporation (NERC)) к настоящему времени выпустила ряд руководств, например, [47], [48], [49], в которых рассматривается связь геомагнитных возмущений с работой ЭЭС, а также меры и мероприятия по проработке возможных негативных воздействий ГИТ на отдельное оборудование и систему в целом. NERC – это международный некоммерческий регулирующий орган, задача которого состоит в том, чтобы обеспечить надежность работы мощных объединенных ЭЭС. NERC разрабатывает и обеспечивает соблюдение стандартов надежности ЭЭС; ежегодно оценивает надежность ЭЭС; обучает и сертифицирует персо-

нал отрасли. Область ответственности NERC охватывает территории Соединенных Штатов Америки, Канады и Мексики. Пристальное внимание NERC к вопросам обеспечения надежности и бесперебойности электроснабжения при геомагнитных возмущениях свидетельствует о важности данной проблемы и актуальности исследований в этой области.

Исследование воздействия ГМВ на ЭЭС включает следующие аспекты:

1) Проработка направлений необходимых исследований, способов включения эффектов воздействия ГИТ в процедуры оценивания надежности систем. Анализ допустимых приближений для учета сложных явлений, а также необходимых данных для получения обоснованных результатов.

2) Моделирование трансформаторов и автотрансформаторов разных типов в условиях действия ГИТ, когда реализуется режим глубокого насыщения магнитной системы СТ. Расчет токов намагничивания, потребляемой трансформатором реактивной мощности. Гармонический анализ токов и анализ тепловой реакции трансформатора на ГИТ.

3) Расчет ГИТ, возникающих во время сильных ГМВ. Необходимость серьезной теоретической базы для такого расчета.

4) Разработка мер и мероприятий для снижения негативного эффекта воздействия ГИТ на ЭЭС. Эти меры должны быть адаптированы к тем исследованиям, что были проведены для оценки влияния ГИТ.

Негативное влияние ГИТ сказывается как на отдельных видах оборудования электрической сети, так и на всей системе в целом. Для трансформатора ГИТ является квазипостоянным током (КПТ) током подмагничивания и при больших значениях переводит СТ в режим глубокого насыщения, значительно уменьшая сопротивление намагничивания трансформатора. Потребление реактивной мощности трансформатором резко возрастает, в сети появляются гармоники тока значительной амплитуды.

В этой связи можно выделить следующие направления исследования надежности работы ЭЭС (на уровне отдельных элементов и на уровне системы в целом):

1) Анализ поведения системы в целом в условиях возрастания потребления реактивной мощности. Здесь следует рассматривать вероятные недопустимые снижения напряжения в узлах системы, потенциальную возможность возникновения лавины напряжения и последовательных отключений. Более того, система должна работать в заданных пределах и при параллельном возникновении наряду с ГИТ аварийных ситуаций типа отключений компенсаторов реактивной мощности или коротких замыканий (КЗ).

2) Анализ теплового воздействия на трансформаторы. Наибольшую озабоченность вызывает значительное увеличение температуры наиболее нагретой точки (ННТ) трансформатора во время сильного ГМВ. При длительном воздействии ГИТ следует исследовать и общее тепловыделение в СТ в целом.

3) Анализ поведения средств релейной защиты и автоматики (РЗА) в терминах безопасности и надежности. Ложные срабатывания РЗА возможны при наличии в сети гармонических составляющих тока помимо основной гармоники промышленной частоты.

По отношению к токам промышленной частоты токи ГИТ можно считать квазипостоянными. Однако при рассмотрении процессов на длительном интервале времен, особенно тепловых процессов в СТ, важными являются временные зависимости геоэлектрического поля (ГЭП) и соответствующие параметры – максимальные (пиковые) мгновенные значения, длительность, ориентация, форма кривой геоэлектрического поля. Геоэлектрическое поле рассчитывают с помощью метода плоских волн [46] и используют для нахождения ЭДС в линиях электропередачи (ЛЭП), которые затем вводят в схему замещения электрической сети на постоянном токе. При расчете геоэлектрического поля важным является моделирование земли, правильный учет ее сопротивления.

Важность временных зависимостей геоэлектрического поля и рассчитанных на их основе временных зависимостей ГИТ для анализа тепловых процессов в СТ вытекает из того, что тепловой отклик трансформатора не

является мгновенным, а носит инерционный характер. Нагрев различных частей СТ происходит с определенными постоянными времени, а, следовательно, процесс нагрева зависит от предыстории и скорости изменения ГЭП.

Во многих случаях ограничиваются исследованиями, в которых задаются ГЭП определенной неизменной величины и направления. Это значительно упрощает расчеты. В случае нахождения реактивной мощности, потребляемой трансформаторами, и распределения потоков мощности в системе это допущение является вполне оправданным, т.к. процесс увеличения потребляемой реактивной мощности можно считать происходящим практически мгновенно, т.е. квазибезынерционным. Такой подход позволяет определить наихудшие сценарии для резервов реактивной мощности, предельных снижений напряжения, аварийных ситуаций и оценить смягчающие меры для предельных значений напряженности ГЭП. Все это дает возможность проработать вопросы потери устойчивости системы в условиях дефицита реактивной мощности, особенно сопряженного с КЗ и отключениями устройств компенсации реактивной мощности, и развития лавины напряжения или выхода за ограничения по условиям эксплуатации для передаваемой мощности.

Анализ с ГИТ неизменной величины используется и в случаях изучения тепловых процессов и возникающих в сети гармоник тока, что позволяет установить предельные значения анализируемых величин и оценить, например, температурный режим ННТ трансформатора или уязвимость оборудования к появлению гармоник. В последнем случае речь идет о средствах РЗА, генераторах, батареях конденсаторов (БК) и сложных электронных системах, используемых в сетях передачи электроэнергии, – вставках постоянного тока, статических компенсаторах реактивной мощности (СКРМ). Здесь оцениваемыми величинами являются коэффициент искажения синусоидальности (суммарный коэффициент нелинейных искажений) и уровни отдельных гармоник.

На величину ГЭП и связанные с ним ГИТ в ЛЭП на определенной территории значительное влияние оказывает используемая модель земли. В

США созданием однородно-слоистых моделей земли для континентальной части США занимаются Геологическая служба США и корпорация Метатех (Metatech Corporation).

Таким образом, моделирование разных сторон негативного воздействия ГИТ на ЭЭС включает следующие модели:

1) Модели Земли.

2) Модели потерь реактивной мощности. Эти модели различаются для разных типов трансформаторов: однофазных, трехфазных пятистержневых и трехфазных трехстержневых СТ.

3) Модели для нахождения гармоник тока. Для этих моделей характерна чувствительность к точности задания параметров трансформатора.

4) Модели температурного режима ННТ СТ. Для таких моделей необходима верификация для конкретных трансформаторов.

5) Модели сети на постоянном токе. Эти модели необходимы для вычисления ГИТ и требуют знания сопротивлений ЛЭП, обмоток СТ и сопротивлений заземляющих устройств на подстанциях. Зачастую сопротивления заземляющих устройств содержат значительные ошибки. Достаточно сложно задать подходящие значения без проведения прямых измерений на подстанциях.

При поведении обследования ЭЭС в связи с анализом воздействия ГИТ следует обращать внимание на следующие факторы:

1) Отключения БК.

2) Отключения устройств FACTS (Flexible AC Transmission Systems – гибкие (адаптивные) системы передачи электроэнергии переменным током), таких как статические компенсаторы реактивной мощности или вставки постоянного тока.

3) Падения или колебания напряжения величиной более 1 %, которые явно связаны с событиями ГМБ.

4) Отключения генераторов.

5) Неожиданное накопление выделившихся газов в трансформаторах

после событий ГМВ.

Первичный анализ включает следующие шаги:

1) Определить расчетную максимальную величину напряженности ГЭП для географической местности, где расположена электрическая система.

2) Рассчитать токи ГИТ, используя схему замещения системы на постоянном токе. Оценить потери реактивной мощности в трансформаторах.

3) Выполнить анализ потоков мощности для нормальных нагрузок системы и для утяжеленных нагрузок. Параллельные отключения источников реактивной мощности в виде БК и СКРМ (с защитой) должны рассматриваться как возможные аварийные ситуации во время ГМВ. Можно получить утяжеленные оценки, если принять все трансформаторы однофазными.

4) Проверить, что тепловое воздействие на СТ находится в допустимых пределах.

Если падения напряжения превышают 3 % в условиях нормальных отключений или не выполняются тепловые ограничения на работу трансформаторов, то требуется выполнить более детальные исследования.

1.4 Анализ проблем, возникающих при воздействии геоиндуцированных токов на ЭЭС

1.4.1 Анализ поведения системы в условиях возрастания потребления реактивной мощности

Одним из последствий воздействия ГИТ на силовые трансформаторы с заземленными нейтралями является увеличение реактивной мощности, потребляемой трансформатором, из-за перехода трансформатора в режим насыщения магнитной системы [56]. Величина реактивной мощности, обусловленная воздействием ГИТ, сильно зависит от конструкции магнитного сердечника трансформатора. При этом различают следующие типы трансформаторов: 1) однофазные, 2) трехфазные броневого, 3) трехфазные трехстержневые, 4) трехфазные пятистержневые. Помимо типа трансформатора

на величину реактивной мощности влияют и другие факторы: конструкция бака СТ, свойства ферромагнитных материалов и др. Точные расчеты воздействия ГИТ на насыщение СТ должны учитывать все эти факторы. Однако существуют упрощенные линейные зависимости добавочной реактивной мощности от величины ГИТ, определяемые только типом трансформатора.

Для нахождения реактивной мощности, потребляемой трансформаторами, и распределения потоков мощности в системе обычно задаются максимальным значением напряженности геоэлектрического поля для географической местности, где расположена электрическая система, т.к. процесс увеличения потребляемой реактивной мощности можно считать происходящим практически мгновенно, т.е. квазибезынерционным. Такой подход позволяет определить наихудшие сценарии для резервов реактивной мощности, предельных снижений напряжения, аварийных ситуаций и оценить смягчающие меры. Это дает возможность проработать вопросы потери устойчивости системы в условиях дефицита реактивной мощности, особенно сопряженного с КЗ и отключениями устройств компенсации реактивной мощности, и развития лавины напряжения или выхода за ограничения по условиям эксплуатации для передаваемой мощности.

Анализ потоков мощности проводят как для нормальных нагрузок системы, так и для утяжеленных нагрузок. Параллельные отключения источников реактивной мощности в виде БК и СКРМ (с защитой) должны рассматриваться как возможные аварийные ситуации во время ГМВ.

1.4.2 Тепловое воздействие на трансформаторы

Во время работы СТ в металле обмоток, электротехнической стали магнитной системы и в массивных конструктивных элементах из конструкционной стали возникают потери энергии, выделяющиеся в виде тепла. Часть тепла идет на их нагревание, а другая часть отводится в окружающую среду. При насыщении магнитной системы увеличиваются потоки рассеяния и токи намагничивания. В металлических частях возникают дополнительные добавочные потери активной мощности от вихревых токов, приводящие к допол-

нительному нагреву. Нормы нагрева конструктивных элементов силовых трансформаторов устанавливаются, исходя из допустимых температур изоляционных материалов, соприкасающихся с их металлическими частями [13], [15], [26]. Главным риском является снижение электрической прочности вследствие образования пузырьков газа.

О важности анализа теплового воздействия ГИТ на силовые трансформаторы свидетельствует появление стандарта IEEE Std C57.163-2015 «IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances» [34], который, в частности, регламентирует максимально допустимые значения температуры элементов трансформатора при воздействии ГИТ (см. также [33],[35]). В стандарте даны рекомендуемые максимально допустимые значения температуры наиболее нагретых точек при воздействии ГИТ – для целлюлозной изоляции и для конструктивных элементов.

Для целлюлозной изоляции указаны следующие значения:

- продолжительный ГИТ (base GIC) – 140 °С,
- кратковременный ГИТ (стандарт IEEE) – 180 °С,
- кратковременный ГИТ (стандарт IEC) – 160 °С.

Для конструктивных элементов имеем:

- продолжительный ГИТ (base GIC) – 160 °С,
- кратковременный ГИТ (стандарт IEEE) – 200 °С,
- кратковременный ГИТ (стандарт IEC) – 180 °С.

Дано замечание, что для трансформаторов с неулучшенной бумажной изоляцией максимально допустимые значения температуры наиболее нагретой точки обмоток должны быть на 15 °С ниже, чем для трансформаторов с улучшенной бумажной изоляцией.

Указанные предельные значения являются рекомендациями. Их цель – обеспечить обоснованные значения для скорости старения изоляции и предотвратить образование пузырьков газа в минеральном трансформаторном масле.

1.4.3 Уязвимость оборудования ЭЭС к появлению гармоник

Воздействие ГИТ приводит к сильному насыщению магнитной системы силовых трансформаторов, в результате чего происходит многократное возрастанию несинусоидальных токов намагничивания. Характерной чертой несинусоидальности является полупериодная несимметрия кривой тока. СТ становится источником высших гармоник.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока определяется аналогично суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения, который введен в ГОСТе 32144-2013 [14] в виде «отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей». В ГОСТе 13109-97 [12] эта величина называлась «коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения».

В англоязычной литературе для характеристики нелинейных искажений используется коэффициент THD (Total Harmonic Distortion) – суммарный коэффициент гармонических искажений, причем стандарт IEEE Std 1459-2010 определяет как суммарный коэффициент гармонических искажений по напряжению, так и суммарный коэффициент гармонических искажений по току.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока задается формулой:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} = \sqrt{\sum_{n \neq 1} \left(\frac{I_{(n)}}{I_{(1)}} \right)^2}, \quad (4)$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение основной составляющей тока; $I_{(n)}$ – действующее значение гармоники тока с номером n .

Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока в процентах K_I % дается формулой:

$$K_I \% = K_I \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100 = \sqrt{\sum_{n \neq 1} \left(\frac{I_{(n)}}{I_{(1)}} \right)^2} \cdot 100. \quad (5)$$

В частотном спектре насыщенных трансформаторов присутствуют значительные гармоники как четного, та и нечетного порядка. Эти гармонические составляющие трансформатор привносит в ЭЭС, в которую он включен. В результате в системе возможны ложные срабатывания релейной защиты, перегрузка батарей конденсаторов, перегрев роторов генераторов.

1.4.5 Гибкие (адаптивные) системы передачи электроэнергии переменным током (FACTS)

Гибкая (адаптивная, управляемая) система передачи переменного тока (англ. FACTS) – это основанная на силовой электронике и других элементах система, обеспечивающая контроль за одним или более параметрами системы передачи переменного тока для повышения управляемости и увеличения передаваемой мощности. Аббревиатура FACTS расшифровывается как Flexible Alternating Current Transmission System [25].

Среди устройств FACTS выделяют следующие [53]:

Базовым элементом статических устройств FACTS является статический компенсатор реактивной мощности СТАТКОМ (Static Synchronous Compensator – SSC или STATCOM). СТАТКОМ изготавливается на основе преобразователей напряжения, выполненных на базе современных мощных IGBT транзисторов (Insulated-gate bipolar transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором БТИЗ). СТАТКОМ обеспечивает генерацию и потребление реактивной мощности в диапазоне $\pm 100\%$ установленной мощности устройства без дополнительных силовых реакторов и конденсаторных батарей.

Статический тиристорный компенсатор реактивной мощности СТК (Static Var Compensator – SVC) подключается параллельно и служит либо источником, либо приемником реактивной мощности, выход которого настроен

таким образом, чтобы обмениваться с сетью емкостным или индуктивным током для поддержки или управления отдельными параметрами внешней ЭЭС (обычно это напряжение сети). СТК обеспечивают регулирование напряжения в линиях электропередачи, повышают устойчивость и пределы передаваемой мощности. Применяются в магистральных сетях.

Управляемый шунтирующий реактор УШР (Controlled Shunt Reactor – CSR) представляет собой оборудование, предназначенное для компенсации реактивной мощности и стабилизации уровня напряжения в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения классов 35-750 кВ. УШР обеспечивают плавную регулировку изменением индуктивного сопротивления.

1.5 Расчет геоиндуцированных токов

1.5.1 Схема расчета геоиндуцированных токов

На рисунке 3 дана схема расчета ГИТ. Расчет ГИТ включает два этапа: 1) геофизический и 2) инженерный электроэнергетический.

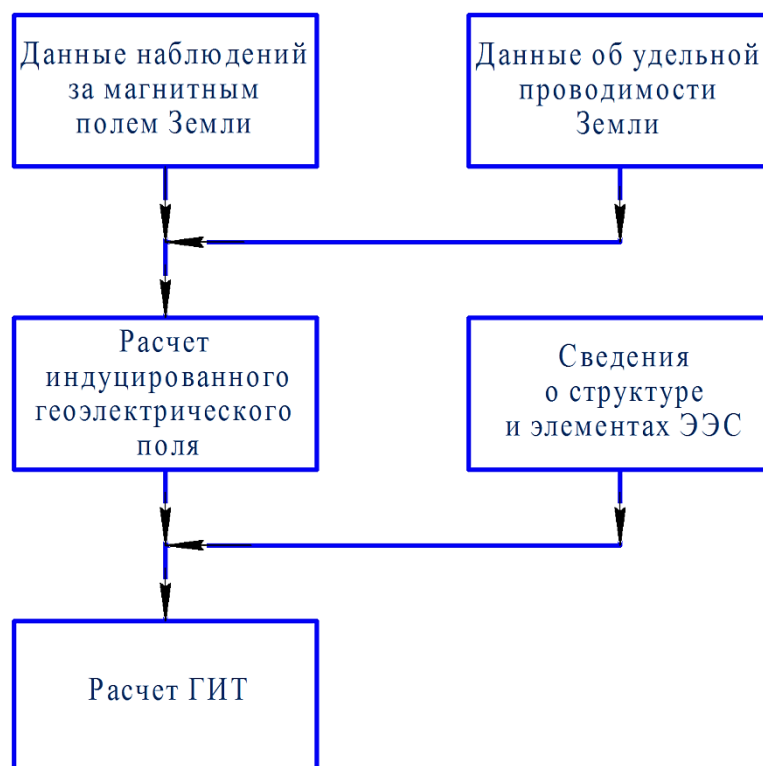


Рисунок 3– Схема расчета геоиндуцированных токов

На первом этапе проводится расчет индуцированного геоэлектрического поля вблизи поверхности Земли. Исходными данными для геофизического этапа являются данные многолетних наблюдений за магнитным полем Земли, особенно в периоды геомагнитных возмущений, и данные об удельной проводимости верхних слоев Земли. Наблюдения за магнитным полем Земли ведутся как наземными геомагнитными обсерваториями, так и, в последние десятилетия, искусственными спутниками Земли. Первый этап расчета индуцированного геоэлектрического поля вблизи поверхности Земли является независимым от структуры и параметров технических систем, созданных человеком.

Геоэлектрическое поле вблизи поверхности Земли наводит в протяженных металлических структурах геоиндуцированные токи. Для расчета ГИТ в ЛЭП на втором этапе необходимы сведения о структуре и элементах ЭЭС: о трансформаторах и автотрансформаторах с заземленными нейтралями, о параметрах ЛЭП, о сопротивлениях заземления подстанций. Расчет ГИТ ведется для схемы замещения ЭЭС на постоянном токе с использованием методов расчета цепей постоянного тока.

Далее блоки на рисунке 3 рассматриваются более подробно.

1.5.2 Данные наблюдений за магнитным полем Земли

Наблюдения за магнитным полем Земли ведут наземные геомагнитные обсерватории [58], где осуществляется непрерывная регистрация временных изменений магнитного поля Земли. Изменения магнитного поля регистрируются при помощи самопишущих приборов, которые дают непрерывную запись вариаций в виде кривых. Оцифрованные данные имеют разрешение – 1 минута или меньше. Измерения ведутся для трех составляющих магнитного поля (B_x – составляющая в северном направлении, B_y – составляющая в восточном направлении, B_z – составляющая, направленная вертикально). Записанные данные наблюдений отдельных обсерваторий собираются вместе, чтобы получить представление о глобальном магнитном поле Земли.

В настоящее время в разных странах насчитывается около 200 постоянно действующих магнитных обсерваторий. Расположение геомагнитных обсерваторий показано на рисунке 4. Больше всего обсерваторий находится в США. Российские специалисты в области геомагнитных наблюдений полагают [17]: поскольку Россия расположена ближе к магнитному полюсу и в три раза превосходит США по площади, в России желательно иметь порядка 30 магнитных обсерваторий (сейчас их восемь). Они должны быть расположены преимущественно в северных районах. Это малообитаемые зоны, что вызывает трудности для развития таких обсерваторий.



Рисунок 4— Расположение геомагнитных обсерваторий

Постоянный мониторинг магнитного поля с 1999 г. проводится также низкоорбитальными спутниками Земли. Группировка таких спутников позволяет получать высокоточные данные наблюдений за магнитным полем, что обеспечивает расширенные возможности для понимания источников, которые вносят вклад в магнитное поле Земли.

1.5.3 Данные об удельной проводимости верхних слоев Земли

Удельная проводимость Земли играет значительную роль в возникновении геоэлектрического поля. Следовательно, адекватные данные об удельной проводимости верхних слоев Земли весьма важны для расчетов этого по-

ля. Значения ГИТ больше в тех регионах, где проводимость ниже, а сопротивление выше. Для описания проводимости Земли применяются различные модели.

Самая простая модель, когда для всей толщи верхних слоев Земли задается некоторое среднее значение удельной проводимости, является достаточно грубой. Широкое распространение получила так называемая одномерная (1D) слоистая модель (см. рисунок 5). Более точными являются двухмерная (2D) и трехмерная (3D) модели земной проводимости, т.к. верхние области Земли редко бывают одномерными с точки зрения удельной проводимости. В зоне расположения электрической сети могут находиться морское побережье или горные породы. Именно 3D модель обеспечивает близкое соответствие между рассчитанными и измеренными ГИТ.

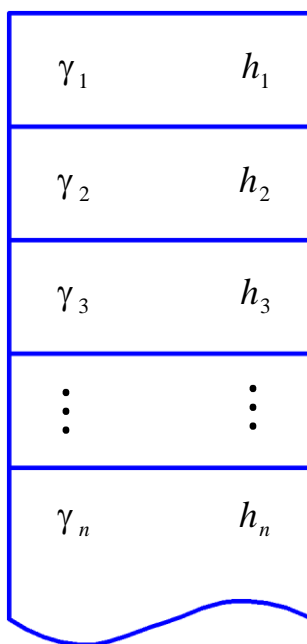


Рисунок 5– Слоистая модель Земли

Удельная проводимость входит в выражения для волнового сопротивления, которое связывает между собой напряженности электрического и магнитного полей. В случае одномерной 1D модели для каждого слоя имеем:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_B \\ -Z_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{H}_x \\ \dot{H}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} 0 & Z_B \\ -Z_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_x \\ \dot{B}_y \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где \dot{E}_x, \dot{E}_y – комплексные (амплитудные или действующие) значения составляющих напряженности электрического поля вдоль осей x (северное направление) и y (восточное направление); \dot{H}_x, \dot{H}_y – комплексные значения составляющих напряженности магнитного поля вдоль осей x и y ; \dot{B}_x, \dot{B}_y – комплексные значения составляющих магнитной индукции вдоль осей x и y ; Z_B – волновое сопротивление данного слоя; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м – магнитная постоянная; магнитную проницаемость слоя полагают равной единице $\mu = 1$.

Волновое сопротивление Z_B определяется по формуле:

$$Z_B = \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0}{2\gamma}} (1 + j) = \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0}{\gamma}} e^{j45^\circ} = \sqrt{\frac{j\omega \mu \mu_0}{\gamma}}, \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитной волны; γ – удельная проводимость слоя; j – мнимая единица.

Видим, что модуль волнового сопротивления нелинейно возрастает с увеличением как частоты, так и удельного сопротивления. Зависимость от удельного сопротивления означает, что ЭЭС, расположенные над менее проводящими слоями Земли, более подвержены воздействию ГИТ.

В случае трехмерной 3D модели волновое сопротивление представляет собой тензор, и вместо (6) имеем:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{H}_x \\ \dot{H}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_x \\ \dot{B}_y \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ – компоненты тензора волнового сопротивления.

1.5.4 Расчет индуцированного геоэлектрического поля

Расчет результирующего комплексного сопротивления, связывающего между собой напряженности электрического и магнитного полей на поверхности Земли проводят на основе рекуррентных соотношений, аналогичных соотношениям из теории длинных линий, когда каждый слой имеет свою постоянную распространения. В результате, например, для одномерной модели получаем соотношения, аналогичные (6):

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z \\ -Z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{H}_x \\ \dot{H}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} 0 & Z \\ -Z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_x \\ \dot{B}_y \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где \dot{E}_x , \dot{E}_y , \dot{H}_x , \dot{H}_y , \dot{B}_x , \dot{B}_y – соответствующие составляющие полей уже на поверхности Земли; Z – комплексное сопротивление (импеданс) земной поверхности.

Все величины, входящие в (9), имеют зависимость от частоты:

$$\dot{E}_x(\omega) = Z(\omega) \dot{H}_y(\omega), \quad \dot{E}_y(\omega) = -Z(\omega) \dot{H}_x(\omega). \quad (10)$$

Формулы (10) лежат в основе расчета геоэлектрического поля вблизи поверхности Земли по известному геомагнитному полю. Расчет ведется в частотной области. Для перехода из временной области в частотную и обратного перехода используется технология быстрого преобразования Фурье (БПФ), англ. Fast Fourier Transform (FFT). Схема расчета геоэлектрического поля показана на рисунке 6.

Временные зависимости магнитной индукции $B_x(t)$, $B_y(t)$, полученные в геомагнитных обсерваториях, преобразуют во временные зависимости напряженности магнитного поля $H_x(t)$, $H_y(t)$. К серии временных значений $H_x(t)$, $H_y(t)$ применяется БПФ (FFT).

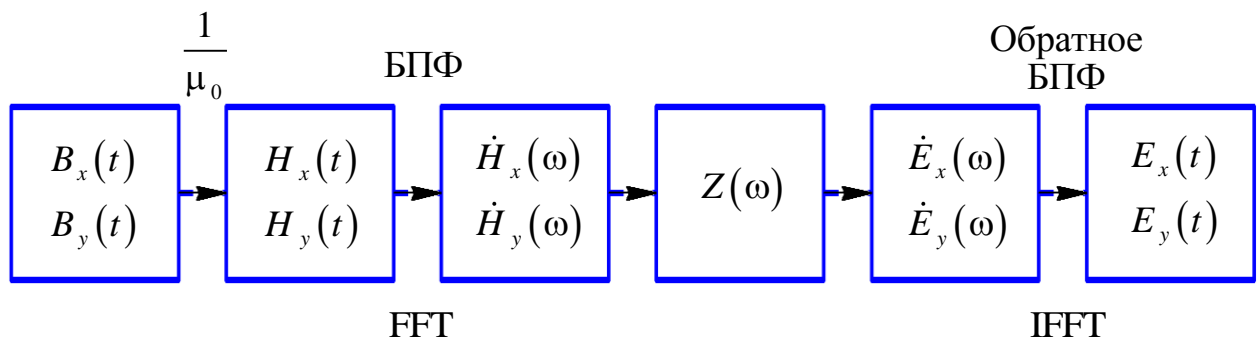


Рисунок 6 – Схема расчета геоэлектрического поля

В результате имеем частотный спектр $\dot{H}_x(\omega)$, $\dot{H}_y(\omega)$ вариаций магнитного поля (амплитуду и фазу). Спектральные значения напряженности магнитного поля затем умножаются на каждой частоте на соответствующие значения комплексного сопротивления (импеданс) земной поверхности $Z(\omega)$ (см. формулы (10)), что дает спектр геоэлектрического поля $\dot{E}_x(\omega)$, $\dot{E}_y(\omega)$. К этому спектру применяется обратное БПФ (Inverse FFT – IFFT), которое переводит значения геоэлектрического поля из частотной области в временную. Таким образом, получаем временные зависимости $E_x(t)$, $E_y(t)$.

1.5.5 Сведения о структуре и элементах ЭЭС

Вариации геомагнитного поля являются низкочастотными, вызывая столь же низкочастотные ГИТ. Как указывалось выше, в рамках ЭЭС геоиндуцированные токи рассматриваются как квазипостоянные, а расчет ГИТ ведется для схемы замещения ЭЭС на постоянном токе с использованием методов расчета цепей постоянного тока. Следовательно, для расчета ГИТ необходимы параметры элементов ЭЭС на постоянном токе (см. рисунок 7).

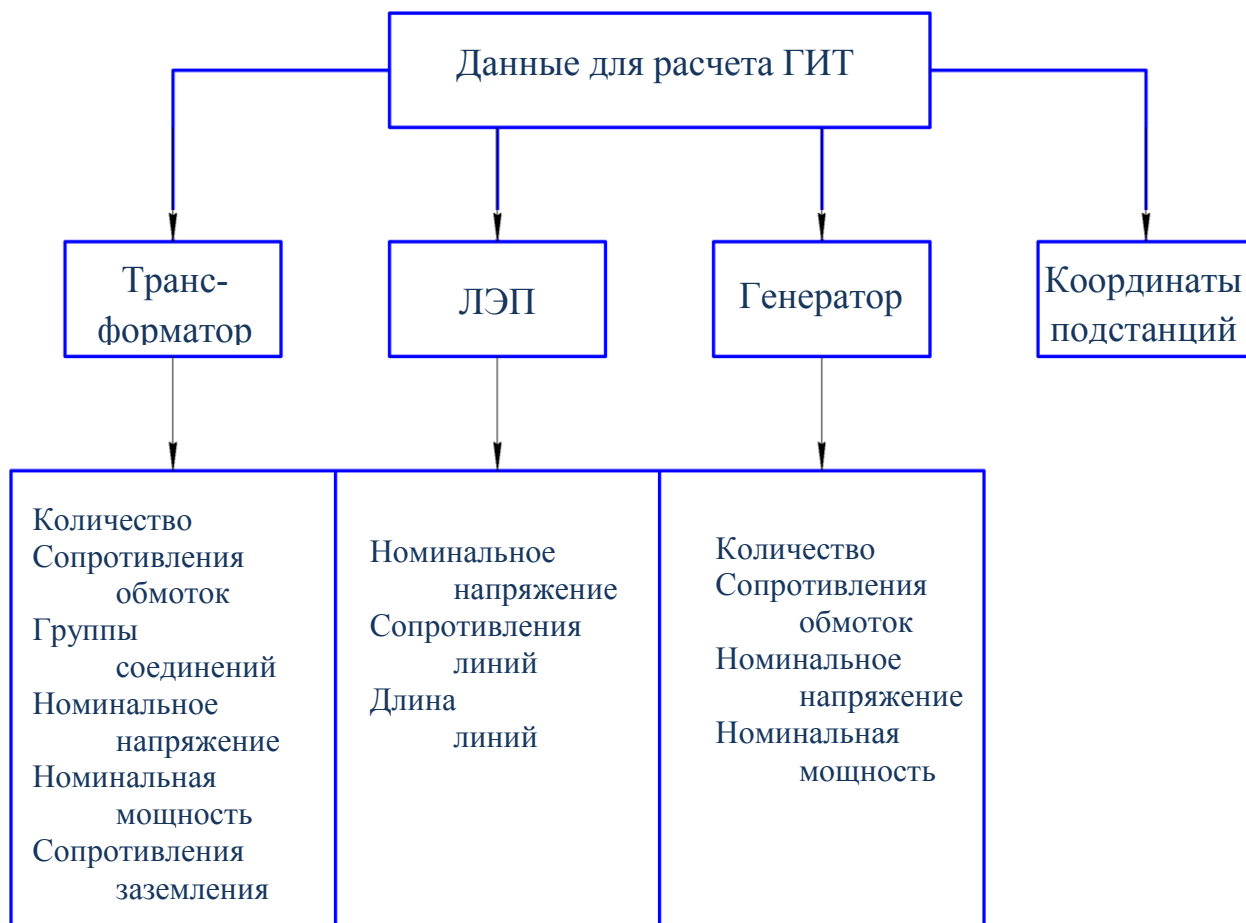


Рисунок 7– Данные для расчета ГИТ в ЭЭС и моделирования

1.5.6 Расчет ГИТ

Геоэлектрическое поле, вызывающее ГИТ в линиях электропередачи, в схеме замещения учитывается в виде источника ЭДС, включенного последовательно с сопротивлением линии на постоянном токе. Величина ЭДС E_{AB} ЛЭП, соединяющей точки A и B , находится по формуле:

$$E_{AB} = \int_A^B (\vec{E}, \vec{dl}), \quad (11)$$

где \vec{E} – напряженность геоэлектрического поля; а криволинейный интеграл от скалярного произведения вычисляется вдоль линии.

Если принять, что электрическое поле является однородным в области расположения ЛЭП, то интеграл (11) не зависит от пути интегрирования, со-

единяющего точки A и B , и представляется в виде:

$$E_{AB} = l_{AB} (E_x \cos \theta + E_y \sin \theta), \quad (12)$$

где E_x , E_y – составляющие напряженности электрического поля; θ – угол между вектором \overrightarrow{AB} и осью x , $l_{AB} = |\overrightarrow{AB}|$ – длина вектора \overrightarrow{AB} .

В более сложных моделях при вычислении интеграла (11) учитывается форма Земли. Можно принять форму Земли сферической или же учесть сплюснутость Земли.

Однако, как показывают проведенные исследования, во многих случаях геоэлектрическое поле вдоль линии не является однородным. В этом случае интеграл для вычисления ЭДС зависит от пути интегрирования, и пользоваться формулой (12) нельзя – следует использовать (11), интегрируя вдоль линии.

При вычислении ГИТ наиболее важными являются схемы замещения трансформаторов и автотрансформаторов на постоянном токе. На рисунке 8 показана схема протекания ГИТ в ЭЭС при наличии заземленных нейтралей трансформаторов и автотрансформаторов.

У трансформаторов подстанций 1 и 3 показаны только обмотки высокого напряжения (ВН). У автотрансформатора подстанции 2 показаны общая и последовательная обмотки. Для всех подстанций обмотки, соединенные в треугольник, не показаны.

При расчете ГИТ следует учитывать только обмотки, имеющие физическое соединение с землей, т.е. обмотки соединенные в звезду с заземленной нейтралью Y_0 . Именно они обеспечивают путь для протекания ГИТ в ЭЭС. Обмотки, соединенные в треугольник Δ и в звезду с незаземленной нейтралью исключаются из рассмотрения.

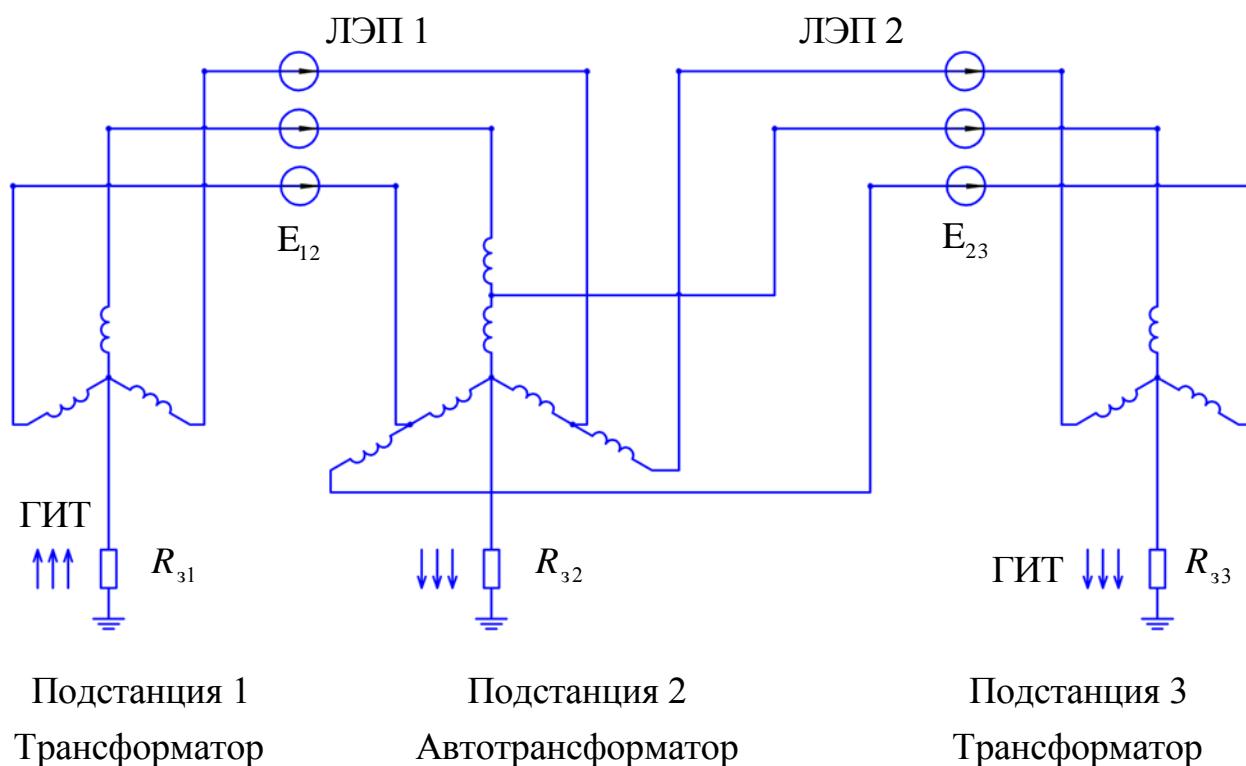


Рисунок 8 – Протекание ГИТ в ЭЭС через заземленные нейтралы

Если в нейтралы трансформаторов имеются какие-либо устройства, например, блокирующее устройство, то его следует учитывать при расчете ГИТ.

На рисунке 9 дана однофазная схема замещения на постоянном токе для электрической схемы, приведенной на рисунке 8.

На этом рисунке использованы обозначения: R_{31} , R_{32} , R_{33} – сопротивления заземления подстанций 1, 2, 3 соответственно; $R_{Л1}$, $R_{Л2}$ – сопротивления линий Л1 и Л2; E_{12} , E_{23} – ЭДС, наводимые геоэлектрическим полем в линиях Л1 и Л2 соответственно между подстанциями 1 – 2 и между подстанциями 2 – 3; $R_{Т1,ВН}$, $R_{Т3,ВН}$ – активные сопротивления обмоток ВН трансформаторов 1 и 3; $R_{Т2,ОО}$, $R_{Т2,ПО}$ – активные сопротивления общей и последовательной обмоток автотрансформатора 2. Сопротивления заземления подстанций 1, 2, 3 входят в однофазную схему замещения в утроенном виде ($3R_{31}$ и т.д.).

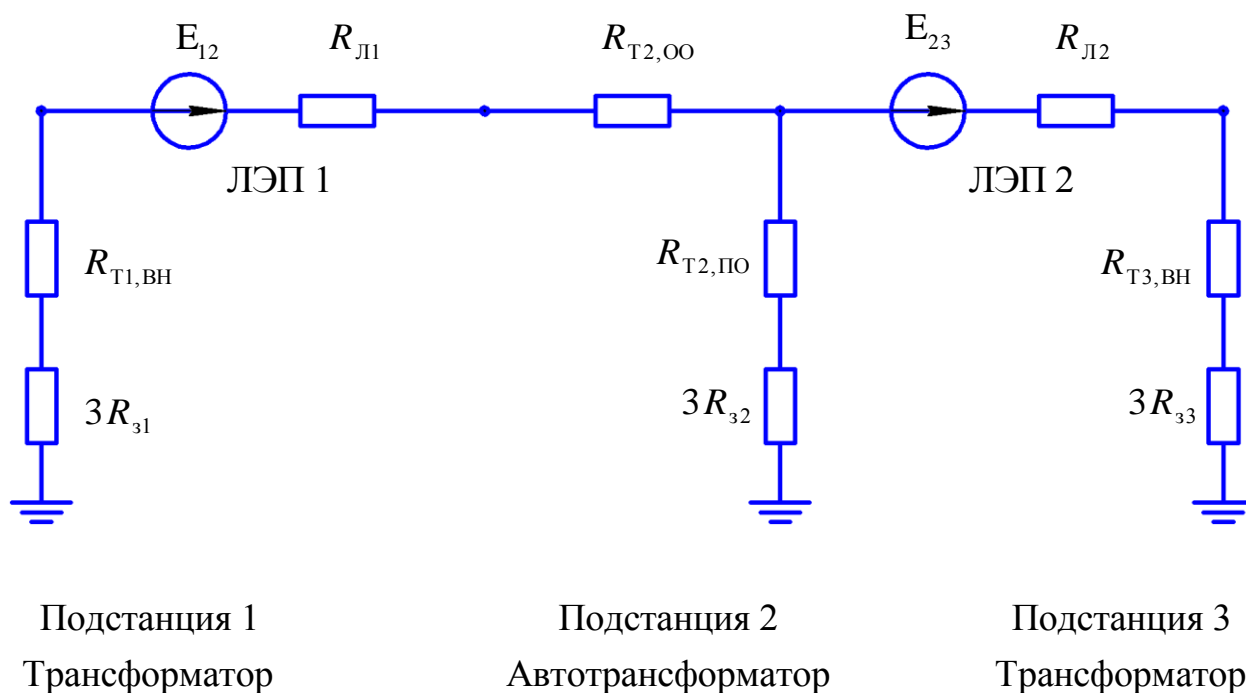


Рисунок 9 – Схема замещения на постоянном токе для расчета ГИТ

Сопротивление заземления подстанций играет важную роль при расчете и анализе ГИТ. К сожалению, сопротивления заземления для многих подстанций зачастую неизвестны. Во многих исследованиях эти сопротивления полагают одинаковыми для всех подстанций (например, 0,5 Ом).

Полученная схема замещения анализируется методами цепей постоянного тока.

1.5.7 Расчет индуцированного геоэлектрического поля

Расчет ГИТ включает два этапа: 1) геофизический и 2) инженерный электроэнергетический.

На первом этапе проводится расчет индуцированного геоэлектрического поля вблизи поверхности Земли. Исходными данными для геофизического этапа являются данные многолетних наблюдений за магнитным полем Земли и данные об удельной проводимости верхних слоев Земли.

Геоэлектрическое поле вблизи поверхности Земли наводит в протяженных металлических структурах геоиндуцированные токи. Для расчета ГИТ в ЛЭП на втором этапе необходимы сведения о структуре и элементах ЭЭС: о трансформаторах и автотрансформаторах с заземленными нейтраля-

ми, о параметрах ЛЭП, о сопротивлениях заземления подстанций. Расчет ГИТ ведется для схемы замещения ЭЭС на постоянном токе с использованием методов расчета цепей постоянного тока.

При расчете геоэлектрического поля вблизи поверхности Земли широкое распространение получила так называемая одномерная (1D) слоистая модель, когда земля представляется совокупностью слоев разной толщины с различными удельными проводимостями. Каждый слой характеризуется своим волновым сопротивлением, которое связывает между собой напряженности электрического и магнитного полей. В случае одномерной 1D модели для каждого слоя имеем:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_B \\ -Z_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{H}_x \\ \dot{H}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} 0 & Z_B \\ -Z_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_x \\ \dot{B}_y \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где \dot{E}_x, \dot{E}_y – комплексные (амплитудные или действующие) значения составляющих напряженности электрического поля вдоль осей x (северное направление) и y (восточное направление); \dot{H}_x, \dot{H}_y – комплексные значения составляющих напряженности магнитного поля вдоль осей x и y ; \dot{B}_x, \dot{B}_y – комплексные значения составляющих магнитной индукции вдоль осей x и y ; Z_B – волновое сопротивление данного слоя; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м – магнитная постоянная; магнитную проницаемость слоя полагают равной единице $\mu = 1$.

Волновое сопротивление Z_B определяется по формуле [2]:

$$Z_B = \sqrt{\frac{\omega\mu\mu_0}{2\gamma}}(1+j) = \sqrt{\frac{\omega\mu\mu_0}{\gamma}} e^{j45^\circ} = \sqrt{\frac{j\omega\mu\mu_0}{\gamma}}, \quad (14)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитной волны; γ – удельная проводимость слоя; j – мнимая единица.

С учетом $\mu = 1$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м; $\omega = 2\pi f$ из (7) получаем:

$$Z_B = 2\pi \sqrt{\frac{f}{5\gamma}} e^{j45^\circ} = 2,81 \sqrt{\frac{f}{\gamma}} e^{j45^\circ} = 2,81 \sqrt{f\rho} e^{j45^\circ}, \text{ мОм}, \quad (15)$$

где ρ – удельное сопротивление ($\gamma = \frac{1}{\rho}$). Удобно задавать удельную

проводимость через удельное сопротивление ρ . Например, при $\rho = 1000$ Ом·м пишут $\gamma = 1/1000$ См / м; при $\rho = 100$ Ом·м пишут $\gamma = 1/100$ См / м.

Частота f ГИТ обычно находится в пределах 0,001–0,1 Гц. Удельная проводимость меняется в широких пределах и зависит как от географического положения местности расположения ЭЭС, так и от глубины слоя. Некоторые значения модуля волнового сопротивления $|Z_B|$ приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Значения модуля волнового сопротивления $|Z_B|$, мОм.

Уд. сопр. ρ , Ом·м	Частота f , Гц	
	0,001	0,1
100	0,8886	8,886
1000	2,81	28,1

Видим, что модуль волнового сопротивления нелинейно возрастает с увеличением как частоты, так и удельного сопротивления. Зависимость от удельного сопротивления означает, что ЭЭС, расположенные над менее проводящими слоями Земли, более подвержены воздействию ГИТ.

Важной характеристикой является глубина проникновения Δ , под которой понимают расстояние z , на котором модули напряжённостей $|\dot{E}|$, $|\dot{H}|$ уменьшаются $e = 2,71$ раз:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0 \gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \mu_0 \gamma}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10^{-7} \mu \gamma f}}, \quad (16)$$

где при выводе последнего выражения учтено значение магнитной постоянной $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн / м.

Зависимость глубины проникновения от частоты показана на рисунке 10.

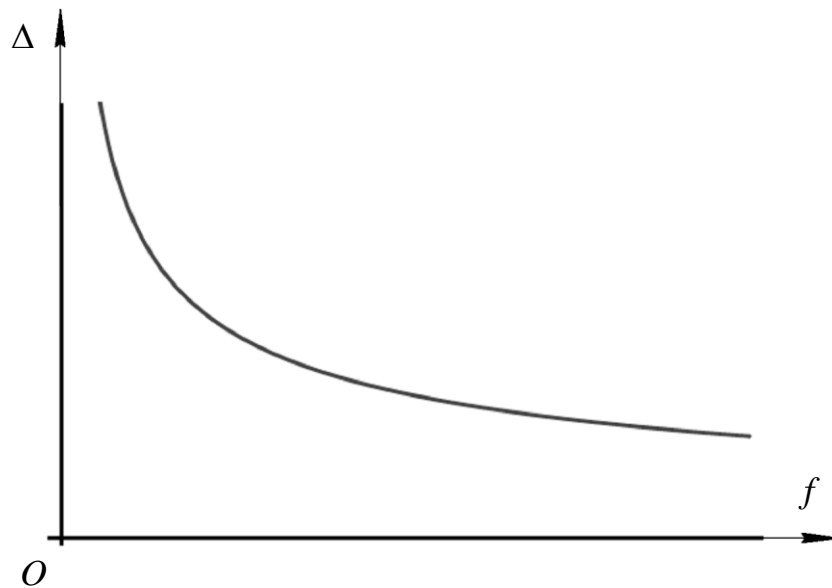


Рисунок 10 – Зависимость глубины проникновения от частоты

Если принять $\mu = 1$ и выразить Δ в километрах, то формула (16) преобразуется:

$$\Delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10}{\gamma f}} = \frac{0,5033}{\sqrt{\gamma f}} = 0,5033 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \text{ км.} \quad (17)$$

Некоторые значения глубины проникновения Δ даны в таблице 2.

Таблица 2 – Значения глубины проникновения Δ , км.

Частота f , Гц	0,001	0,1
Уд. сопр. ρ , Ом·м		
100	159,2	18,92
1000	503,3	50,33

В случае трехмерной 3D модели волновое сопротивление представляет собой тензор, и вместо (6) имеем:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{H}_x \\ \dot{H}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_x \\ \dot{B}_y \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy} – компоненты тензора волнового сопротивления.

Расчет результирующего комплексного сопротивления, связывающего между собой напряженности электрического и магнитного полей на поверхности Земли проводят на основе рекуррентных соотношений, аналогичных соотношениям из теории длинных линий, когда каждый слой имеет свою постоянную распространения. В результате, например, для одномерной модели получаем соотношения, аналогичные (6):

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z \\ -Z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{H}_x \\ \dot{H}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} 0 & Z \\ -Z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_x \\ \dot{B}_y \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где \dot{E}_x , \dot{E}_y , \dot{H}_x , \dot{H}_y , \dot{B}_x , \dot{B}_y – соответствующие составляющие полей уже на поверхности Земли; Z – комплексное сопротивление (импеданс) земной поверхности.

1.5.8 Расчет ГИТ

Геоэлектрическое поле, вызывающее ГИТ в линиях электропередачи, в схеме замещения учитывается в виде источника ЭДС, включенного последовательно с сопротивлением линии на постоянном токе. Величина ЭДС E_{AB} ЛЭП, соединяющей точки A и B , находится по формуле:

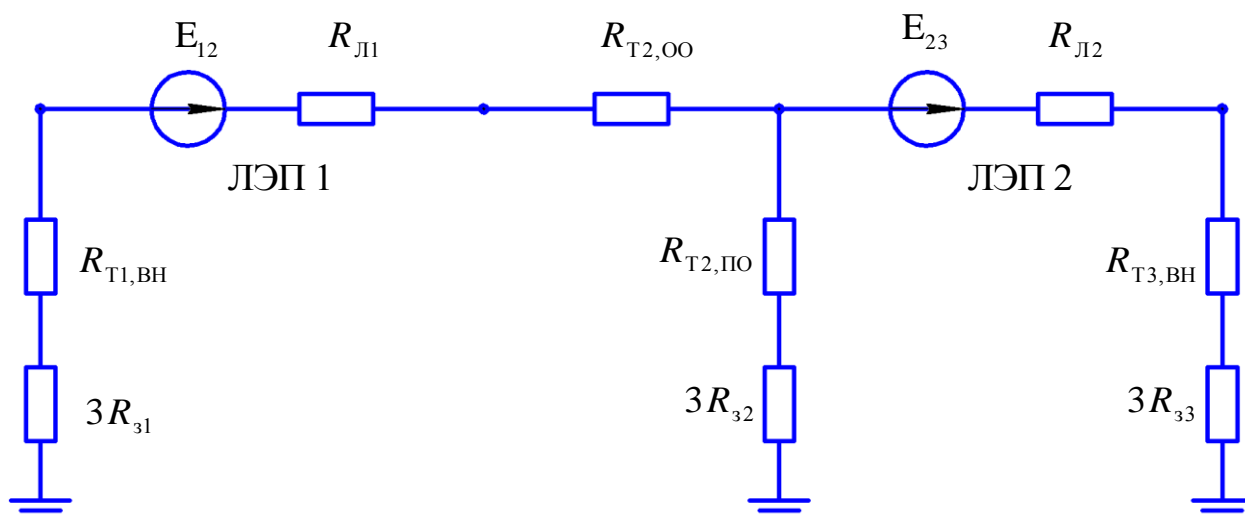
$$E_{AB} = \int_A^B (\vec{E}, \vec{dl}), \quad (20)$$

где \vec{E} – напряженность геоэлектрического поля; а криволинейный интеграл от скалярного произведения вычисляется вдоль линии.

При расчете ГИТ следует учитывать у трансформаторов только обмотки, имеющие физическое соединение с землей, т.е. обмотки соединенные в звезду с заземленной нейтралью Y_0 . Именно они обеспечивают путь для протекания ГИТ в ЭЭС. Обмотки, соединенные в треугольник Δ и в звезду с незаземленной нейтралью исключаются из рассмотрения. Если в нейтрали трансформаторов имеются какие-либо устройства, например, блокирующее устройство, то его следует учитывать при расчете ГИТ.

На рисунке 11 дана однофазная схема замещения на постоянном токе для электрической схемы, включающей три подстанции. На подстанциях 1 и 3 установлены трансформаторы, а на подстанции 2 – автотрансформатор.

На рисунке использованы обозначения: R_{31}, R_{32}, R_{33} – сопротивления заземления подстанций 1, 2, 3 соответственно; $R_{Л1}, R_{Л2}$ – сопротивления линий Л1 и Л2; E_{12}, E_{23} – ЭДС, наводимые геоэлектрическим полем в линиях Л1 и Л2 соответственно между подстанциями 1 – 2 и между подстанциями 2 – 3; $R_{Т1,ВН}, R_{Т3,ВН}$ – активные сопротивления обмоток ВН трансформаторов 1 и 3; $R_{Т2,ОО}, R_{Т2,ПО}$ – активные сопротивления общей и последовательной обмоток автотрансформатора 2. Сопротивления заземления подстанций 1, 2, 3 входят в однофазную схему замещения в утроенном виде ($3R_{31}$ и т.д.).



Подстанция 1
Трансформатор

Подстанция 2
Автотрансформатор

Подстанция 3
Трансформатор

Рисунок 11 – Схема замещения на постоянном токе для расчета ГИТ

При расчете ГИТ следует учитывать только обмотки, имеющие физическое соединение с землей, т.е. обмотки соединенные в звезду с заземленной нейтралью Y_0 . Именно они обеспечивают путь для протекания ГИТ в ЭЭС. Обмотки, соединенные в треугольник Δ и в звезду с незаземленной нейтралью исключаются из рассмотрения. Поэтому в представленной схеме учитываются у трансформаторов подстанций 1 и 3 только обмотки высокого напряжения (ВН), а у автотрансформатора подстанции 2 – общая и последовательная обмотки.

Резистивная схема замещения, представленная на рисунке 11 анализируется методами цепей постоянного тока.

1.5.9 Метод узловых потенциалов

Метод узловых потенциалов (МУП) – это метод расчета электрических цепей, в котором за неизвестные принимаются потенциалы узлов схемы. [1] Если в схеме имеется n узлов, потенциал одного из которых можно принять равным нулю, то число неизвестных равно $n-1$. Уравнения в методе составляются на основе первого закона Кирхгофа.

В матричном виде система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), записанная в соответствии с методом узловых потенциалов и содержащая всего $(n-1)$ уравнений, имеет вид:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1i} & \cdots & G_{1,n-1} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2i} & \cdots & G_{2,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ G_{i,1} & G_{i,2} & \cdots & G_{ii} & \cdots & G_{i,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ G_{n-1,1} & G_{n-1,2} & \cdots & G_{n-1,i} & \cdots & G_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \cdots \\ \varphi_i \\ \cdots \\ \varphi_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \cdots \\ J_i \\ \cdots \\ J_{n-1} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

или

$$[G][\varphi] = [J], \quad (22)$$

где G_{ii} – это сумма проводимостей ветвей, сходящихся в i -ом узле; $G_{ij}, i \neq j$ – сумма проводимостей ветвей, соединяющих узлы i и j , взятая со знаком «минус».

Если между какими-либо двумя узлами ветви отсутствуют, то соответствующая проводимость равна нулю. Величины J_i – узловые токи. В формировании узлового тока J_i участвуют ветви, подходящие к i -ому узлу и содержащие источники ЭДС или источники тока. источники и (или) тока. Если ЭДС E_k k -ой ветви направлена к i -ому узлу, то ее вклад в формирование J_i равен $E_k g_k$, а если эта ЭДС направлена от i -ого узла, то ее вклад составляет $(-E_k g_k)$ Если к i -ому узлу подтекает ток от источника тока, то он должен быть введен в J_i со знаком «плюс»; если этот ток от источника тока утекает, то он должен входить в J_i со знаком «минус».

Решение СЛАУ для потенциалов можно записать в матричном виде как:

$$[\varphi] = [G]^{-1} [J]. \quad (23)$$

Напомним, что закон Ома для участка цепи между точками a и b , содержащего ЭДС, записывается в виде:

$$I = g(U_{ab} + E) = g(\varphi_a - \varphi_b + E), \quad (24)$$

где $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$; ЭДС E и ток I направлены от a к b ; g – проводимость участка.

1.5.10 Матрично-топологический метод

Расчет сложных цепей с большим числом узлов и ветвей ведется матрично-топологическим методом с использованием топологических матриц и операций матричной алгебры.

Для метода узловых потенциалов потребуется так называемая узловая матрица A . Перед составлением узловой матрицы необходимо пронумеровать все узлы и все ветви. Узел с нулевым потенциалом имеет номер 0.

Узловую матрицу составляют для всех узлов, кроме узла с нулевым потенциалом. В этой матрице номер i -ой строки соответствует номеру узла, а номер j -го столбца – номеру ветви. В ячейки матрицы ставят числа 1, -1 , 0. Для i -го узла в соответствующие ячейки матрицы заносят 1, если ток ветви направлен от узла; -1 , если ток ветви направлен в узел; и 0, если ветвь не связана с данным узлом. Пример узловой матрицы дается формулой:

$$[A] = \begin{array}{c} \text{У} \\ \text{з} \\ \text{л} \\ \text{ы} \end{array} \begin{array}{c} \text{В е т в и} \\ 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Совокупность уравнений по первому закону Кирхгофа с помощью уз-

ловой матрицы записывается в виде:

$$[A][I] = 0, \quad (26)$$

где $[I]$ – столбец токов ветвей.

Для матрицы (25) имеем:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = 0. \quad (27)$$

При получении уравнений МУП с помощью топологических матриц примем допущение, что в схеме отсутствуют источники тока, что выполняется в случае расчета ГИТ в ЭЭС.

Закон Ома (24) для участка цепи, содержащего ЭДС, для всех ветвей в матричном виде запишется так:

$$[I] = [g]([U] + [E]) = [g][U] + [g][E], \quad (28)$$

где $[g]$ – диагональная матрица проводимостей ветвей:

$$[g] = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & g_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & g_j & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & g_m \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Столбец напряжений $[U]$ можно выразить через транспонированную

узловую матрицу $[A]^T$:

$$[U] = [A]^T [\varphi]. \quad (30)$$

Для матрицы (25) имеем:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Действительно, в матрице $[A]^T$ каждая строка соответствует определенной ветви, а столбец – узлу. Если ветвь выходит из узла, то в клетке таблицы стоит 1, если, наоборот, входит в узел, то (-1) . При перемножении матриц получаем разность потенциалов. В случае, когда ветвь присоединена к узлу с нулевым потенциалом, то в соответствующей строке матрицы $[A]^T$ будет только одно, отличное от нуля, число, и напряжение ветви будет равно потенциалу другого узла, к которому присоединена данная ветвь.

Подстановка (30) в (28) дает:

$$[I] = [g][A]^T [\varphi] + [g][E], \quad (32)$$

Подставим теперь (32) в систему уравнений по первому закону Кирхгофа (26):

$$[A][I] = [A][g][A]^T [\varphi] + [A][g][E] = 0, \quad (33)$$

откуда сразу следует МУП с использованием топологических матриц:

$$[A][g][A]^T[\Phi] = -[A][g][E], \quad (34)$$

Сравнение (34) с (22) дает выражения для матрицы узловых проводимостей $[G]$ и столбца узловых токов $[J]$:

$$[G] = [A][g][A]^T; \quad (35)$$

$$[J] = -[A][g][E]. \quad (36)$$

Полученные выражения для МУП в матричной форме позволяют формализовать вычисление ГИТ в сложных схемах ЭЭС. Исходными для вычислений являются узловая матрица $[A]$, диагональная матрица проводимостей ветвей $[g]$ и столбец ЭДС $[E]$. Составив эти матрицы, можно все дальнейшие вычисления проводить в матричной форме, используя соответствующие алгоритмы ЭВМ.

Выводы по разделу 1

В разделе 1 рассмотрены проблемы, возникающие при воздействии геоиндуцированных токов на электроэнергетические системы. Выявлены негативные последствия насыщения силовых трансформаторов и автотрансформаторов с глухозаземленными нейтральями. Рассмотрен механизм протекания геоиндуцированных токов через заземленные нейтрали трансформаторов. Установлена связь насыщения с изменением теплового режима трансформаторов, с явлением дефицита реактивной мощности в ЭЭС, с появлением гармоник и ложными срабатываниями аппаратуры, в частности, реле.

Основными направлениями исследования надежности работы ЭЭС в условиях ГИТ являются: 1) Анализ поведения системы в целом в условиях возрастания потребления реактивной мощности; 2) Анализ теплового воздействия на трансформаторы; 3) Анализ уязвимости оборудования ЭЭС к появлению гармоник в терминах безопасности и надежности.

Рассмотрены этапы расчета ГИТ: геофизический и инженерный электроэнергетический. Приведена зависимость волнового сопротивления от частоты геомагнитного поля и удельной проводимости верхних слоев Земли. Показано, что ЭЭС, расположенные над менее проводящими слоями Земли, более подвержены воздействию ГИТ.

В рамках электроэнергетической системы геоиндуцированные токи рассматриваются как квазипостоянные, поэтому расчет ГИТ ведется для схемы замещения ЭЭС на постоянном токе с использованием методов расчета цепей постоянного тока. Предложена методика расчета геоиндуцированных токов с помощью матрично-топологического метода.

2 Моделирование влияния геоиндуктированных токов на режимы работы силового трансформатора

2.1 Схема моделирования влияния геоиндуктированных токов на режимы работы силового трансформатора

Моделирование и расчёт влияния ГИТ на режимы работы силового трансформатора должны включать следующие модули:

1. Математическая модель магнитной системы СТ.

1.1. Нахождение магнитной индукции и магнитных потоков в стержнях магнитной системы СТ определённой конструкции при различных намагничивающих токах.

1.2. Расчёт нелинейных дифференциальных индуктивных сопротивлений самоиндукции и взаимной индукции, определяемых токами намагничивания, в виде многомерной функциональной зависимости от этих токов.

2. Математическая модель СТ определённого типа.

2.1. Составление и решение системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих СТ данного типа.

2.2. Расчёт токов намагничивания при заданном подмагничивающем ГИТ для всех стержней СТ. Контроль потерь в магнитной системе. Усреднение.

2.3. Гармонический анализ токов намагничивания. Построение зависимости максимального значения усреднённого тока намагничивания от ГИТ.

3. Расчёт тепловых процессов в баке СТ.

3.1. Расчёт напряжённостей магнитного поля в стенках бака СТ. Сложение полей от отдельных фаз с учётом фазовых сдвигов.

3.2. Расчёт удельных потерь в зависимости от координат на стенках бака. Нахождение наиболее нагретой точки (ННТ) бака СТ.

3.3. Расчёт временных зависимостей прироста температуры и скорости прироста температуры; предельных значений прироста температуры; средних постоянных времени теплового процесса прироста температуры стенки

бака в наиболее нагретой точке для разных ГИТ.

3.4. Расчёт зависимости суммарных тепловых потерь в баке от ГИТ.

4. Расчёт тепловых потерь в обмотках.

4.1. Определение индукции магнитного поля в проводниках обмоток СТ.

4.2. Расчёт потерь в обмотках от вихревых токов. Получение зависимости относительной добавки к вихревым потерям в результате действия ГИТ от величины ГИТ с учётом коэффициента загрузки СТ.

4.3. Анализ влияния ГИТ на основные потери в обмотках СТ. Получение зависимости относительной добавки к основным потерям в результате действия ГИТ от величины ГИТ с учётом коэффициента загрузки СТ.

4.4. Расчёт суммарного эффекта увеличения основных и вихревых потерь в обмотках за счёт действия ГИТ.

5. Моделирование ННТ СТ.

5.1. Расчёт зависимостей установившегося превышения температуры ННТ обмотки над температурой окружающей СТ среды (воздуха) от величины ГИТ при различных нагрузках.

5.2. Расчёт зависимостей превышения температуры ННТ обмотки над температурой окружающей от величины ГИТ при различных нагрузках при заданной длительности действия ГИТ.

5.3. Построение графиков, позволяющих при заданных значениях ГИТ и температуры окружающего воздуха определять предельное по условиям нагрева значение коэффициента загрузки k_3 .

2.2 Математическая модель магнитной системы силового трансформатора

2.2.1 Нахождение магнитной индукции и магнитных потоков

Для определения нелинейных дифференциальных индуктивных сопротивлений самоиндукции и взаимной индукции, входящих в электрическую схему замещения СТ, необходим расчёт магнитных полей в трансформаторе.

В общем случае трёхфазного СТ дифференциальные индуктивные сопротивления самоиндукции и взаимной индукции x_{0ij} , характеризующие э.д.с., наводимые в ветвях намагничивания фаз, пропорциональны частным производным соответствующих потокосцеплений:

$$x_{0ij} = \omega \cdot L_{0ij}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (37)$$

$$L_{0ij} = L_{0ij}(\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03}) = \frac{\partial \Psi_{0i}}{\partial \hat{i}_{0j}}, \quad (38)$$

где ω – циклическая частота, L_{0ij} – индуктивность, характеризующая э.д.с., наводимую в ветви намагничивания фазы i током в фазе j (при $i = j$ – собственная, при $i \neq j$ – взаимная), Ψ_{0i} – потокосцепление для фазы i , токи $\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03}$ включают в себя как токи ветвей намагничивания i_{01}, i_{02}, i_{03} , так и подмагничивающие геоиндуцированные токи $i_{\text{гит}}$ (ГИТ):

$$\hat{i}_{01} = i_{01} + i_{\text{гит}}, \quad \hat{i}_{02} = i_{02} + i_{\text{гит}}, \quad \hat{i}_{03} = i_{03} + i_{\text{гит}}. \quad (39)$$

Полагая, что потокосцепления $\Psi_{0i} = \Psi_{0i}(\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03})$ определяются соответственно потоками Φ_{0i} , силовые линии которых пронизывают центральные поперечные сечения стержней магнитопровода с фазными обмотками:

$$\Psi_{0i} = w \cdot \Phi_{0i} = w \cdot S \cdot B_{0i}, \quad (40)$$

в соответствии с (37), (38) получаем выражения для индуктивных сопротивлений:

$$x_{0ij} = \omega \cdot L_{0ij} = \omega \cdot \frac{\partial \Psi_{0i}}{\partial \hat{i}_{0j}} = \omega \cdot w \cdot S \cdot \frac{\partial B_{0i}}{\partial \hat{i}_{0j}}, \quad (41)$$

где w – число витков обмотки высокого напряжения (ВН) (параметры

СТ приведены к ступени ВН); S – площадь поперечного сечения стержня магнитопровода с фазной обмоткой; B_{0i} – средняя магнитная индукция в указанном поперечном сечении для фазы с индексом i .

Таким образом, для вычисления индуктивных сопротивлений $x_{0ij}(\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03})$ необходимо знание производных $\partial B_{0i} / \partial \hat{i}_{0j}$ при разных значениях токов $\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03}$. Отсюда приходим к задаче расчёта магнитных индукций $B_{0i}(\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03})$ в виде зависимостей от токов $\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03}$.

С математической точки зрения функции $B_{0i}(\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03})$ представляют собой скалярные поля в трёхмерном пространстве токов $\hat{i}_{01}, \hat{i}_{02}, \hat{i}_{03}$. Общие временные затраты на расчёт индукции пропорциональны времени расчёта для одной точки с конкретными значениями токов i_{01}, i_{02}, i_{03} и кубу числа точек дискретизации токов. При уменьшении шага дискретизации токов в 2 раза общее время расчёта возрастает в 8 раз. Поскольку расчёт одной точки в трёхмерном пространстве токов при использовании программ моделирования полей довольно времяёмкий, а токи намагничивания при наличии значительных ГИТ могут изменяться в широких пределах, то компьютерные возможности позволяют провести только умеренную дискретизацию токов.

Возможные пути преодоления указанного затруднения:

1) Встраивание расчёта магнитных полей в программу моделирования электрической части СТ. Для этого необходим интерфейс между этими программами.

2) Применение упрощающих предположений. Ряд таких предположений был сделан выше. а) Обмотки ВН и низкого напряжения (НН) каждой фазы были заменены одной эквивалентной обмоткой с токами \hat{i}_{0j} . Раздельный учёт токов \hat{i}_{1j} и \hat{i}_{2j} приводит к увеличению числа варьируемых токов и размера матрицы индуктивных сопротивлений до 6. б) Пренебрежение пото-

ками полей рассеяния в магнитопроводе СТ. Это допущение оправдано при рассмотрении работы СТ с номинальной активно-индуктивной нагрузкой. В режиме короткого замыкания потоки полей рассеяния в магнитопроводе сравнимы с потоком холостого хода, поэтому анализ воздействия ГИТ в этом режиме требует отдельного рассмотрения.

3) Проведение расчётов магнитного поля методами магнитных цепей.

2.2.2 Метод конечных элементов

Наиболее полную информацию о магнитных полях можно получить, используя современные программы по моделированию низкочастотных (квазистатических) магнитных полей, в частности, коммерческие программы американской компании ANSYS (ANSYS Maxwell) [30] и шведской компании COMSOL (COMSOL Multiphysics) [31], а также распространяемую на условиях Aladdin Free Public License компьютерную программу FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics. Version 4.2) [43].

Во всех программах расчёт ведётся методом конечных элементов (МКЭ). Программы компаний ANSYS и COMSOL позволяют решать трёхмерные задачи. Программу FEMM можно использовать в случае плоскопараллельных или плоскомеридианных магнитных полей.

На рисунке 12 показано распределение модуля магнитной индукции в однофазном трансформаторе с двумя боковыми ярмами (трёхстержневом), полученное в программе COMSOL Multiphysics.

На рисунках 13, 14 приводятся картины силовых линий магнитного поля для СТ ТРДН 63000 / 110 и ТДЦ 400000 / 220 соответственно, полученные в программе FEMM 4.2. Источниками магнитного поля являются одинаковые постоянные токи подмагничивания, протекающими в фазных обмотках. В обоих случаях величина постоянного тока равна $i_{\text{гит}} = 50 \text{ А}$.

При решении уравнений в частных производных методом конечных элементов строится сеть конечных элементов [3], [18]. Пространство, занимаемое полем, разбивается на отдельные части, имеющие достаточно малые, но конечные размеры.

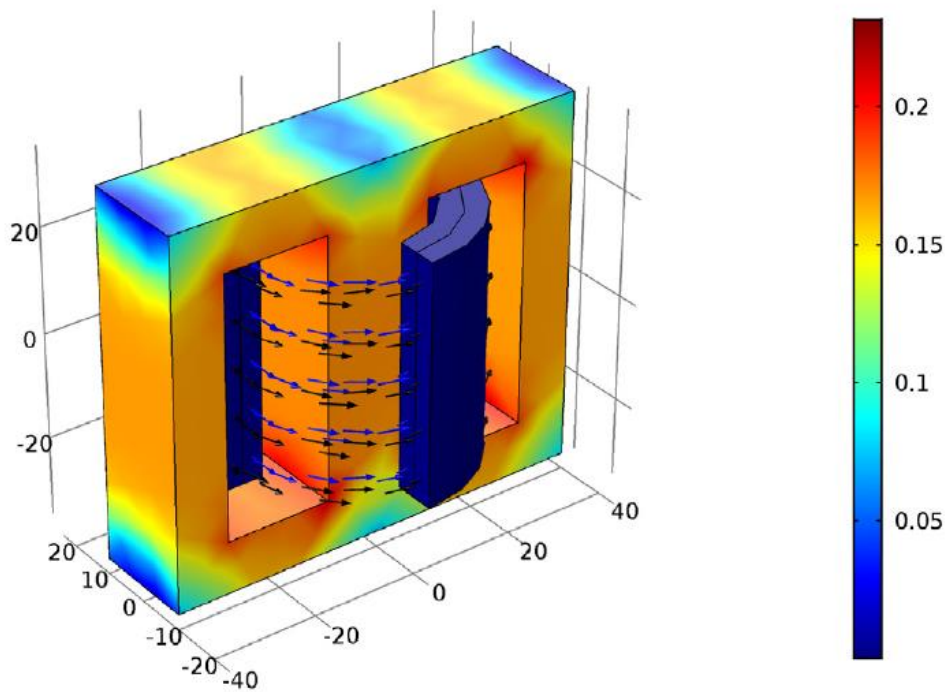


Рисунок 12 – Распределение модуля магнитной индукции в однофазном трансформаторе (COMSOL Multiphysics)

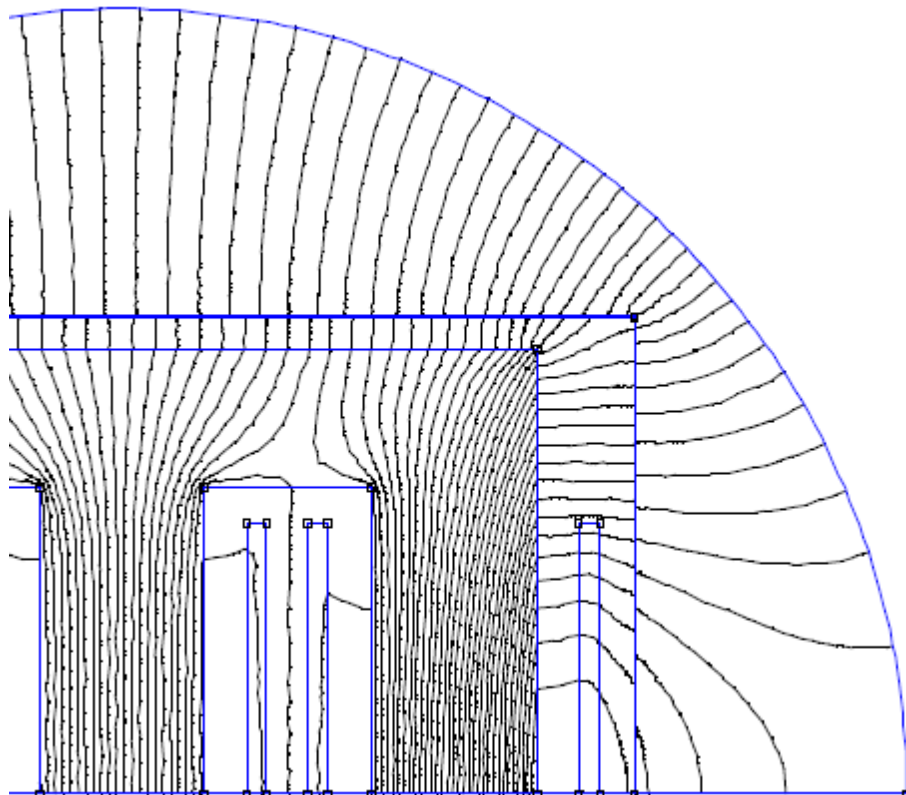


Рисунок 13 – Картина силовых линий магнитного поля для СТ ТРДН 63000 / 110

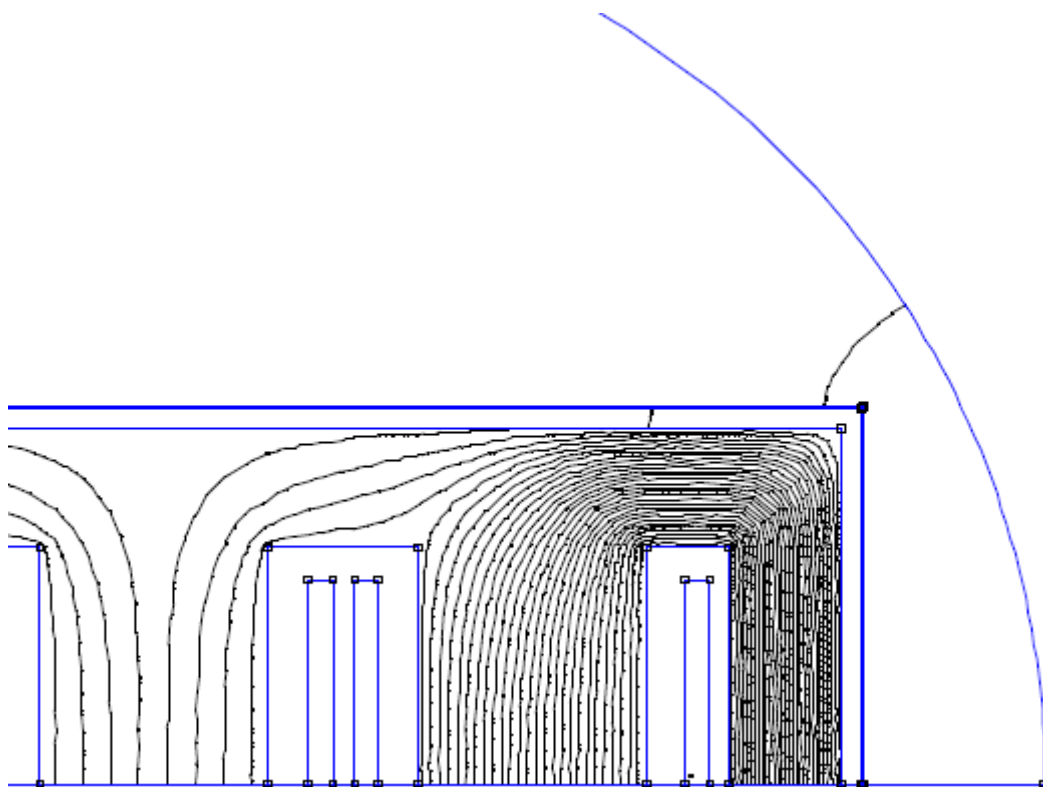


Рисунок 14 – Картина силовых линий магнитного поля для СТ ТДЦ 400000 / 220

Разбиение ведётся при двумерной задаче с помощью прямых и кривых линий, а при трехмерной задаче с помощью плоских или кривых поверхностей. Эти части называются конечными элементами. При решении двумерной задачи конечные элементы чаще всего имеют форму треугольников или прямоугольников, а при трехмерной – форму параллелепипедов или тетраэдров. Конечные элементы не перекрывают друг друга.

Особые точки конечных элементов (в этих точках рассчитываются значения искомых величин) называются узлами, или узловыми точками.

На рисунке 15 приводится пример разбиения исследуемого однофазного трансформатора с двумя боковыми ярами на элементарные тетраэдры в программе COMSOL Multiphysics.

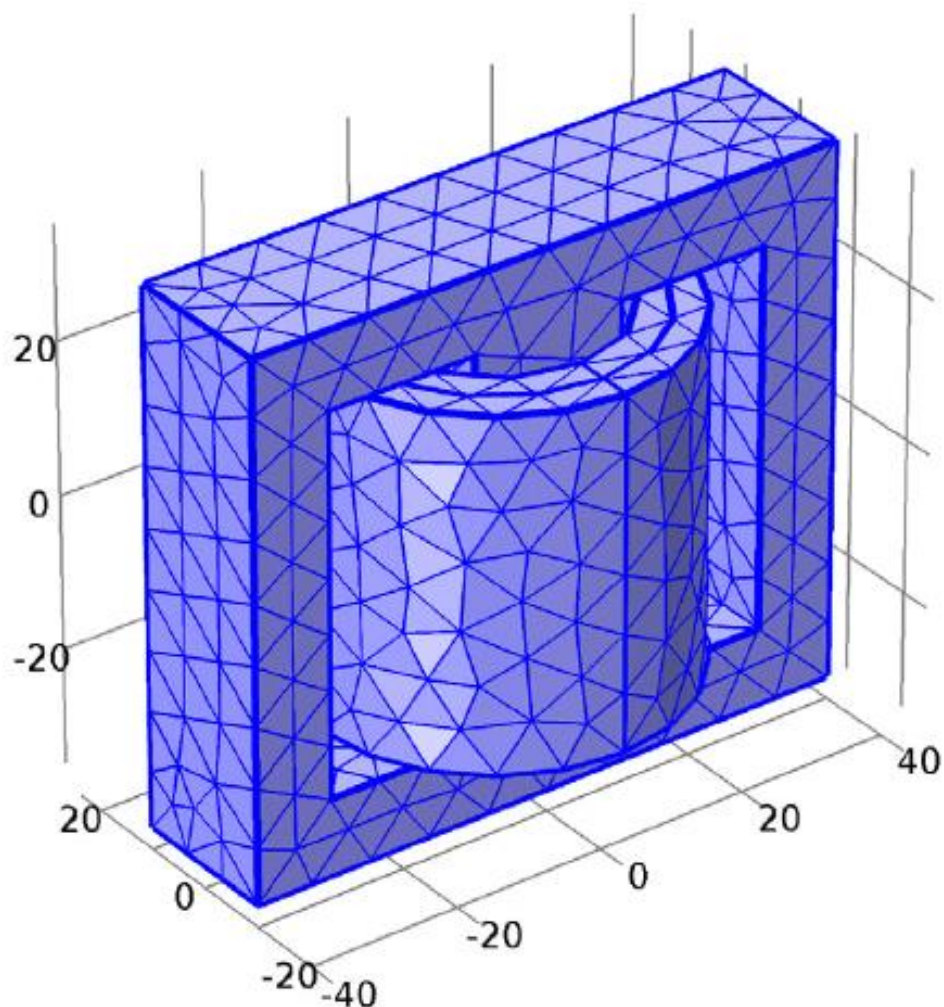


Рисунок 15 – Разбиение исследуемого объекта на элементарные тетраэдры (однофазный трансформатор, COMSOL Multiphysics)

Программа FEMM использует для исследуемой плоской области дискретизацию в виде треугольников. Долгое время широкому распространению МКЭ мешало отсутствие алгоритмов автоматического разбиения области на почти равносторонние треугольники (погрешность метода обратно пропорциональна синусу самого острого или самого тупого угла в разбиении). Эту проблему удалось успешно решить с помощью алгоритмов, основанных на триангуляции Делоне. FEMM проводит разбиение на треугольники, используя программу «Triangle» [57]. На рисунке 16 приводится пример триангуляции модели СТ ТДЦ 400000 / 220 в программе FEMM.

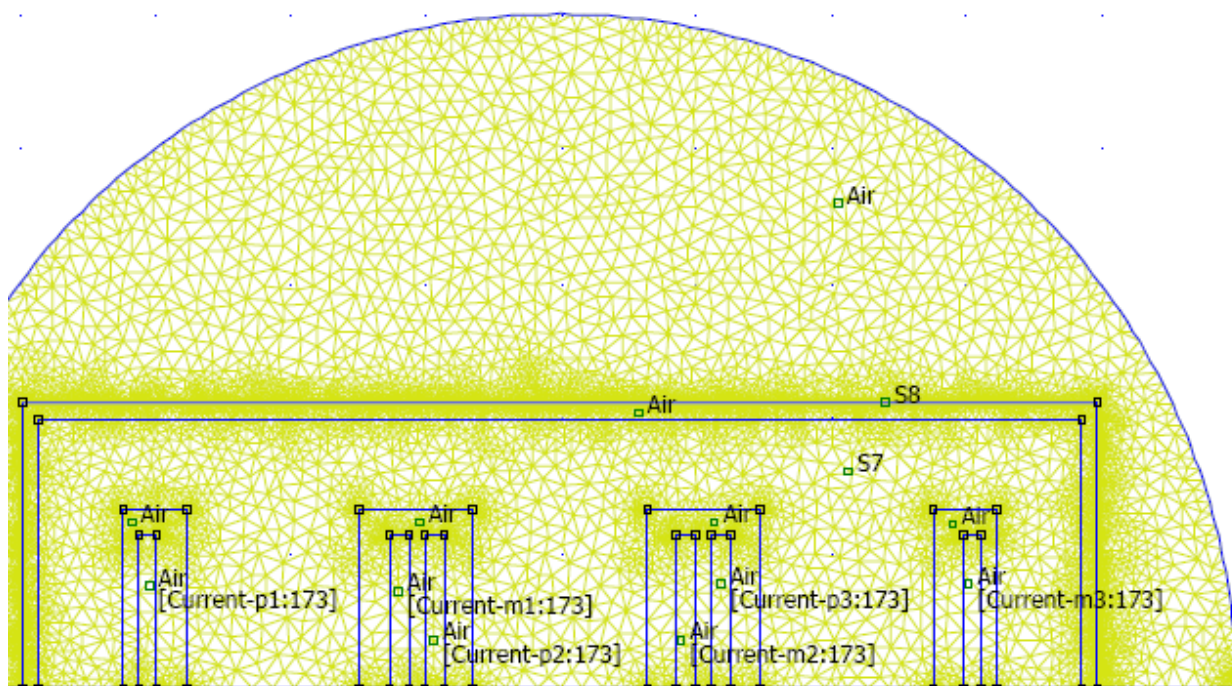


Рисунок 16 – Модель СТ ТДЦ 400000 / 220 для расчёта магнитного поля

«Задача расчета поля в МКЭ сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Такое сведение можно провести разными способами: методом минимизации некоторого функционала; методом взвешенных невязок, например, методом Галеркина; методом наименьших квадратов. В любом случае речь идёт о минимизации некоторой меры ошибки между точным дифференциальным уравнением и его приближением в виде совокупности линейных функций.

Для решения СЛАУ, например, в программе FEMM применяется итерационный метод сопряжённых градиентов, поскольку получаемые матрицы являются симметричными и весьма разрежёнными. Учитываются только ненулевые элементы матриц на главной диагонали и выше её. При расчёте поля на основе векторного потенциала используется специальная сглаживающая методика, позволяющая восстановить точность, теряемую при дифференцировании линейных функций» [4].

Развитые программы на основе МКЭ обладают несомненными достоинствами. Однако в [20] отмечается: "С другой стороны, возможности универсальных программных комплексов типа ANSYS и INFOLYTICA ограни-

чены представлением элементов магнитной системы (МС) в виде нешлифованных металлических массивов и безгистерезисным описанием кривых намагничивания. Применению этих комплексов не способствует также трудоемкость создания расчетных моделей и необходимость использования дорогостоящих расчетных серверов. В связи с этим совершенствование методов анализа переходных режимов трансформатора как элемента энергосистемы идет по «промежуточному» пути создания моделей, которые, с одной стороны, являются относительно простыми, а с другой, отражают топологию его конструкции и свойства трансформаторной стали. Это позволяет использовать такие модели при анализе сложных переходных процессов, возникающих, например, при повторных включениях трансформатора, его работе с подмагничиванием сердечника или перевозбуждении элементов МС." [20]

2.2.3 Метод магнитных цепей

Уравнения для магнитных цепей составляются на основе законов Кирхгофа для магнитной цепи [1]. Первый закон Кирхгофа следует из принципа непрерывности магнитного потока и гласит: алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю. Второй закон Кирхгофа представляет по сути форму записи закона полного тока: алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме магнитодвижущих сил (МДС) вдоль того же контура.

Соответствующие уравнения были составлены магнитной системы автотрансформатора (АТ) АОДЦТН – 267000/ 500/ 220. На рисунке 17 изображена схема замещения магнитной системы автотрансформатора в виде магнитной цепи. В нее входят узлы $a, a', b, b', c, c', d, d'$ и ветви 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. В силу горизонтальной симметрии напряженности магнитного поля в ветвях 5, 7 и 6, 8 равны ($H_5 = H_7, H_6 = H_8$), поэтому неизвестными являются напряженностей H_1, H_2, \dots, H_6 (всего 6). Воспользуемся законами Кирхгофа для магнитных цепей. Запишем 4 уравнения для узлов a, b, c, d и 2 уравне-

ния для контуров I, II . Положительные направления для потоков $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_6$, для обхода контуров, для тока обмотки \hat{i}_0 и намагничивающей силы (МДС) $F = w \cdot \hat{i}_0$ (w – число витков обмотки) показаны на рисунке.

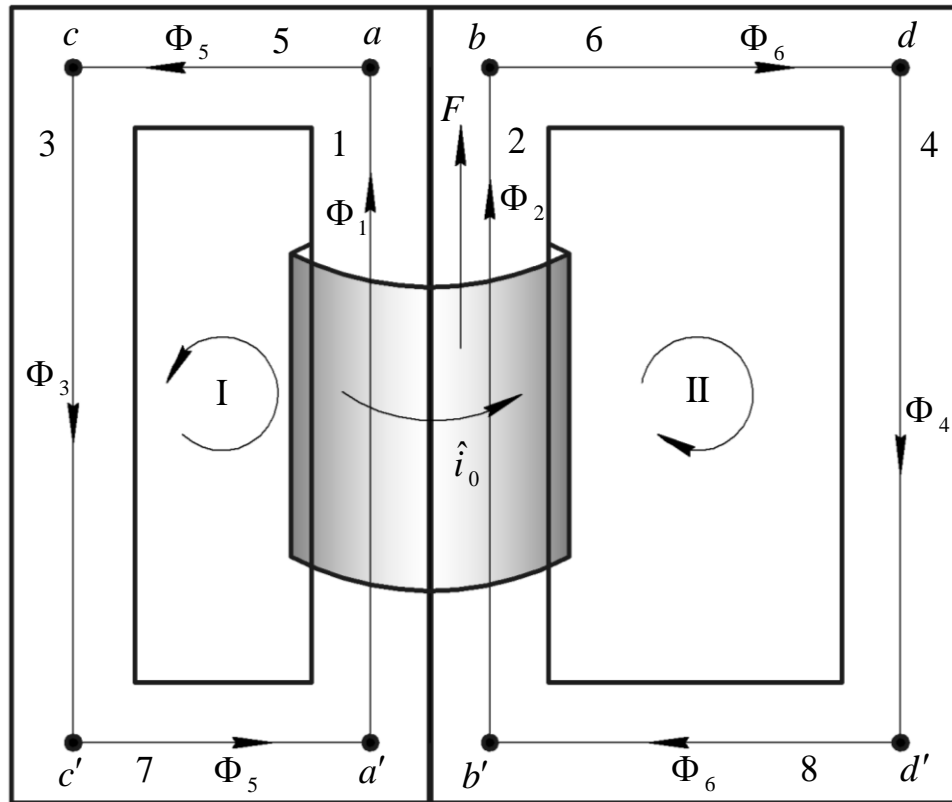


Рисунок 17 – Магнитная цепь для автотрансформатора

Для узлов по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{array}{c|c} a & \Phi_1 = \Phi_5, \\ b & \Phi_2 = \Phi_6, \end{array} \quad \begin{array}{c|c} c & \Phi_5 = \Phi_3, \\ d & \Phi_6 = \Phi_4. \end{array} \quad (42)$$

Для контуров по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{array}{c|c} I & H_1 l_1 + 2H_5 l_5 + H_3 l_3 = F, \\ II & H_2 l_2 + 2H_6 l_6 + H_4 l_4 = F, \end{array} \quad (43)$$

где l_1, l_2, \dots, l_6 – длины соответствующих участков.

Выразим потоки $\Phi_i, i=1,2,\dots,6$, через напряжённости H_i :

$$\Phi_i = S_i B_i = S_i \cdot f(H_i), \quad (44)$$

где S_i – площади поперечного сечения участков, B_i – индукции магнитного поля на соответствующих участках, $B_i = f(H_i)$, функция $B = f(H)$ описывает нелинейную зависимость между индукцией и напряжённостью магнитного поля в стали сердечника и задаётся кривой намагничивания электротехнической стали.

С учётом (44) получаем систему для нахождения H_1, H_2, \dots, H_6 :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_1 l_1 + 2H_5 l_5 + H_3 l_3 = F, \\ H_2 l_2 + 2H_6 l_6 + H_4 l_4 = F, \\ S_1 f(H_1) - S_5 f(H_5) = 0, \\ S_3 f(H_3) - S_5 f(H_5) = 0, \\ S_2 f(H_2) - S_6 f(H_6) = 0, \\ S_4 f(H_4) - S_6 f(H_6) = 0. \end{array} \right. \quad (45)$$

Суммарное индуктивное сопротивление обмотки $x_\Sigma = x_1 + x_2$, где x_1 и x_2 – индуктивные сопротивления, связанные с магнитными потоками соответственно в первой и второй рамах. В соответствии с обобщением понятия индуктивности на случай нелинейных систем [20]:

$$x_i = \omega L_i = \omega \frac{\partial \Psi_i}{\partial \hat{i}_0} = \omega w \frac{\partial \Phi_i}{\partial \hat{i}_0} = \omega w S_i \frac{dB_i}{d\hat{i}_0} = \omega w S_i \frac{dB_i}{dH_i} \frac{dH_i}{d\hat{i}_0} = \omega w S_i g(H_i) \frac{dH_i}{d\hat{i}_0}, \quad (46)$$

где $i=1,2$ номер рамы; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота; $f = 50$ Гц – частота переменного тока; L_i, Ψ_i – соответственно индуктивность и пото-

косоцепление i -ой рамы двухрамного магнитопровода; для величины $\frac{dB_i}{dH_i}$

введено обозначение $g(H_i)$.

Функция $\frac{dB}{dH} = \frac{df(H)}{dH} = g(H)$ описывает производную магнитной

индукции по напряжённости и задаётся производной кривой намагничивания стали сердечника. В линейном случае (отсутствует насыщение магнитной системы) величина dB/dH является константой, а в нелинейном – функцией $g(H)$, зависящей от напряжённости магнитного поля. Если производные по току $dH_i/d\hat{i}_0$ обозначить штрихом: $dH_i/d\hat{i}_0 = H'_i$, то формула (46) примет вид:

$$x_i = \omega w S_i g(H_i) H'_i. \quad (47)$$

Для получения уравнений для H'_i про дифференцируем систему (45) по току \hat{i}_0 , учитывая, что для МДС $dF/di = w$. В результате имеем систему из 6 линейных алгебраических уравнений с коэффициентами, зависящими от напряжённостей H_1, H_2, \dots, H_6 , которые предварительно находятся при заданном значении тока \hat{i}_0 из системы (45). В матричном виде система для H'_i :

$$AH' = B, \quad (48)$$

$$A = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & l_3 & 0 & 2l_5 & 0 \\ 0 & l_2 & 0 & l_4 & 0 & 2l_6 \\ S_1 g(H_1) & 0 & 0 & 0 & -S_5 g(H_5) & 0 \\ 0 & 0 & S_3 g(H_3) & 0 & -S_5 g(H_5) & 0 \\ 0 & S_2 g(H_2) & 0 & 0 & 0 & -S_6 g(H_6) \\ 0 & 0 & 0 & S_4 g(H_4) & 0 & -S_6 g(H_6) \end{bmatrix}, \quad (49)$$

$$H' = \begin{bmatrix} H'_1 \\ H'_2 \\ H'_3 \\ H'_4 \\ H'_5 \\ H'_6 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} w \\ w \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (50)$$

Для расчёта напряжённостей H_i и их производных требуется знание кривой намагничивания электротехнической стали $B = f(H)$ и её производной $dB/dH = df(H)/dH = g(H)$. Поскольку эти функции используются при численном решении системы нелинейных алгебраических уравнений (45) ($f(H)$ – явно, а $g(H)$ – неявно, внутри численного алгоритма), то они должны быть гладкими, т.е. $g(H)$ должна иметь непрерывную производную (гладкость $f(H)$ вытекает из гладкости $g(H)$).

В данном случае рассматривались только потоки, целиком замыкающиеся в сердечнике АТ и создаваемые током намагничивания. При работе СТ с номинальной нагрузкой (или близкой к номинальной) можно пренебречь полями рассеяния с точки зрения их влияния на состояние сердечника. Однако в аварийном режиме короткого замыкания на шинах вторичного напряжения токи, текущие по обмоткам, возрастают примерно на порядок (при $u_{кз} \% = 10 \%$ – в 10 раз). Создаваемые ими потоки рассеяния также возрастают на порядок и могут оказывать существенное влияние на магнитное состояние сердечника.

Метод магнитных цепей позволяет учесть потоки рассеяния, замыкающиеся через окно сердечника в немагнитной среде, а также расположение обмоток. Примеры схем замещения магнитных цепей можно посмотреть в [11], [20].

2.3 Задание кривой намагничивания и её производной

Как было указано выше, для проведения численных расчётов необходимы кривая намагничивания электротехнической стали $B = f(H)$ и её производная $d B / d H = d f(H) / d H = g(H)$, заданные в виде гладких функций.

Кроме того, эти функции должны быть заданы корректным образом и в области больших напряжённостей магнитного поля. В [20] указывается: "Правильность модели при насыщении стержня и ярма во многом зависит от способа описания материала сердечника в области больших индукций. В масштабе рис. 3,а (см. рисунок 18) может показаться, что «колени» кривой намагничивания находятся ниже точки 1, которая является высшей точкой статической петли гистерезиса, достигнутой в эксперименте [60] (выше этой точки восходящая и нисходящая ветви экспериментальной петли сливались в единую кривую. В тоже время, как видно из рис. 3,в, точка 1 находится у подножья «большого колена», которое заканчивается в точке 7. Тангенс угла наклона прямолинейного участка между точкой 7 (20 кА/м, 2.02513 Тл) и точкой 8 (40 кА/м, 2,05026 Тл) равен магнитной постоянной μ_0 " [20].

Далее рассматривается один из подходов к получению гладких функций $f(H)$ и $g(H)$.

За основу для функции $f(H)$ была взята кривая намагничивания для электротехнической стали марки Э330 (3413), приведённая в [24], близкой по свойствам к стали марки 3407, из которой изготовлен сердечник АТ АОД-ЦТН – 267000/ 500/ 220. Соответствующая кривая дана для значений напряжённости магнитного поля в диапазоне от 100 до 30 000 А / м. Она была корректным образом продолжена влево до нуля и вправо до значений $H = 320\,000$ А / м. Необходимость иметь точки кривой намагничивания при столь больших значениях H вызвана сильным насыщением сердечника при воздействии ГИТ.

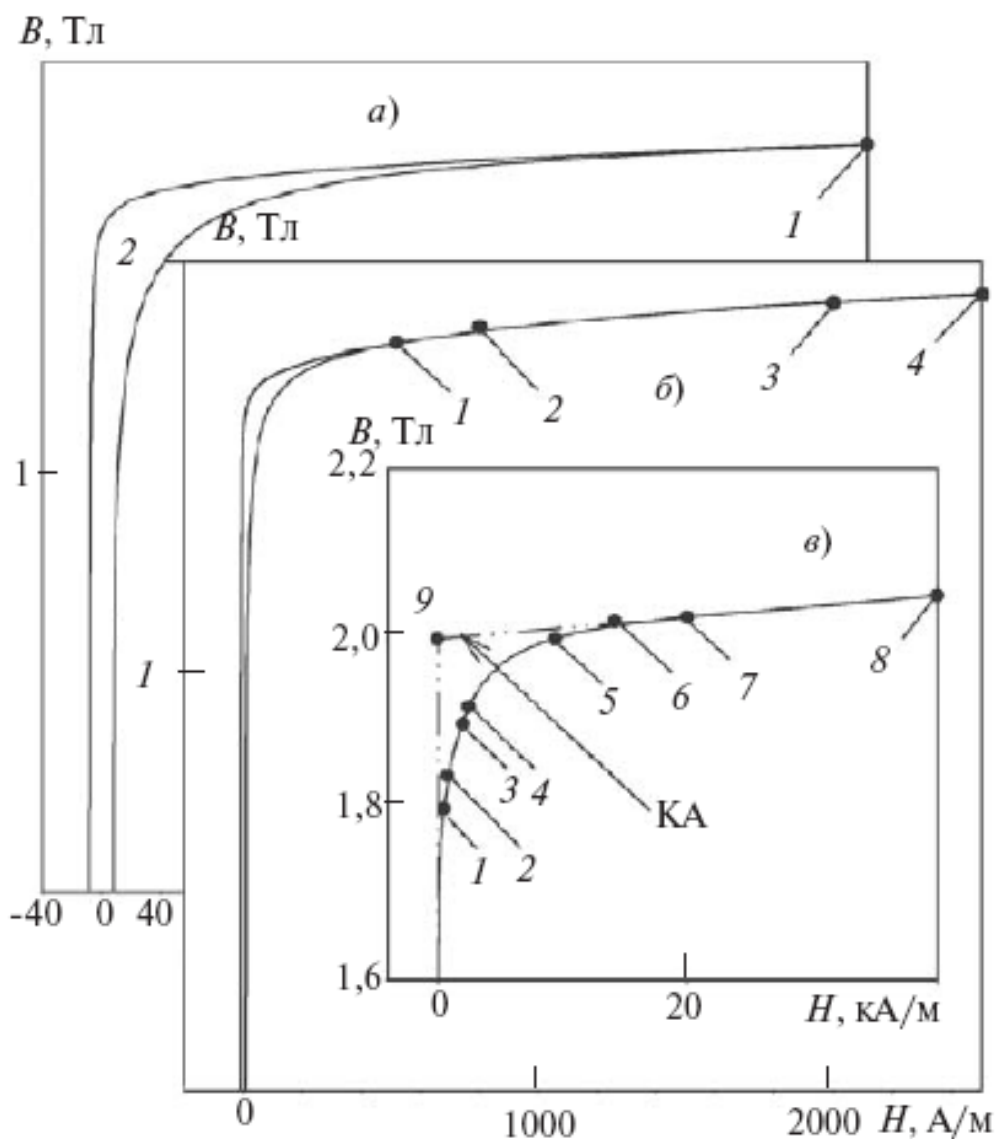


Рисунок 18 – Корректная аппроксимация кривых намагничивания

На рисунке 19 приводится часть кривой намагничивания, построенной по отдельным точкам.

Однако кривая намагничивания, построенная по отдельным точкам, соединённым отрезками, не является гладкой. Её производная будет ступенчатой функцией со скачками в отдельных точках, а вторая производная будет равна тождественно нулю.

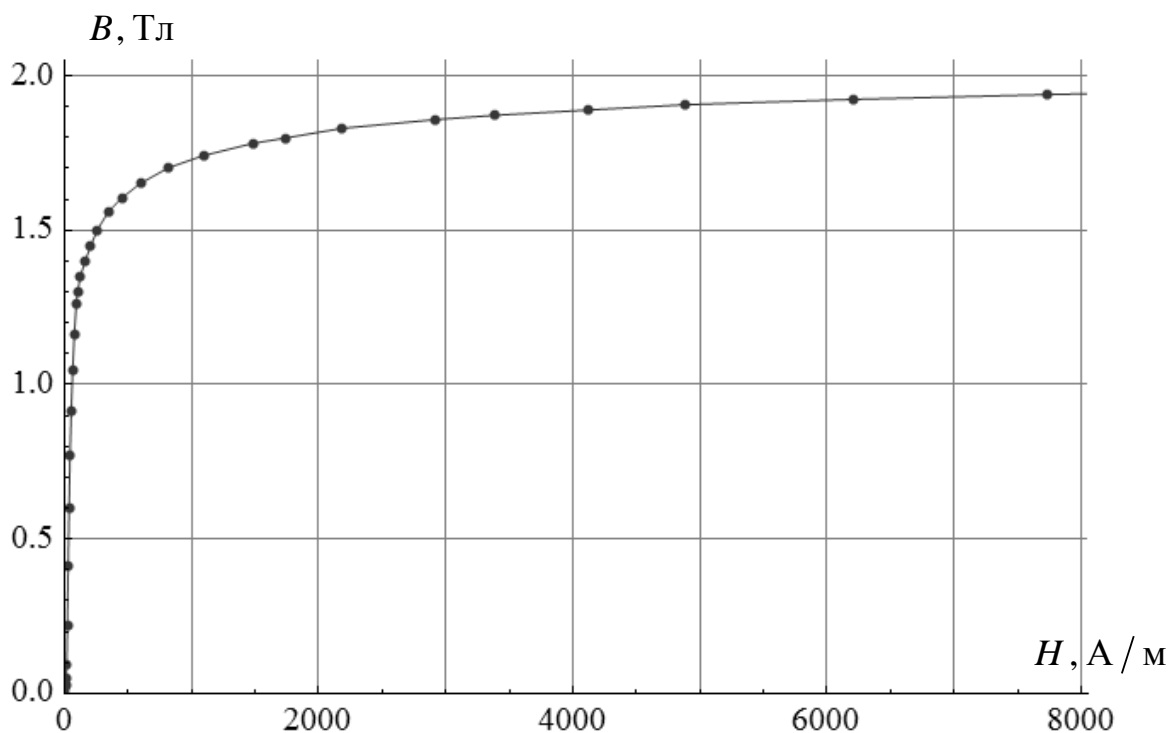


Рисунок 19 – Кривая намагничивания электротехнической стали ($H = 0 \div 8000$ А / м)

Был предложен следующий подход к получению гладкой кривой намагничивания. В качестве базисных использовались точки, находящиеся на середине скачков производной dB/dH . При необходимости к этим точкам добавлялись дополнительные точки. Положение точек корректировалось в итеративной процедуре. На каждом шаге проводили линейную аппроксимацию, т.е. соединяли точки прямыми отрезками. Полученная кривая интегрировалась. Интегральная кривая сравнивалась с исходной кривой намагничивания. Оказалось, что при этом удобнее работать не с самой производной, а с так называемой дифференциальной магнитной проницаемостью:

$$\mu(H) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (51)$$

В результате этой достаточно трудоёмкой процедуры была получена кривая намагничивания, обладающая непрерывной производной.

Описанная методика была затем применена к дифференциальной маг-

нитной проницаемости $\mu(H)$ и её производной $d\mu/dH$. Зависимость $B(H)$ получалась при этом двойным интегрированием, поскольку:

$$\frac{d^2 B}{dH^2} = \mu_0 \frac{d\mu}{dH}. \quad (52)$$

Следует отметить, что интегрирование производной $d\mu/dH$ происходит не при нулевых начальных условиях:

$$\mu = \mu(0) + \int_0^H \frac{d\mu}{dH} dH, \quad (53)$$

где $\mu(0) = 2458,7$. Поэтому второе интегрирование выглядит так:

$$B = \mu_0 \left(\mu(0)H + \int_0^H \left(\int_0^H \frac{d\mu}{dH} dH \right) dH \right). \quad (54)$$

Начиная с точки $H = 40000$ А / м, магнитная проницаемость становится равной единице и далее не меняется, что означает глубокое насыщение стали. Зависимость $B(H)$ становится линейной, графиком кривой намагничивания – прямая линия:

$$B = B_0 + \mu_0 H, \quad (55)$$

где $B_0 = 1,97486$ Тл – отрезок, который отсекает эта прямая на оси ординат.

Поэтому в окончательном виде при $H > 40000$ А / м магнитную проницаемость задавали как $\mu = 1$, а индукцию – по формуле (55).

Построенные для положительных значений H функции были продолжены в область отрицательных значений $H < 0$.

Таким образом, в результате получили гладкие функции: функцию

$B(H) = f(H)$, которая является дважды непрерывно дифференцируемой, и функцию $d B / d H = g(H) = \mu_0 \mu(H)$, которая является просто непрерывно дифференцируемой. Полученные зависимости частично (для значений соответственно $|H| \leq 1000$ А / м и $|H| \leq 400$ А / м) приведены на рисунках 20, 21.

Другой подход к получению гладких функций $f(H)$ и $g(H)$ связан с использованием сглаживающих сплайнов [19].

Пусть на отрезке $[a, b]$ задана сетка ω :

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_{m-1} < x_m = b. \quad (56)$$

Точки x_0 и x_m называются граничными узлами сетки ω , а точки x_1, \dots, x_{m-1} – её внутренними узлами.

Сглаживающим кубическим сплайном $S(x)$ на сетке ω называется функция, которая:

1) на каждом из отрезков $[x_i, x_{i+1}]$, $i = 0, 1, \dots, m-1$, представляет собой многочлен 3-ей степени,

$$S(x) = S_i(x) = a_0^{(i)} + a_1^{(i)} \cdot (x - x_i) + a_2^{(i)} \cdot (x - x_i)^2 + a_3^{(i)} \cdot (x - x_i)^3; \quad (57)$$

2) дважды непрерывно дифференцируема на отрезке $[a, b]$, т.е. принадлежит классу $C^2[a, b]$;

3) доставляет минимум функционалу

$$J(f) = \int_a^b (f''(x))^2 dx + \sum_{i=0}^m \frac{1}{\rho_i} (f(x_i) - y_i)^2; \quad (58)$$

4) удовлетворяет граничным условиям одного из трёх типов (см. ниже).

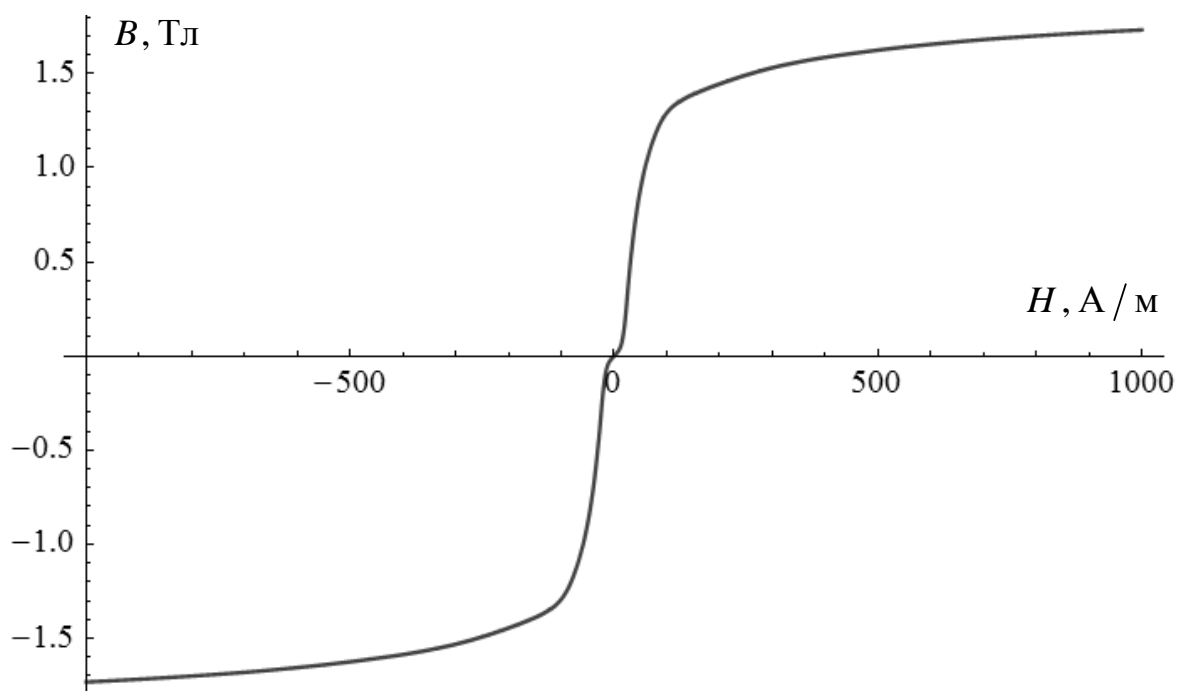


Рисунок 20 – Дважды непрерывно дифференцируемая кривая намагничивания

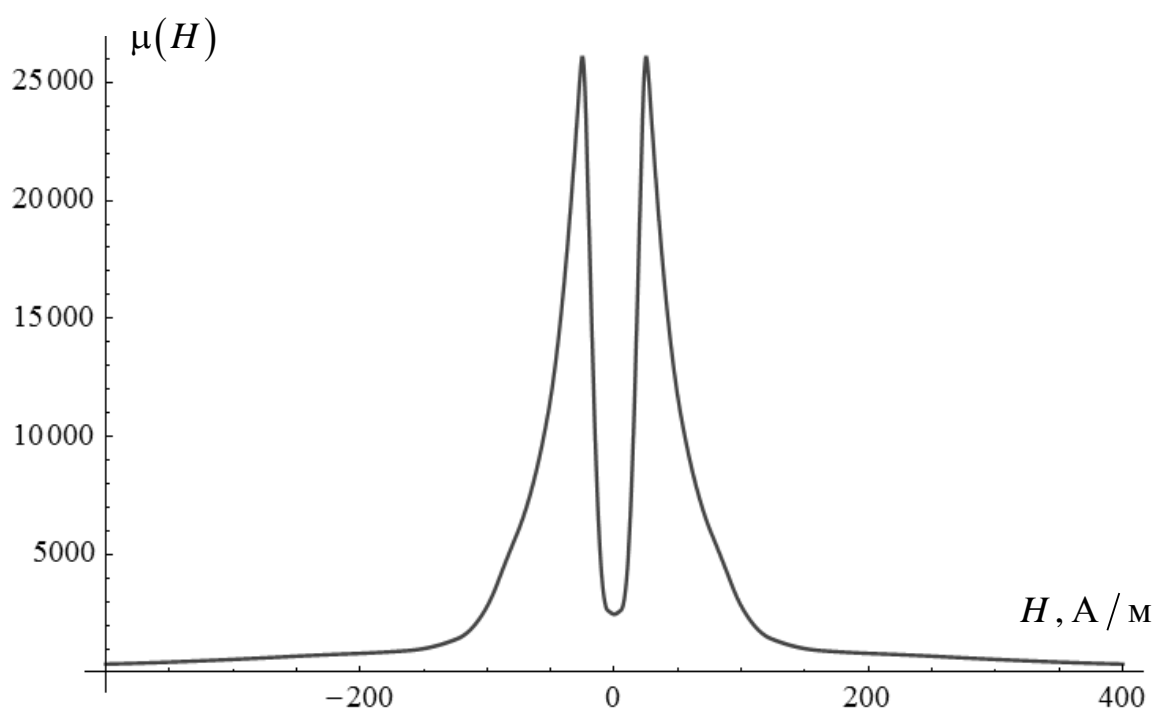


Рисунок 21 – Непрерывно дифференцируемая магнитная проницаемость

Сглаживающие кубические сплайны позволяют решить задачу построения на отрезке $[a, b]$ гладкой функции $S(x)$, значения которой в узлах сетки ω отличаются от чисел y_i на заданные величины $\Delta_i > 0$:

$$|S(x_i) - y_i| < \Delta_i, \quad i = 0, 1, \dots, m-1, m. \quad (59)$$

Граничные условия первого типа – на концах отрезка $[a, b]$ задаются значения первой производной искомой функции:

$$S'(a) = y'_0, \quad S'(b) = y'_m. \quad (60)$$

Граничные условия второго типа – на концах отрезка $[a, b]$ вторые производные искомой функции равны нулю:

$$S''(a) = 0, \quad S''(b) = 0. \quad (61)$$

Граничные условия третьего типа – периодические:

$$S(a) = S(b), \quad S'(a) = S'(b), \quad S''(a) = S''(b). \quad (62)$$

В отличие от интерполяционного сплайна, точно проходящего через экспериментальные точки (x_i, y_i) , сглаживающий сплайн проходит в определенной близости от этих точек, тем самым сглаживая погрешности задания координат (x_i, y_i) . В [28] отмечается, что "структура функционала (58) обеспечивает минимальную кривизну сплайна (первое слагаемое) и наименьшее отклонение прохождения сплайна от экспериментальных значений (второе слагаемое). Однако эти условия являются противоречивыми, так как приближение кривой сплайна к экспериментальным точкам увеличивает кривизну. Оптимальное соотношение между этими требованиями обеспечивается выбором весовых коэффициентов ρ_i , характеризующих значимость i -

го измерения. Чем меньше значения коэффициентов, тем сплайн-функция проходит ближе к экспериментальным точкам".[28] Если все $\rho_i = 0$, то сглаживающий сплайн окажется интерполяционным.

Выводы по разделу 2

Рассмотрены вопросы моделирования воздействия геоиндуцированных токов на режимы работы силового трансформатора, оказывающих негативное влияние на работу силовых трансформаторов и электроэнергетической системы в целом.

Показано, что важнейшую роль играет моделирование магнитной системы силового трансформатора, связанное с нахождением магнитной индукции и магнитных потоков. Рассмотрены метод конечных элементов и метод магнитных цепей. Проанализированы достоинства и недостатки обоих методов, указаны возможные пути развития и усложнения расчетов с помощью этих методов.

Проведен анализ проблем, возникающих при задании кривой $f(H)$ намагничивания электротехнической стали и её производной $g(H)$, которые необходимы для расчетов магнитных полей в виде гладких функций. Кроме того, эти функции должны быть заданы корректным образом и в области больших напряжённостей магнитного поля.

Подробно рассмотрен один из подходов к получению гладких функций $f(H)$ и $g(H)$. Приводятся соответствующие графики. Уделено внимание к другому подходу к получению гладких функций $f(H)$ и $g(H)$, связанному с использованием сглаживающих сплайнов.

3 Реактивная мощность и высшие гармоники

3.1 Реактивная мощность

В стандарте IEEE [36] с названием «Стандартные определения для измерения величин электрической мощности при синусоидальном, несинусоидальном, симметричном и несимметричном режимах» понятие реактивной мощности относится к реактивной мощности, создаваемой составляющими напряжения и тока основной частоты прямой последовательности. В случае симметричного трехфазного режима, когда присутствуют напряжения и токи только прямой последовательности, формула для реактивной мощности составляющих основной частоты имеет вид:

$$Q_1 = 3U_1 I_1 \sin \varphi_1, \quad (63)$$

где U_1 – действующее значение фазного напряжения $u_1(t)$, I_1 – действующее значение тока $i_1(t)$, φ_1 – сдвиг по фазе между основной гармоникой тока и основной гармоникой напряжения):

$$u_1(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \alpha_1), \quad (64)$$

$$i_1(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \alpha_1 - \theta_1), \quad (65)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, $f = 50$ Гц – промышленная частота.

В работе [55] « Уменьшение воздействия ГИТ на электроэнергетические системы при учете тепловых ограничений на оборудование и рабочих ограничений на систему» авторов А. Резаи-Заре и А. Этемади говорится, что одним из последствий воздействия ГИТ на силовые трансформаторы (СТ) с заземленными нейтралью является увеличение реактивной мощности, потребляемой трансформатором, из-за перехода трансформатора в режим насыщения магнитной системы. Величина реактивной мощности, обуслов-

ленная воздействием ГИТ, сильно зависит от конструкции магнитного сердечника трансформатора. При этом в статье авторы различают следующие типы трансформаторов: 1) однофазные, 2) трехфазные броневые, 3) трехфазные трехстержневые, 4) трехфазные пятистержневые.

Помимо типа трансформатора на величину реактивной мощности влияют и другие факторы: конструкция бака СТ, свойства ферромагнитных материалов и др. Поэтому точные расчеты воздействия ГИТ на насыщение СТ должны учитывать все эти факторы. Однако в статье предлагаются упрощенные линейные зависимости добавочной реактивной мощности от величины ГИТ, определяемые только типом трансформатора.

Для описания этой зависимости вводится специальная функция $f(i_{\text{ГИТ}})$, характеризующая СТ разных типов. Эта функция носит линейный характер. Коэффициенты наклона прямых линий таковы: 1) однофазные СТ – $s = 1$; 2) трехфазные броневые – $s = 0,7$; 3) трехфазные трехстержневые – $s = 0,77$; 4) трехфазные пятистержневые – $s = 0,8$. Пороговое значение ГИТ, при котором дополнительное потребление реактивной мощности начинает играть роль для трехфазного трехстержневого СТ, обозначено в работе I_{th} .

Эта величина сильно зависит от точки изгиба характеристики намагничивания СТ и напряжения на входе трансформатора. В работе [55] величина I_{th} порогового ГИТ для трехфазного трехстержневого СТ аппроксимируется выражением:

$$I_{th} = 63 - 55U_{(н)}, \text{ А}, \quad (66)$$

где $U_{(н)}$ – напряжение на входе трансформатора в относительных единицах (о.е.) при базисном напряжении, равном номинальному напряжению СТ.

При $U_{(н)} = 1$ имеем $I_{th} = 8 \text{ А}$.

При известной функции $f(i_{\text{ГИТ}})$ (А) добавочная реактивная мощность СТ в МВА находится по формуле [55]:

$$Q_{\text{МВА}} = 0,001 \cdot \sqrt{6} \cdot U_{\text{б,кВ}} \cdot U_{(6)} \cdot f(i_{\text{ГИТ}}), \quad (67)$$

где $U_{(6)}$ – линейное напряжение на входе трансформатора в относительных единицах при базисном напряжении $U_{\text{б,кВ}}$, заданном в кВ.

Поскольку $U_{\text{б,кВ}} \cdot U_{(6)} = U_{\text{кВ}} = 0,001 \cdot U$, где U – линейное напряжение на входе трансформатора в именованных единицах (В), а $U_{\text{кВ}}$ – оно же, но в кВ, то формулу (67) для реактивной мощности СТ в ВА можно переписать в виде:

$$Q = \sqrt{6} \cdot U \cdot f(i_{\text{ГИТ}}). \quad (68)$$

При анализе потоков мощности в электроэнергетической системе (ЭЭС) при воздействии ГИТ добавочные потери реактивной мощности в трансформаторах должны учитываться как дополнительные реактивные нагрузки на шинах трансформаторов. Поскольку напряжение на шинах СТ и потери реактивной мощности связаны уравнением (68), то анализ потоков мощности должен выполняться в рамках итерационной процедуры, включающей уравнения потоков мощности и уравнения (68). В результате воздействия ГИТ и добавочных потерь реактивной мощности при анализе потоков мощности появляются значительные снижения напряжения в узлах ЭЭС. При достаточно больших ГИТ возможны возникновение лавины напряжения и потеря устойчивости системы.

Добавочная реактивная мощность СТ может быть записана в виде:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_1, \quad (69)$$

где I_1 – действующее значение основной гармоники тока намагничивания, которое связано с амплитудой основной гармоники выражением:

$$I_1 = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}}, \quad I_{m1} = \sqrt{2} \cdot I_1. \quad (70)$$

Подстановка (70) в (69) дает:

$$Q = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot U \cdot I_{m1}. \quad (71)$$

Сравнивая (68) и (71), получаем:

$$f(i_{\text{гит}}) = \frac{I_{m1}}{2}, \quad I_{m1} = 2 \cdot f(i_{\text{гит}}). \quad (72)$$

Формула (72) позволяет сделать вывод, что функция $f(i_{\text{гит}})$, фигурирующая в статье [55], – просто равна половине амплитуды основной гармоники тока намагничивания СТ.

Был проведен гармонический анализ тока намагничивания автотрансформатора АОДЦТН – 267000/ 500/ 220 при различных ГИТ. Была построена зависимость амплитуды основной гармоники тока намагничивания от ГИТ, показанная на рисунке 22. На этом же рисунке изображена кривая $y = 2x$. Для однофазного СТ линейная функция $f(i_{\text{гит}})$ имеет коэффициент наклона $s = 1$. Тогда в соответствии с формулой (72) коэффициент наклона для соответствующей прямой, описывающей зависимость амплитуды основной гармоники тока намагничивания от ГИТ, будет равен $s = 2$, и зависимость I_{m1} от $i_{\text{гит}}$ будет иметь вид $I_{m1}(i_{\text{гит}}) = 2 \cdot i_{\text{гит}}$.

На рисунке 23 дана зависимость функция $f(i_{\text{гит}})$ от ГИТ, а также кривая $y = 1 \cdot x$, соответствующая прямой из работы [55] для однофазного СТ.

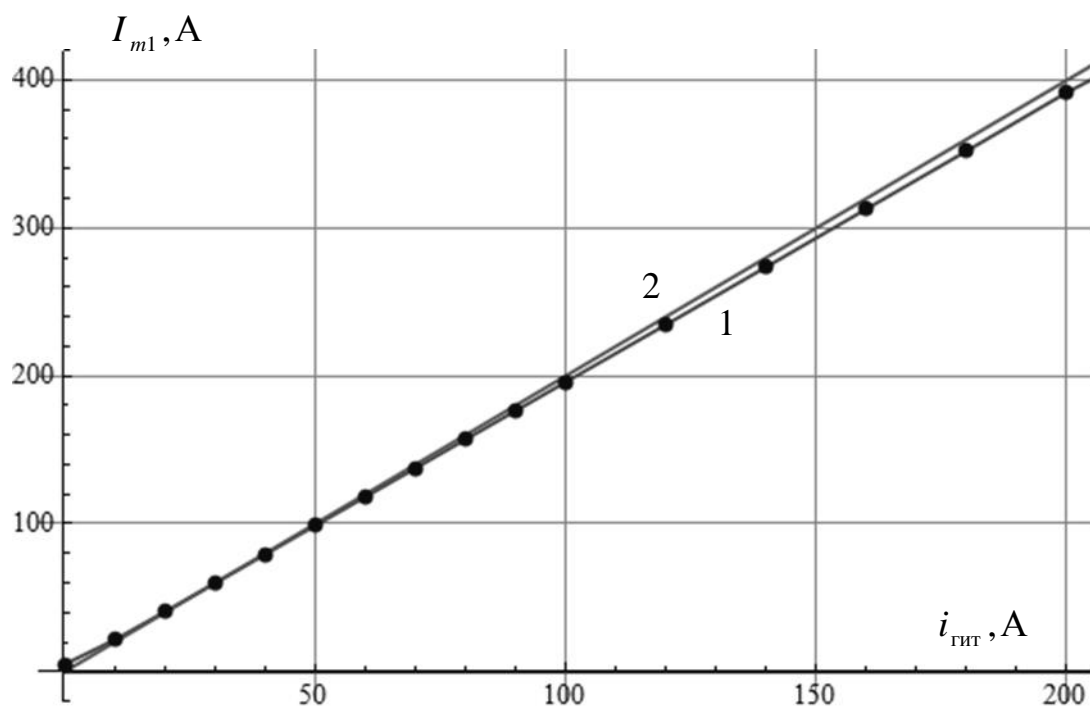


Рисунок 22 – Зависимость амплитуды основной гармоники тока намагничивания от ГИТ:
 1 – расчетная кривая, 2– функция $y = 2x$

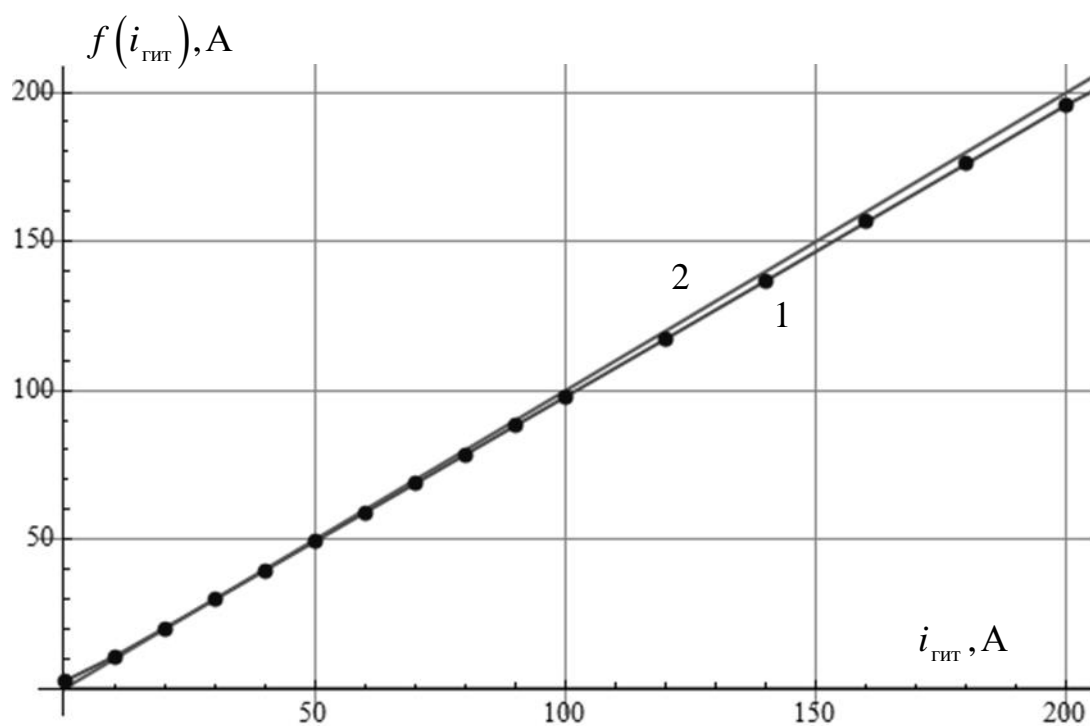


Рисунок 23 – Зависимость функция $f(i_{GIT})$ от ГИТ:
 1 – расчетная кривая, 2– функция $y = 1 \cdot x$

Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что приближенные аппроксимации функции $f(i_{\text{ГИТ}})$ в виде прямой линии достаточно близки к расчетным кривым для конкретных СТ.

3.2 Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока намагничивания при воздействии ГИТ

Негативное влияние ГИТ на силовые трансформаторы (СТ), обмотки которых соединены в звезду с заземленной нейтралью, помимо возрастания потребления реактивной мощности и теплового воздействия на трансформатор вызывает появление гармоник в токе намагничивания трансформатора. Характерной чертой несинусоидальности является полупериодная несимметрия кривой тока. СТ становится источником высших гармоник.

Анализ возникающих гармоник тока позволяет оценить уязвимость оборудования к появлению гармоник. Здесь речь идет о средствах релейной защиты и автоматики (РЗА), генераторах, батареях конденсаторов (БК) и сложных электронных системах, используемых в сетях передачи электроэнергии, – вставках постоянного тока, статических компенсаторах реактивной мощности (СКРМ). Оцениваемыми величинами являются суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (коэффициент искажения синусоидальности, суммарный коэффициент нелинейных искажений) и уровни отдельных гармоник.

В частотном спектре насыщенных трансформаторов присутствуют значительные гармоники как четного, та и нечетного порядка. Эти гармонические составляющие трансформатор привносит в ЭЭС, в которую он включен. В результате в системе возможны ложные срабатывания релейной защиты при наличии в сети гармонических составляющих тока помимо основной гармоники промышленной частоты, перегрузка батарей конденсаторов, перегрев роторов генераторов.

Емкостные элементы системы такие, как статические компенсаторы

реактивной мощности и т.п., увеличивают свои токи, в результате чего они могут стать перегруженными и отключиться, вызывая неустойчивость сети. Высшие гармоники могут вызвать резонанс, и устойчивость сети может оказаться под вопросом из-за образования виртуального нуля в некоторой точке и размыкания линий электропередачи. Присутствие гармоник 2-го порядка может давать ошибочный сигнал дифференциальному реле, имеющему настройку на низкий уровень содержания гармоник 2-го порядка, чтобы различать начальные броски тока и условие аварии. Дополнительно работа реле, которые имеют более высокую чувствительность к гармоникам 3-го порядка, чем к основной частоте, может вызвать отключение линий электропередачи во время воздействия ГИТ, приводя к неустойчивости сети и отключениям в системе.

В работе [55] « Уменьшение воздействия ГИТ на электроэнергетические системы при учете тепловых ограничений на оборудование и рабочих ограничений на систему» авторов А. Резаи-Заре и А. Этемади говорится, что в результате воздействия ГИТ на силовые трансформаторы с заземленными нейтральными и перехода магнитной системы в режим насыщения трансформатор становится источником гармоник тока. Ток намагничивания СТ содержит как четные, так и нечетные гармоники. Частотный спектр тока, обусловленный воздействием ГИТ, как и потребляемая мощность, сильно зависит от конструкции магнитного сердечника трансформатора. При этом в статье авторы различают следующие типы трансформаторов: 1) однофазные, 2) трехфазные броневые, 3) трехфазные трехстержневые, 4) трехфазные пятистержневые [55, стр. 2]. Помимо типа трансформатора на гармонический состав тока влияют и другие факторы: конструкция, свойства ферромагнитных материалов, наличие у трансформатора третьей обмотки и др.

Итак, суммарный коэффициент гармонических составляющих тока задается формулой:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} = \sqrt{\sum_{n \neq 1} \left(\frac{I_{(n)}}{I_{(1)}} \right)^2}, \quad (73)$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение основной составляющей тока; $I_{(n)}$ – действующее значение гармоники тока с номером n .

В результате гармонического анализа кривой тока намагничивания на выходе имеем амплитудные, а не действующие значения гармонических составляющих. Формула (4), записанная через амплитудные значения, имеет вид:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} a_{(n)}^2}}{a_{(1)}} = \sqrt{\sum_{n \neq 1} \left(\frac{a_{(n)}}{a_{(1)}} \right)^2}, \quad (74)$$

где $a_{(1)}$ – амплитудное значение основной составляющей тока; $a_{(n)}$ – амплитудное значение гармоники тока с номером n :

$$a_{(1)} = \sqrt{2} I_{(1)}, \quad a_{(n)} = \sqrt{2} I_{(n)}. \quad (75)$$

На основе временных зависимостей тока намагничивания автотрансформатора АОДЦТН – 267000/ 500/ 220 при различных ГИТ были проведены гармонический анализ и вычисление суммарного коэффициента гармонических составляющих тока намагничивания K_I (ТНД) при различных ГИТ. Построена зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих тока намагничивания от ГИТ (рисунок 24).

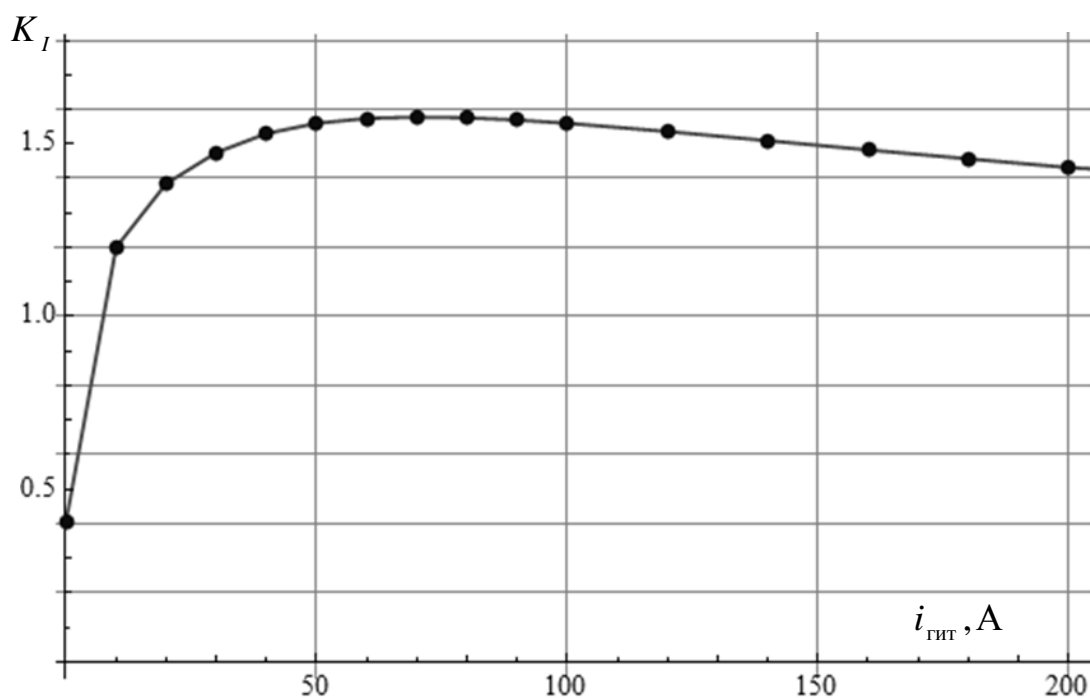


Рисунок 24 – Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих тока намагничивания K_I (ТНД) от ГИТ

Кривые суммарного коэффициента гармонических составляющих тока намагничивания K_I (ТНД), полученные в результате численного моделирования, и кривые из работы [55] имеют схожий характер – сначала идет возрастание кривой до максимального значения, а затем убывание. Значение максимума равно $K_{I_{\text{max}}} = 1,58$.

Отличия в кривых вызваны конструктивными особенностями исследуемых трансформаторов и допущениями, принятыми при моделировании. Ниже этот вопрос рассматривается более подробно.

Выводы по разделу 3

При проведении измерений мощности в электроэнергетических системах понятие реактивной мощности относят только к реактивной мощности основной гармоники. Реактивная мощность Будеану [37] не является величиной, которую следует применять при анализе работы системы в несинусои-

дальном режиме, когда присутствуют нелинейные элементы, служащие источниками гармоник.

На практике для учета влияния ГИТ на потребляемую СТ реактивную мощность можно использовать упрощенные линейные зависимости добавочной реактивной мощности от величины ГИТ, получаемые с помощью функции $f(i_{\text{ГИТ}})$, равной половине амплитуды основной гармоники тока намагничивания.

Проведены расчеты функции $f(i_{\text{ГИТ}})$ для автотрансформатора АОДЦТН – 267000/ 500/ 220 при различных ГИТ. Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что приближенные аппроксимации функции $f(i_{\text{ГИТ}})$ в виде прямой линии достаточно близки к расчетным кривым для конкретных СТ. Количественный анализ степени близости кривых был проведен на основе отношения $I_{m1} / i_{\text{ГИТ}}$. Наибольшее отличие функции $I_{m1} / i_{\text{ГИТ}}$ от константы $k = 2$ наблюдается при малых ГИТ – при $i_{\text{ГИТ}} = 10$ А отличие составляет 7,80 %. Было получено, что в интервале от $i_{\text{ГИТ}} = 20$ А до $i_{\text{ГИТ}} = 200$ А отличие не превышает 2,26 %.

Проанализированы вопросы воздействия геоиндуцированных токов на ЭЭС с точки зрения появления в токе намагничивания значительных гармонических составляющих. Рассмотрено влияние ГИТ на суммарный коэффициент гармонических составляющих тока намагничивания силового трансформатора. Проведены расчеты суммарного коэффициента гармонических составляющих для автотрансформатора АОДЦТН – 267000/ 500/ 220.

В результате получена зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих тока намагничивания K_I (ТНД) от ГИТ для автотрансформатора АОДЦТН – 267000/ 500/ 220. Показано, что при ГИТ в диапазоне 30–200 А в фазе суммарный коэффициент гармонических составляющих тока намагничивания K_I (ТНД) лежит в пределах 140–160 %, что говорит о сильной нелинейности тока намагничивания при воздействии ГИТ.

Кривая суммарного коэффициента гармонических составляющих тока намагничивания в зависимости от ГИТ имеет характерный вид: сначала идет возрастание кривой до максимального значения, а затем пологое убывание. Максимальное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих равно $K_{I_{\max}} = 1,58$ ($i_{\text{ГИТ}} = 70 \text{ А}$).

Выявлено, что способ аппроксимации кривой намагничивания оказывает сильное влияние на ход зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих. Принятая при моделировании подробная аппроксимация кривой намагничивания стали сердечника, учитывающая особенности этой кривой, дает более пологий характер зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих тока намагничивания K_I (THD) от ГИТ.

Заключение

В результате выполнения магистерской диссертации проведена оценка негативного влияния геоиндуцированных токов на работу силовых трансформаторов в составе ЭЭС. Выполнены: 1) Анализ механизма протекания геоиндуцированных токов через заземленные нейтрали трансформаторов. Анализ негативных последствий влияния геоиндуцированных токов на работу силовых трансформаторов; 2) Исследование теплового режима силового трансформатора при воздействии геоиндуцированного тока; 3) Исследование возникающих гармоник тока и реактивной мощности силового трансформатора при воздействии геоиндуцированного тока.

В разделе 1 рассмотрены проблемы, возникающие при воздействии геоиндуцированных токов на электроэнергетические системы. Выявлены негативные последствия насыщения силовых трансформаторов и автотрансформаторов с глухозаземленными нейтральями. Рассмотрен механизм протекания геоиндуцированных токов через заземленные нейтрали трансформаторов. Установлена связь насыщения с изменением теплового режима трансформаторов, с явлением дефицита реактивной мощности в ЭЭС, с появлением гармоник и ложными срабатываниями аппаратуры, в частности, реле. Рассмотрены этапы расчета ГИТ: геофизический и инженерный электроэнергетический. Приведена зависимость волнового сопротивления от частоты геомагнитного поля и удельной проводимости верхних слоев Земли. Предложена методика расчета ГИТ с помощью матрично-топологического метода.

В разделе 2 рассмотрены вопросы моделирования воздействия геоиндуцированных токов на режимы работы силового трансформатора, оказывающих негативное влияние на работу силовых трансформаторов и электроэнергетической системы в целом. Показано, что важнейшую роль играет моделирование магнитной системы силового трансформатора, связанное с нахождением магнитной индукции и магнитных потоков. Проведен анализ проблем, возникающих при задании кривой $f(H)$ намагничивания электро-

технической стали и её производной $g(H)$, которые необходимы для расчетов магнитных полей в виде гладких функций.

В разделе 3 разработана математическая модель, которая адекватно описывает сложный профиль бака силового однофазного автотрансформатора АОДЦТН – 267000/ 500/ 220. Данная математическая модель позволяет определить тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля рассеяния на поверхностях бака и вычислить дополнительные потери активной мощности от вихревых токов в стенках бака. Проведен гармонический анализ тока намагничивания АТ АОДЦТН – 267000/ 500/ 220 для различных значений ГИТ. Приводится таблица коэффициентов гармоник тока намагничивания при разных ГИТ. Предложены методики расчета вихревых потерь в баке и в обмотках, обусловленных действием ГИТ. Даются соответствующие графики. Проведен расчёт зависимостей превышения температуры ННТ обмотки над температурой окружающей АТ среды (воздуха) от величины ГИТ при различных нагрузках. Построены графики, позволяющие при заданных значениях ГИТ и температуры окружающего воздуха определять предельное по условиям нагрева значение коэффициента загрузки k_3 .

В разделе 4 рассмотрены вопросы реактивной мощности и гармоник. Показано, что на практике для учета влияния ГИТ на потребляемую СТ реактивную мощность можно использовать упрощенные линейные зависимости добавочной реактивной мощности от величины ГИТ. Проведены расчеты функции $f(i_{\text{ГИТ}})$ для автотрансформатора АОДЦТН – 267000/ 500/ 220 при различных ГИТ. Проанализировано влияние ГИТ на суммарный коэффициент гармонических составляющих тока намагничивания автотрансформатора АОДЦТН – 267000/ 500/ 220. В результате получена зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих тока намагничивания K_1 (ТНД) от ГИТ. Показано, что при ГИТ в диапазоне 30–200 А в фазе суммарный коэффициент K_1 (ТНД) лежит в пределах 140–160 %.

Список используемых источников

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. 12-е изд., испр. и доп. М.: Изд. Юрайт, 2019. 831 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 2. Электромагнитное поле : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. 12-е изд., испр. и доп. М.: Изд. Юрайт, 2020. 389 с.
3. Буль О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. М.: Academia, 2005.
4. Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А. Моделирование одностороннего насыщения магнитных систем силовых трансформаторов электроэнергетических систем // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 1 (30). С. 117-123.
5. Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Кретов Д.А., Самолина О.В., Дубинин М.В. Влияние конструкции силового трансформатора на намагничивание магнитопровода постоянным током // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2-1 (32-1). С. 30-35.
6. Вахнина В.В., Шаповалов В.А. Кузнецов В.Н. Разработка методики определения допустимой перегрузочной способности силовых трансформаторов систем электроснабжения при повышенной геомагнитной активности // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ-2017): Сб. трудов V Всерос. научно-техн. конф. (к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники). Тольятти: ТГУ, 2017. С. 21-26.
7. Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А. Влияние геоиндуцированных токов на тепловой режим силовых трансформаторов // Электротехника. 2016. № 1. С. 56а-64.
8. Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А., Горохов И.В., Черненко А.Н. Учет конструкции бака однофазного силового автотрансформатора

- электроэнергетических систем при расчете температуры его поверхностей // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 3 (32). С. 130-136.
9. Вахнина В.В. , Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А., Кретов Д.А. Тепловая нагрузка бака силового трансформатора при глубоком насыщении магнитной системы // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. №4 (18). С. 74-79.
 10. Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А., Самолина О.В. Моделирование процессов насыщения магнитной системы силового трансформатора при одновременном протекании по обмотке переменного и постоянного токов // Электротехника. –2017. № 4. С. 52-57.
 11. Вороненко, В.И. Разработка математической модели для моделирования переходных процессов в составе комплекса программ САПР ТОН / В.И. Вороненко // Сб. докл. XII Международ. науч._техн. конф. «Трансформаторостроение – 2009». Запорожье, 2009.
 12. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 35 с.
 13. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. М.: Стандартинформ, 2014. 28 с.
 14. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
 15. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 60 с.
 16. Готтер, Г. Нагревание и охлаждение электрических машин / Г. Готтер. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 480 с.
 17. Доклад А.Д. Гвишиани на заседании бюро ОНЗ РАН – Вестник ОНЗ РАН: Новости. [Электронный ресурс]. URL: https://onznews.wdcb.ru/news14/info_140116.html.

18. Забудский Е.И. Оптимизация управляемых электромагнитных реакторов на основе математического моделирования магнитного поля // International Journal "INFORMATION TECHNOLOGIES & KNOWLEDGE". 2013. Vol. 7. Number 2. С. 152-171.
19. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980. 352 с.
20. Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Мороз Е.Ю., Тарчуткин А.Л. Топологические модели трансформатора // Электричество. 2012. № 10. С. 33-42.
21. Киш, Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов : пер. с венгерск. / Л. Киш. М.: Энергия, 1980. 208 с.
22. Лейтес, Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес. М.: Энергия, 1981. 392 с.
23. Механизмы воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети : монография / В. В. Вахнина, А. А. Кувшинов, В. А. Шаповалов, Кузнецов В.Н., Селемир В.Д., Карелин В.И., Горохов В.В. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 254 с. : ил., табл.; 24 см.; ISBN 978-5-9729-0250-7.
24. Петров Г.В. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. М.: Энергия, 1974. 240 с.
25. Развитие устройств FACTS. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ruscable.ru/article/Razvitie_ustrojstv_FACTS.
26. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.
27. Трищенко, Л.Д. Геомагнитные возмущения и системы энергоснабжения и проводной связи // Плазменная гелиофизика. В 2 т. Т. 2. Под ред. Л.М. Зелёного, И.С. Веселовского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 213-219.
28. Черепахина, А.А. Применение сглаживающего кубического сплайна для аппроксимации температурных полей при решении обратной задачи теплопроводности – Заочные электронные конференции // Научный электронный архив. [Электронный ресурс]. URL: <http://econf.rae.ru/article/4813>.

29. Abda Z. M. K., Aziz N. F. A., Kadir M. Z. A. A., Rhazali Z. A. A Review of Geomagnetically Induced Current Effects on Electrical Power System: Principles and Theory // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 200237-200258.
30. ANSYS – Simulation Driven Product Development. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/>.
31. COMSOL Multiphysics® ПО для мультифизического моделирования. [Электронный ресурс] : COMSOL – разработчик программного пакета COMSOL Multiphysics, – интерактивной среды для моделирования и имитации научных и технических разработок. URL: <https://www.comsol.ru/>.
32. Girgis R., Vedante K., Gramm K. Effects of geomagnetically induced currents on power transformers and power systems // CIGRE session, 2012, A2 304.
33. IEC 60076-7. Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. 113 с.
34. IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances. IEEE Std C57.163-2015. 49 p.
35. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. IEEE Std C57.91-2011. 120 p.
36. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std 1459-2010. 52 p.
37. IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std 1459-2000. 50 p.
38. Joo B.-S., Woo J.-W., Lee J.-H., Jeong I., Ha J., Lee S.-H., Kim S. Assessment of the Impact of Geomagnetic Disturbances on Korean Electric Power Systems // Energies. 2018. Vol. 11. Issue 7. № 1920. 11 p.
39. Karsai, K. Large power transformers // Series – Studies in electrical and electronic engineering. Vol. 25. / K. Karsai, D. Kerényi, L. Kiss. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. 615 с.
40. Lahtinen M., Elovaara J. GIC Occurrences and GIC Tests for 400 kV System

- Transformer // IEEE Transactions on Power Delivery. 2002. Vol. 17. № 2. P. 555- 561.
41. Liu C., Ganebo Y. S., Wang H., Li X. Geomagnetically Induced Currents in Ethiopia Power Grid: Calculation and Analysis // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 64649-64658.
42. Kappenman J. Geomagnetic Storms and Their Impact on the U.S. Power Grid. Metatech Corporation. Meta-R-319. 2010. 197 p.
43. Meeker, D.C. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 (03 Nov 2013 Build). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.femm.info/>.
44. Naghshbandy A. H., Baayeh A. G., Faraji A. Blocking DC Flux due to Geomagnetically Induced Currents in the Power Network Transformers // 2019 International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran. 2019. Dec. P. 772-776.
45. Narendra, K. Wide Area Real Time GIC Monitoring using TESLA Phasor Measurement Unit (PMU). 2016. July. DOI: 10.13140/RG.2.1.4024.2168. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/305378684_White_Paper_on_Wide_Area_Real_Time_GIC_Monitoring_using_TESLA_Phasor_Measurement_Unit_PMU.
46. NERC. Application Guide: Computing Geomagnetically-Induced Current in the Bulk-Power System, December 2013. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nerc.com/comm/PC/Geomagnetic Disturbance Task Force GMDTF 2013/GIC Application Guide 2013_approved.pdf](https://www.nerc.com/comm/PC/Geomagnetic_Disturbance_Task_Force_GMDTF_2013/GIC_Application_Guide_2013_approved.pdf).
47. NERC. Geomagnetic Disturbance Planning Guide. December 2013. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nerc.com/comm/PC/Geomagnetic Disturbance Task Force GMDTF 2013/GMD Planning Guide_approved.pdf](https://www.nerc.com/comm/PC/Geomagnetic_Disturbance_Task_Force_GMDTF_2013/GMD_Planning_Guide_approved.pdf).
48. NERC. TPL-007-1 –Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance Events. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nerc.com/pa/Stand/Reliability Standards/TPL-007-1.pdf](https://www.nerc.com/pa/Stand/Reliability_Standards/TPL-007-1.pdf).
49. NERC. Transformer Thermal Impact Assessment White Paper. Project 2013-03 (Geomagnetic Disturbance Mitigation). TPL-007-1. Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance Events. [Электронный

- pecypc]. URL: https://www.nerc.com/pa/comp/guidance/EROEndorsedImplementationGuidance/TPL-007-1_Transformer_Thermal_Impact_Assessment_White_Paper.pdf.
50. Ning X., Liu Q., Cui X., Wang C., Wang Y. Research on Optimal placement for GIC mitigation with Blocking Device // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 533. 2019 The 5th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR 2019) 12–14 January 2019, Guangzhou, China. 012042. 9 p.
 51. Oliveira D.M., Ngwira C.M. Geomagnetically Induced Currents: Principles. Brazilian Journal of Physics. 2017. V. 47. P. 552–560.
 52. Picher P., Bolduc L., Dutil A., Pham V. Q. Study of the Acceptable DC Current Limit in Core-Form Power Transformers // IEEE Transactions on Power Delivery. 1997. Vol. 12. № 1. P. 257- 265.
 53. Proposed Terms and Definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS) // IEEE Transactions on Power Delivery. 1997. Vol. 12. No. 4. P. 1848-1853/
 54. Rezaei-Zare A. Behavior of Single-Phase Transformers Under Geomagnetically Induced Current Conditions // IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 29. No. 2. Apr. 2014. P. 916–925.
 55. Rezaei-Zare A., Etemadi A. GIC Mitigation in Power Systems Taking into Account Equipment Thermal Limits and Power System Operation Constraints // IEEE Transactions on Power Delivery. PP(99): 1-1. June 2017. P. 1-8.
 56. Rezaei-Zare A., Marti L., Narang A., Yan A. Analysis of Three-Phase Transformer Response due to GIC using an Advanced Duality-Based Model // IEEE Transactions on Power Delivery. 31(5): 1-1. January 2015. P. 1–8.
 57. Shewchuk J.R. Triangle. A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. Version 1.6 (released 28 Jul 2005). [Электронный pecypc]. URL: <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>.
 58. Thomson A. Geomagnetic observatories: Monitoring the Earth's magnetic and space weather environment // Weather. 2014. Sept. V. 69. № 9. P. 234–237.

59. Vakhnina V.V., Shapovalov V.A., Kuznetsov V.N., Kretov D.A. The influence of geomagnetic storms on thermal processes in the tank of a power transformer // IEEE Transactions On Power Delivery. 2015. T. 30. № 4. C. 1702-1707.
60. Zirka, S.E. Generalization of the classical method for calculating dynamic hysteresis loops in grainoriented electrical steels / S.E. Zirka, Y.I. Moroz, P. Marketos et al // IEEE Trans. Magn. 2008. № 9.