

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Степаненко Александр Алексеевич

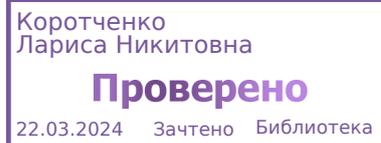
**Разработка и исследование специального
трансформатора для энергоснабжения объектов**

Направление подготовки

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2024



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель:

Сериков Александр Владимирович,
доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
«Электромеханика» ФГБОУ ВО
«КНАГУ»

Рецензент:

Киница Олег Игоревич,
кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по управлению персоналом и
административным вопросам ПАО
«Амурский судостроительный завод»

Защита состоится «22» февраля 2024 года в 09 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 203/3.

Секретарь ГЭК

Мельникова Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

На настоящем этапе развития народного хозяйства, несмотря на появление новых ферромагнитных и проводниковых материалов, приводящих к повышению коэффициента полезного действия трансформаторов, в силовых трехфазных трансформаторах величина активной мощности потерь может составлять сотни ватт и более. Данные потери приводят к нагреву трансформаторного масла, и, как следствие, передаче тепла в окружающую среду. Одним из способов повышения энергоэффективности трансформаторов, является использование тепловых потерь трансформаторов для обогрева как помещений трансформаторной подстанции, так и близлежащих объектов народного хозяйства, включая жилой фонд.

Тем не менее, модернизация теплоотвода от масляного трансформатора стандартной конструкции не может в полной мере решить задачу теплоснабжения окружающих объектов, в связи с чем в работе рассматриваются вопросы применения силовых масляных трансформаторов со специализированным узлом теплоотвода – нагревательным блоком. За счет высокой теплопроводности трансформаторного масла, обеспечение естественной или принудительной циркуляции масла в нагревательном блоке позволяет эффективно доставлять тепловую энергию близлежащим теплопотребителям. В работе, соответственно, рассматривается нагревательный блок силового масляного трансформатора с дополнительным нагревом теплоносителя за счет короткозамкнутого витка, нагрев которого приводит к выделению джоулева тепла в окружающую среду – трансформаторное масло, которое, в свою очередь, за счет перемешивания, доставляется к потребителю, где производится его охлаждение (теплоснабжение потребителей). В настоящее время комплексное исследование электромагнитных и тепловых процессов в подобных трансформаторах специального назначения не проводилось, что не позволяет давать рекомендации по проектированию, конструированию и применению

таких устройств.

Таким образом, разработка и исследование специальных трансформаторов для электроснабжения и теплового обеспечения объектов является актуальной задачей.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является силовой трансформатор специального назначения с нагревательным блоком, содержащим короткозамкнутый виток для нагрева теплоносителя. Предметом исследования являются электромагнитные и тепловые процессы в трансформаторе с нагревательным блоком, алгоритмы и законы управления коммутатором короткозамкнутого витка.

Цели и задачи.

Целью диссертации является повышение энергоэффективности силового масляного трансформатора. Для этого сформулированы следующие задачи:

1. Анализ способов повышения энергоэффективности трансформаторов.
2. Исследование процессов теплообмена между конструктивными элементами трансформатора, нагреваемым теплоносителем и окружающей средой.
3. Исследование электромагнитных процессов в трансформаторах с нагревательным блоком.

Научная новизна.

К научной новизне проведенного исследования может быть отнесено углубление вопроса энергосбережения за счет использования тепловых потерь без дополнительных преобразований электроэнергии. Сформулирован термин «коэффициент полезного использования потерь». Разработанная в ходе исследования математическая имитационная модель нагревательного блока трансформатора специального назначения позволила оценить электромагнитную совместимость при коммутации нагревательного блока.

Практическая ценность работы заключается:

В ходе выполнения диссертационного исследования получены математические модели, позволяющие исследовать тепловые и электромагнитные процессы в трансформаторе специального назначения.

Методы исследований.

Полученные в работе результаты теоретических исследований выполнены на основе математического моделирования электротехнических систем, теории электрических цепей, теории электропривода, автоматического управления и вычислительного эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Повышение энергоэффективности силового трансформатора за счет использования тепловых потерь.
2. Математическая модель тепловых процессов
3. Математическая модель электромагнитных процессов
4. Анализ влияния коммутации нагревательного блока на электрическую сеть общего назначения

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в трех сборниках по результатам международной и всероссийских конференций.

Апробация результатов. Результаты исследований докладывались:

- на VI Международной научно-практической конференции молодых ученых «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022 год.

- на V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022 год.

- на VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2023 год.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и из 27 наименований. Работа изложена на 99 страницах, содержит 46 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведено обоснование необходимости применения в народном хозяйстве РФ децентрализованных систем теплоснабжения, описана проблематика использования тепловых потерь в силовых трансформаторах и показана необходимость разработки, конструирования и внедрения трансформаторов специального назначения в субъектах и регионах РФ, в которых невозможна организация централизованного теплоснабжения. Показана актуальность, научная и практическая значимость данного направления исследований, а также сформулированы объект, предмет и методы исследования.

В первой главе рассмотрены теоретические основы работы силовых трансформаторов, как статических электромагнитных преобразователей параметров электрической энергии. Рассмотрен подход к анализу процессов в силовом масляном трансформаторе с позиции теплотерь, которые, в настоящем исследовании, рассматриваются, как цель управления. Рассмотрены конструкции и тепловые циклы в силовых трансформаторах с естественной (рисунок 1а) и принудительной (рисунок 1б) циркуляцией теплоносителя.

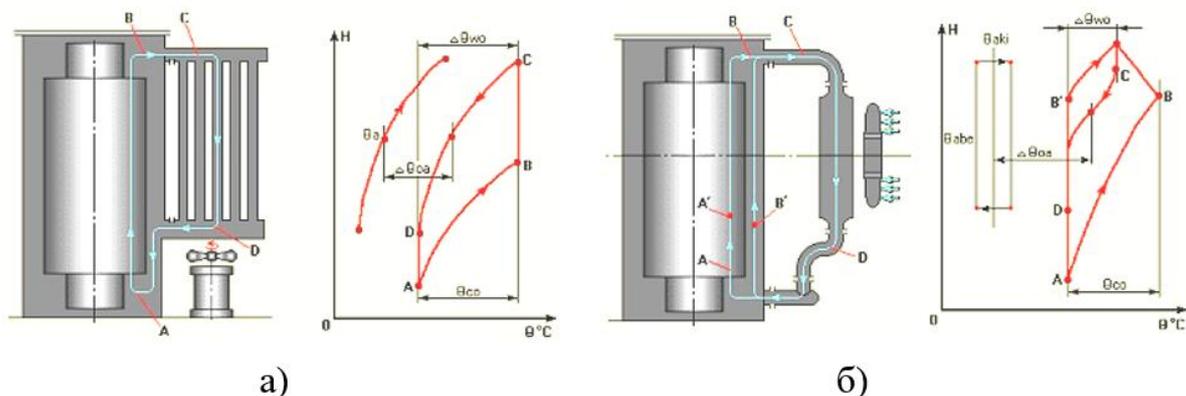


Рисунок 1 – Конструкции и тепловые циклы трансформаторов с естественной (а) и принудительной (б) циркуляцией теплоносителя

Рассмотрено применение трансформаторов с нагревательными блоками в составе последовательной (рисунок 2а) и параллельной (рисунок 2б) схем теплоснабжения. Показано, что применение силовых трансформаторов специального назначения с нагревательными блоками оправдано при проектировании новых трансформаторных подстанций, так как интеграция систем электро- и теплоснабжения требуют введения других конструктивных подходов уже на этапе строительства сооружений.

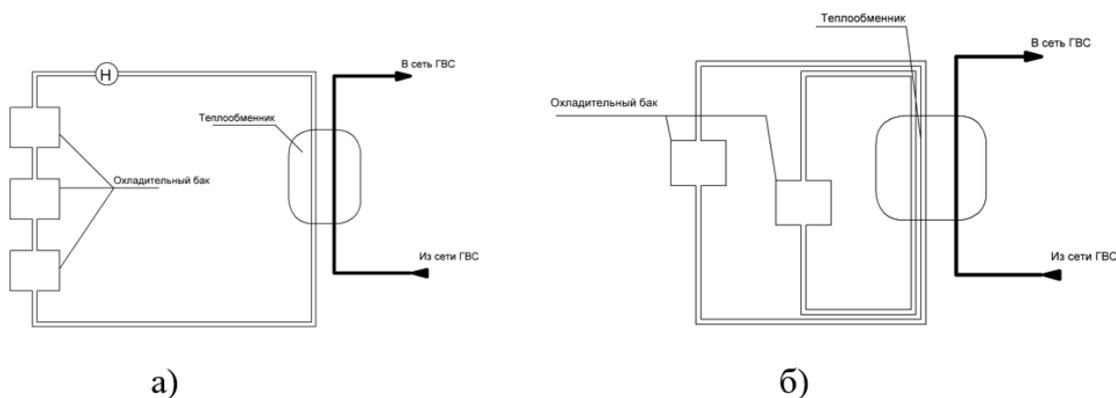


Рисунок 2 – Схемы соединения нагревательных блоков с сетями ГВС
(а – последовательная схема; б – параллельная схема)

Предложен специальный трансформатор (рисунок 3), в котором нагревательный элемент и теплообменник объединены в один узел – нагревательный модуль (НМ), в состав которого входит нагревательный контур (НК) и тиристорный коммутатор (ТК), состоящий из встречно-параллельно включенных тиристоров. НК представляет собой замкнутый с помощью ТК электропроводный полый виток из немагнитного материала, внутри которого циркулирует нагреваемый теплоноситель. Такой теплообменник может устанавливаться как на активной части трансформатора, так и вне ее, но внутри бака трансформатора. НМ позволяет более эффективно утилизировать часть потерь силового трансформатора и подогревать теплоноситель до необходимой рабочей температуры.

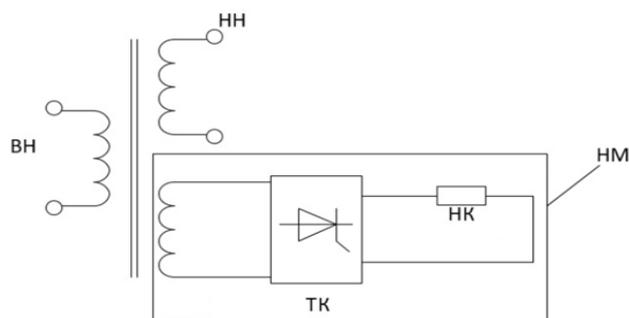


Рисунок 3 – Схема трансформатора с нагревательным модулем

Для повышения эффективности НК должен представлять собой теплообменник с развитой поверхностью теплообмена. НК целесообразно располагать в верхней части трансформатора, где масло нагревается до более высоких температур. ТК позволяет работать НМ в двух режимах: активном и пассивном. Пассивный режим характеризуется непроводящим состоянием тиристоров (то есть закрытое состояние). В этом режиме тепло от трансформаторного масла будет передаваться нагреваемой жидкости. В активном режиме тиристоры находятся в проводящем состоянии. По НК протекают токи, за счет которых происходит подогрев теплоносителя до требуемой (рабочей) температуры.

Достоинства предложенной схемы трансформатора с НМ заключаются в отсутствии вынесенного отдельного теплообменника, что значительно удешевляет и упрощает систему. Нет необходимости в циркуляционном насосе для трансформаторного масла, требуется меньший его объем.

Во второй главе рассмотрены тепловые процессы в трансформаторе специального назначения.

Для построения математической модели тепловых процессов использована тепловая схема замещения трансформатора (рисунок 5).

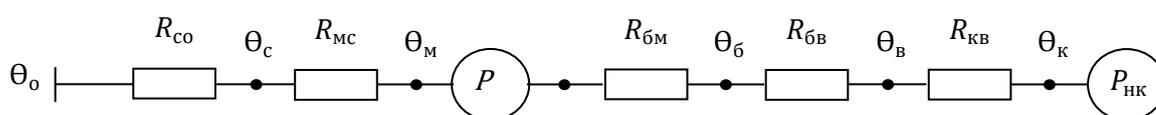


Рисунок 4 – Тепловая схема замещения силового трансформатора с нагревательным блоком

На основе тепловой схемы замещения составлена математическая модель в виде системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned}\theta_M \cdot (\Lambda_{\text{бМ}} + \Lambda_{\text{МС}}) - \theta_{\text{б}} \cdot \Lambda_{\text{бМ}} - \theta_{\text{С}} \cdot \Lambda_{\text{МС}} &= P, \\ \theta_{\text{б}} \cdot (\Lambda_{\text{бМ}} + \Lambda_{\text{бВ}}) - \theta_M \cdot \Lambda_{\text{бМ}} &= \theta_{\text{В}} \cdot \Lambda_{\text{бВ}}, \\ \theta_{\text{С}} \cdot (\Lambda_{\text{СО}} + \Lambda_{\text{МС}}) - \theta_M \cdot \Lambda_{\text{МС}} &= \theta_{\text{О}} \cdot \Lambda_{\text{СО}}, \\ \theta_{\text{К}} \cdot \Lambda_{\text{КВ}} - \theta_{\text{В}} \cdot \Lambda_{\text{КВ}} &= P_{\text{НК}}.\end{aligned}$$

Результаты расчета позволили определить основные тепловые потоки, обусловленные потерями холостого хода и короткого замыкания.

Результаты расчета показали, что небольшая часть тепловых потерь идет на нагрев теплоносителя ($Q_{\text{в}}$ составила 3,67 кВт), а большая часть рассеивается в окружающую среду с помощью основной системы охлаждения трансформатора ($Q_{\text{о}}$ составила 16,72 кВт). При этом коэффициент $K_{\text{исп}}$ получился равным 0,18, то есть 18 % потерь можно полезно использовать для нагрева теплоносителя.

Исходя из полученных расчетов, можно сделать вывод о недостаточной эффективности полезного использования потерь в классической конструкции силового масляного трансформатора. В качестве мер, направленных на повышение $K_{\text{исп}}$, является увеличение тепловых сопротивлений $R_{\text{МС}}$ и $R_{\text{СО}}$ и уменьшение тепловых сопротивлений $R_{\text{бМ}}$, $R_{\text{бВ}}$. Эффективно уменьшить $R_{\text{бВ}}$ можно за счет интенсификации теплообмена между нагревательным блоком и нагреваемым теплоносителем за счет увеличения поверхности теплообмена и за счет повышения скорости протекания теплоносителя в НБ. Это направление требует совершенствования конструкции активной части силового трансформатора и выбора эффективного активного режима работы НК. Увеличение теплового сопротивления $R_{\text{СО}}$ возможно за счет уменьшения конвективной поверхности теплообмена радиаторов. Это направление требует модернизации системы охлаждения силового трансформатора в направлении возможности изменения поверхности и (или) интенсивности теплообмена с окружающей средой. Такой путь совершенствования трансформаторного оборудования требует дополнительного анализа его теплового режима.

Таким образом разработана математическая модель тепловых процессов в специальном трансформаторе с нагревательным блоком. Получена упрощенная линейная тепловая схема замещения. Оценка эффективности нагревательного блока производилась с помощью коэффициента полезного использования силового трансформатора. Для трансформатора мощностью 1600 кВА этот коэффициент составил 18 %.

В третьей главе произведен анализ электромагнитных процессов в силовом трансформаторе специального назначения с нагревательным блоком и особенности организации децентрализованных систем теплоснабжения на базе таких устройств.

Для разработки математической модели электромагнитных процессов, протекающих при коммутации в цепи нагревательного блока силового трансформатора специального назначения, использована эквивалентная схема, приведенная на рисунок 5.

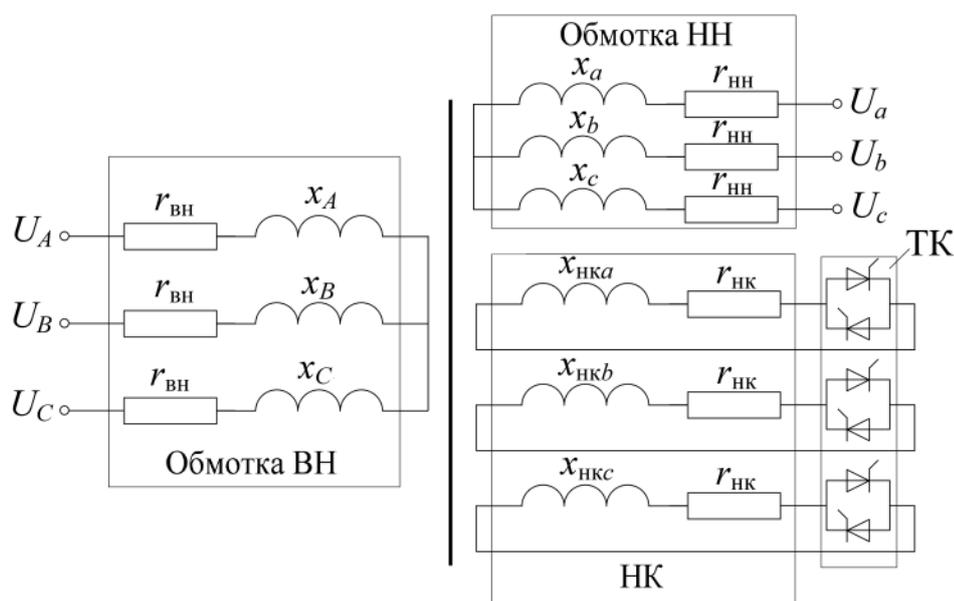


Рисунок 5 – Схема исследуемого трансформатора

В конструкцию рассматриваемого трансформатора входит три трехфазных обмотки (всего девять магнитно-связанных электрических контуров), следовательно, математическая модель состоит из девяти дифференциальных уравнений равновесия напряжений для каждого контура.

С учетом того, что вторичная обмотка приведена к первичной, система дифференциальных уравнений будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 U_A &= r_{\text{ВН}} i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, & U_a &= r_{\text{НН}} i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}, & U_{\text{НКА}} &= r_{\text{НК}} i_{\text{НКА}} + \frac{d\Psi_{\text{НКА}}}{dt}, \\
 U_B &= r_{\text{ВН}} i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, & U_b &= r_{\text{НН}} i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}, & U_{\text{НКБ}} &= r_{\text{НК}} i_{\text{НКБ}} + \frac{d\Psi_{\text{НКБ}}}{dt}, \\
 U_C &= r_{\text{ВН}} i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}, & U_c &= r_{\text{НН}} i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}, & U_{\text{НКС}} &= r_{\text{НК}} i_{\text{НКС}} + \frac{d\Psi_{\text{НКС}}}{dt},
 \end{aligned}$$

где U_A, U_B, U_C – фазные напряжения обмотки ВН;

U_a, U_b, U_c – фазные напряжения обмотки НН;

$U_{\text{НКА}}, U_{\text{НКБ}}, U_{\text{НКС}}$ – напряжения на соответствующих фазах НК;

$i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c, i_{\text{НКА}}, i_{\text{НКБ}}, i_{\text{НКС}}$ – фазные токи обмотки ВН, обмотки НН и НК, соответственно;

$r_{\text{ВН}}, r_{\text{НН}}, r_{\text{НК}}$ – активные сопротивления фаз обмоток ВН, НН и НК, соответственно;

$\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c, \Psi_{\text{НКА}}, \Psi_{\text{НКБ}}, \Psi_{\text{НКС}}$ – полные потокосцепления соответствующих контуров.

На основе предложенных дифференциальных уравнений в среде Matlab/Simulink составлена имитационная модель нагревательного блока (рисунок 6).

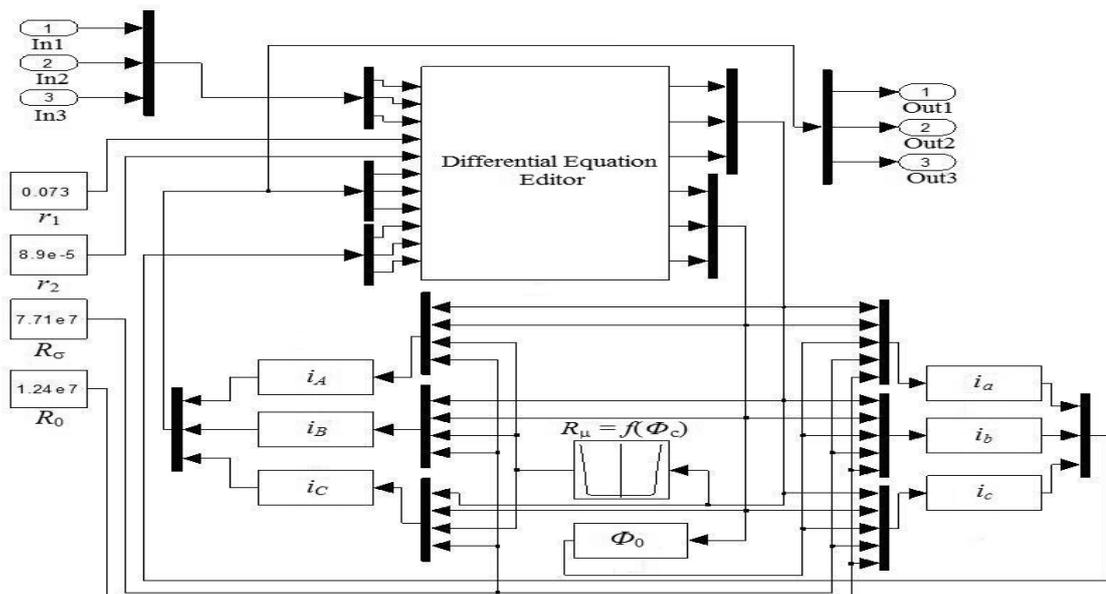


Рисунок 6 - Компьютерная Simulink-модель нагревательного блока

Используя компьютерную модель, проведены различные исследования для НБ с короткозамкнутой вторичной обмоткой мощностью 40 кВт. В частности, было исследовано влияние начальной фазы φ_0 питающего напряжения, которая в реальных условиях работы является величиной случайной, на броски тока в первичной обмотке устройства.

Анализ полученных результатов показал, что наихудшим моментом включения трехфазного НБ в сеть является вариант при начальной фазе $\varphi_0 = 0$, $\varphi_0 = \pi/3$ и $\varphi_0 = 2\pi/3$ (рисунок 7). Максимальный бросок тока при $\varphi_0 = 0$ в фазе *A* ($I_{am} = 2,02I_{амн}$), тогда как в фазах *B* и *C* имеет место минимальный всплеск тока. Так же нежелательно включение при $\varphi_0 = \pi/3$ ($I_{am} = 1,03I_{амн}$; $I_{bm} = 1,03I_{бмн}$; $I_{cm} = 2,02I_{смн}$). Рассмотрев и проанализировав переходные процессы при различных начальных фазах φ_0 , можно сделать вывод, что наиболее благоприятным является включение трёхфазного НБ в сеть при $\varphi_0 = \pi/2$ ($I_{am} = 1,03I_{амн}$; $I_{bm} = 1,26I_{бмн}$; $I_{cm} = 1,26I_{смн}$) и при $\varphi_0 = \pi/6$ ($I_{am} = 1,26I_{амн}$; $I_{bm} = 1,03I_{бмн}$; $I_{cm} = 1,26I_{смн}$).

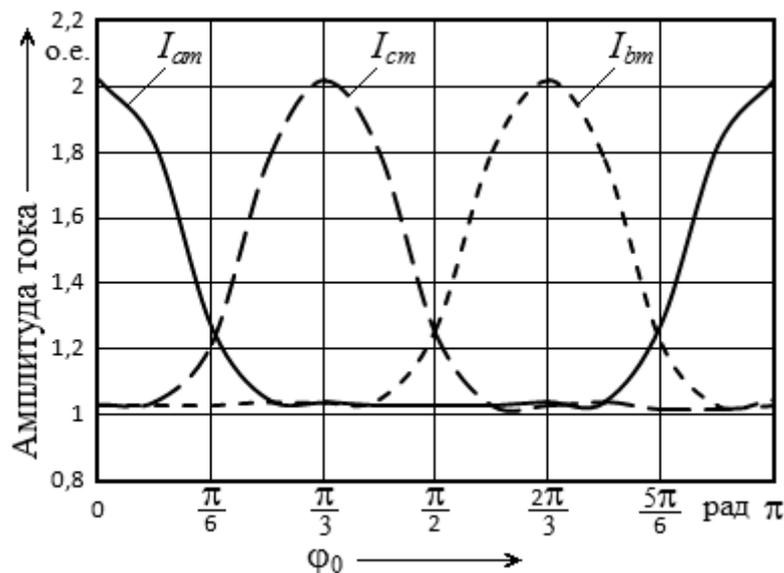
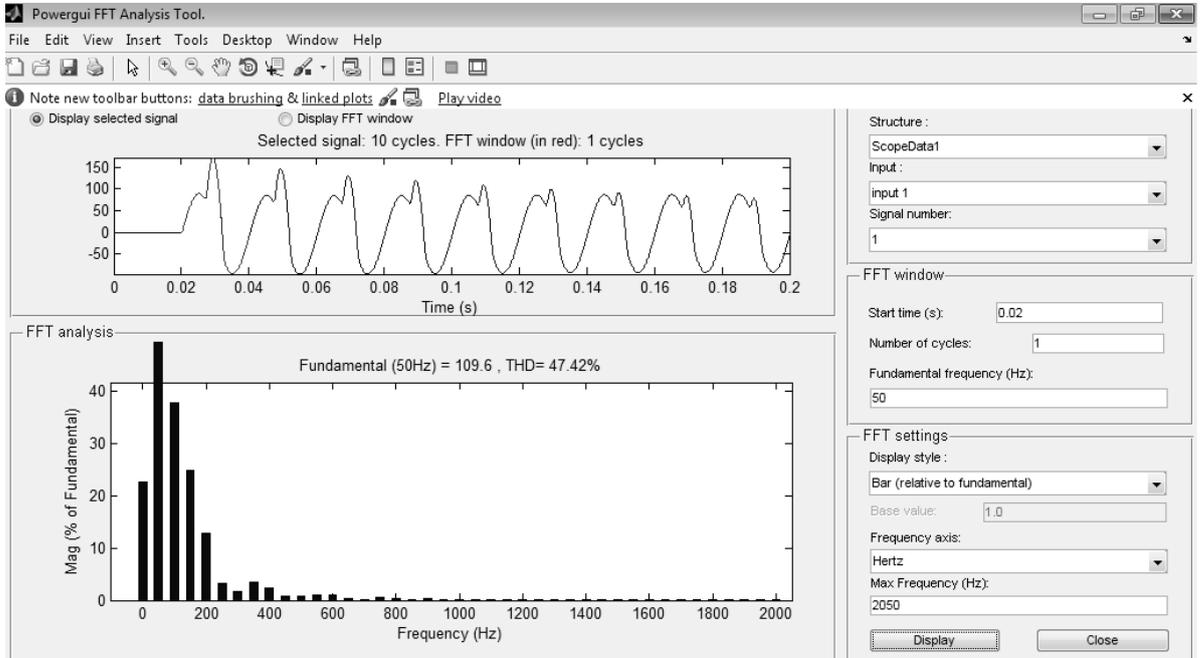


Рисунок 7 – Результаты исследования

Анализ гармонического состава кривых токов и напряжений проводился с помощью встроенного в пакет MatLab инструмента Powergui FFT Analysis Tool. Результаты разложения в ряд Фурье и результаты расчётов общего

коэффициента искажения синусоидальности кривых токов и напряжений и коэффициентов ν -ой гармонической составляющих в случае, когда угол включения имеет значение $\varphi_0 = 0$, приведены на рисунке 8.

а)



б)

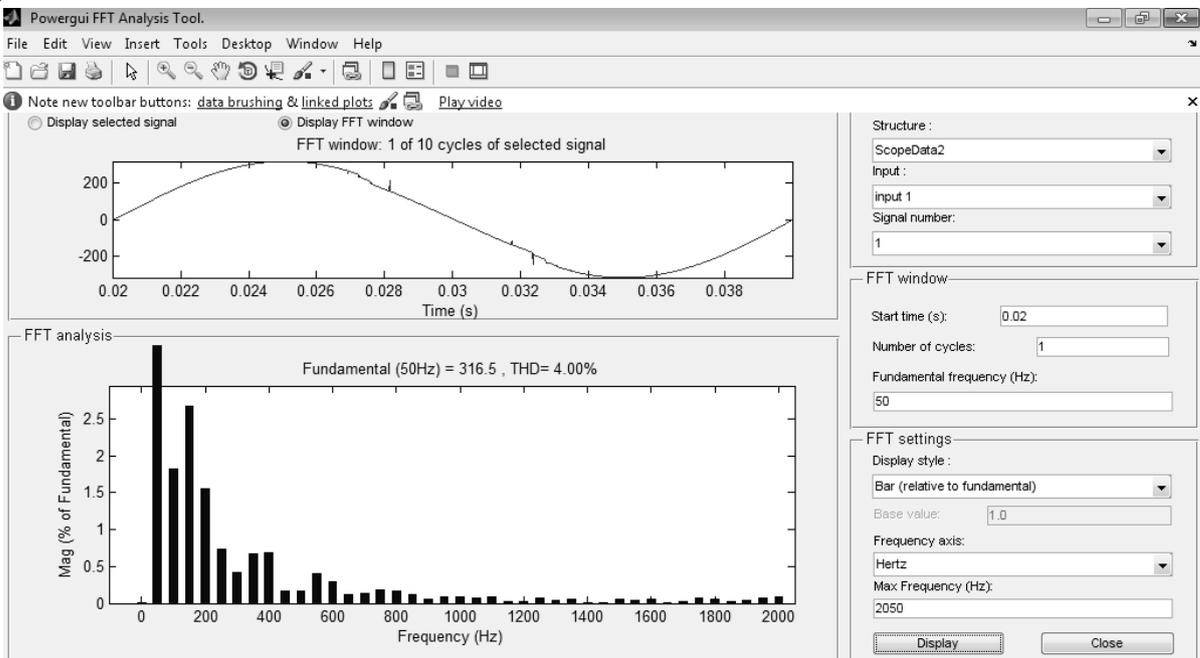


Рисунок 8 – Результаты гармонического анализа при $\varphi_0 = 0$:

а) для тока I_A ; б) для напряжения U_A

На рисунке 9, а показаны коэффициенты искажения потребляемого тока k_I при включении НБ мощностью 40 кВт с разными углами начальной фазы φ_0 , а на рисунок 9, б – коэффициенты искажения синусоидальности напряжений. Из графиков видно, что при любом значении φ_0 коэффициенты искажений для фазных (k_{UA} , k_{UB} и k_{UC}) и линейных (k_{UAB} , k_{UBC} и k_{UCA}) напряжений входят в допустимый нормативным документом предел (предельно допустимое значение для $k_U = 12\%$ [5]). Так же получены коэффициенты v -ой гармонической составляющей напряжения фазы А для $v = 2, 3, 4 \dots 10$. Результаты приведены в таблице 1. Другие гармоники не рассматривались ввиду их малого влияния на кривые напряжения при рассматриваемых углах φ_0 .

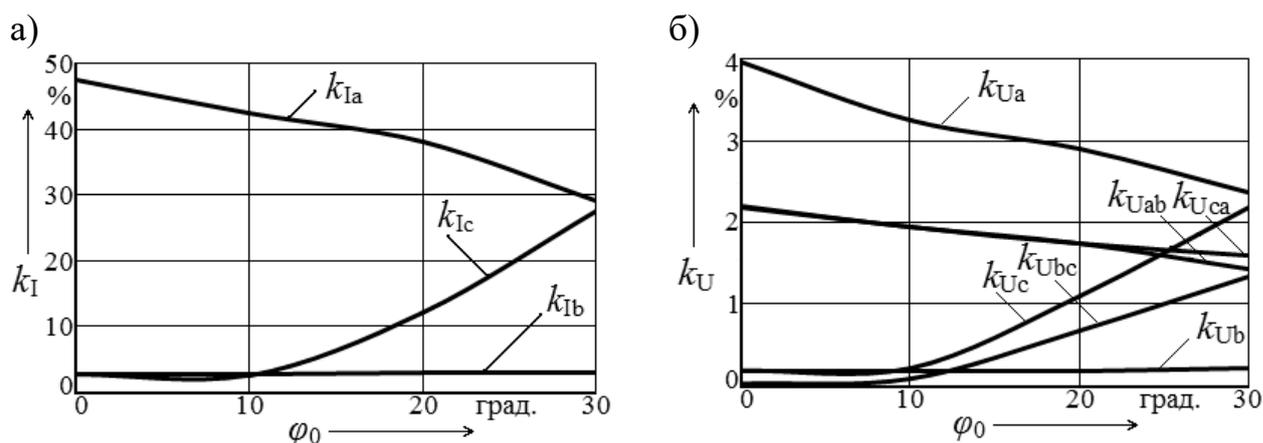


Рисунок 9 – Зависимости для коэффициентов искажения

Оценка длительности переходного процесса при самом неблагоприятном моменте включения данного устройства ($\varphi_0 = 0$) показывает, что время окончания переходного процесса $t_k \approx 2,9$ с. Зная величины бросков тока и время переходного процесса можно производить настройку защитной аппаратуры, делая небольшой запас (2...5%), ввиду вводимых допущений и некоторых погрешностей расчёта. Так же максимальные броски токов позволяют оценить механическую прочность конструкции при возникновении дополнительных электромагнитных сил, действующих на обмотки.

Таблица 1 - Результаты гармонического анализа

Номер гармоники, ν	Коэффициент ν -ой гармонической составляющей напряжения фазы A , %				Предельно допустимое значение [5], %
	$\varphi_0 = 0$	$\varphi_0 = \pi/18$	$\varphi_0 = \pi/9$	$\varphi_0 = \pi/6$	
2	1,90	1,73	1,42	0,98	3,00
3	2,69	1,87	1,58	1,18	3,75
4	1,55	1,51	1,39	1,19	1,50
5	0,70	0,85	0,94	0,99	9,00
6	0,44	0,18	0,39	0,61	0,75
7	0,70	0,28	0,08	0,24	7,50
8	0,68	0,46	0,33	0,04	0,75
9	0,15	0,39	0,38	0,19	1,13
10	0,17	0,19	0,29	0,26	0,75

Из таблицы 1 видно, что в рассматриваемом спектре гармонических составляющих напряжения фазы A только коэффициент 4-ой гармоники при $\varphi_0 = 0$ и $\varphi_0 = \pi/18$ незначительно превышает предельно допустимые значения. Причём с увеличением угла φ_0 эти гармонические составляющие приходят в норму. Остальные гармоники из выделенного спектра находятся в допустимых пределах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации решены актуальные задачи, связанные с повышением энергоэффективности силовых трансформаторов за счет полезного использования тепловых потерь. Основные научные результаты и выводы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ способов повышения энергоэффективности трансформаторов. Предложено для повышения энергоэффективности использование нагрева теплоносителя при теплоснабжении объектов.

2. Разработана тепловая схема замещения силового трансформатора с нагревательным блоком. Получена математическая модель тепловых процессов. Определен коэффициент полезного использования потерь.

3. Разработана математическая модель электромагнитных процессов трансформатора с нагревательным блоком. Эта модель реализована в программе MatLab. Получены результаты, позволяющие оценить влияние

коммутации вентиля в цепи нагревательного блока на нагрузку, подключенную к обмотке низкого напряжения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Степаненко, А. А. Анализ использования тепловых потерь в силовом масляном трансформаторе с нагревательным блоком / А. А. Степаненко, А. В. Сериков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых. В 2-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 273-276. – EDN JFXNYI.

2. Степаненко, А. А. Математическая модель силового трансформатора специального назначения / А. А. Степаненко, А. В. Сериков // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 10–14 апреля 2023 года. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 374-377. – EDN PCQVAZ.

3. Степаненко, А. А. Использование нагревательного блока для повышения энергоэффективности трансформатора / А. А. Степаненко, А. В. Сериков // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 165-167. – EDN ZPISLE.