

В. А. Кобозев, М. А. Мельников, А. И. Адошев

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПБВ

Учебное пособие
для выполнения курсовой работы
по дисциплине «Электрические машины»

Ставрополь, 2025

УДК 621.3
ББК31.2
К55

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедры АЭС СКФУ *А.В. Петров*

Кобозев В. А.

К55 Расчет параметров и характеристик трансформаторов с ПБВ: учебное пособие для выполнения курсовой работы по дисциплине «Электрические машины» / В. А. Кобозев, М. А. Мельников, А. И. Адошев. - Ставрополь: Сервисшкола, 2025. - 64 с.

В учебном пособии приведены общие сведения о назначении, устройстве и нормируемых параметрах трансформаторов с ПБВ, изложена методика расчета их параметров, внешних и энергетических характеристик на регулировочных отпайках, и обоснования выбора отпаяк ПБВ.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 - «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Системы электроснабжения городов, промышленных предприятий, сельского хозяйства, и их объектов»).

УДК 621.3
ББК31.2

©Авторы, 2025

ВВЕДЕНИЕ

В электрических сетях Российской Федерации насчитывается более 800 тысяч силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ, которые являются важными элементами систем электроснабжения потребителей.

Одной из наиболее сложных задач, возникающих в процессе их эксплуатации, является обеспечение нормируемых значений вторичных напряжений. Для этой цели трансформаторы снабжаются устройствами переключения без возбуждения (ПВВ), принцип действия которых основан на изменении коэффициента трансформации путем изменения количества витков в обмотках. При переключениях отпаяк ПВВ изменяются мощность трансформатора, сопротивления обмоток, потери холостого хода, оптимальные коэффициенты загрузки и другие параметры, влияющие на величину выходного напряжения, потери и КПД, в то время как указываемые заводами-изготовителями нормируемые параметры относятся только к так называемому «нулевому» положению отпаяк.

Расчеты различных характеристик трансформаторов основаны на использовании схем их замещения, уточнение параметров которых при различных положениях отпаяк ПВВ является важной задачей.

Помимо собственных параметров трансформаторов на их характеристики влияет первичное напряжение, допустимые пределы изменения которого согласно действующему в настоящее время ГОСТ 32144-2013 составляют $\pm 10\%$.

Вторичное напряжение и КПД трансформаторов зависят от их нагрузки, которая может изменяться в широких пределах, и каждому ее значению соответствует определенное положение отпаяк ПВВ, при котором достигаются наилучшие результаты.

Учитывая важность этих вопросов при подготовке специалистов по направлению 13.03.02 - «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки - «Системы электроснабжения городов, промышленных предприятий, сельского хозяйства и их объектов») в программу курса «Электрические машины» включена курсовая работа, целью которого является углубленное изучение методов расчета параметров и характеристик силовых трансформаторов с ПВВ.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью курсовой работы является систематизация и углубление знаний по дисциплине «Электрические машины», получение навыков их использования при решении практических задач по эксплуатации трансформаторов с ПБВ, и подготовка к выполнению соответствующих разделов выпускной квалификационной работы.

Основные задачи курсовой работы.

- Получение навыков использования научно-технической, нормативной, справочной литературы, и других информационных ресурсов при решении практических задач.
- Получение навыков определения параметров трансформаторов на отпайках ПБВ по паспортным данным.
- Получение навыков расчета внешних и энергетических характеристик трансформаторов на отпайках ПБВ.
- Получение навыков обоснованного выбора отпаек ПБВ в соответствии с режимами работы электрических сетей.
- Получение навыков оформления расчетно-пояснительной записки и графической части в соответствии с требованиями ЕСКД.
- Получение навыков защиты выбранных решений.

СОСТАВ, СОДЕРЖАНИЕ И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Состав курсовой работы. расчетно-пояснительная записка объемом 30 - 35 страниц печатного текста формата А4 и 1 лист графической части формата А1.

Содержание расчетно-пояснительной записки.

- Титульный лист (приложение 1).
- Задание (приложение 2).
- Аннотация (не более 1 страницы) представляет собой краткое изложение основного содержания курсовой работы.
- Введение. Кратко обосновывается актуальность проблемы, приводятся цель и основные задачи курсовой работы. Объем введения не должен превышать 2 страниц.

- Первый раздел содержит паспортные данные трансформатора в соответствии с заданием, краткое описание ПБВ, расчет параметров схемы замещения на основных отпайках. Рекомендуемый объем составляет 4-5 страниц.
- Во втором разделе дается расчет параметров трансформатора на отпайках ПБВ при условиях, приведенных в задании. Рекомендуемый объем составляет 8-10 страниц.
- В третьем разделе приводятся методика и результаты расчета внешних и энергетических характеристик. Рекомендуемый объем составляет 10-12 страниц.
- Четвертый раздел является заключительным и содержит обоснование выбора отпайки ПБВ при заданных условиях. Рекомендуемый объем составляет 2-3 страницы.
- В заключении (не более 1 страницы) приводятся основные результаты, полученные в ходе выполнения курсовой работы.
- В списке использованной литературы приводятся реквизиты книг, статей, каталогов, INTERNET - ресурсов, и других источников, которые использовались при выполнении работы.
- В содержании приводятся наименования разделов и подразделов с указанием их нумерации и страниц.

Содержание листа графической части.

- Схема замещения трансформатора и ее параметры на отпайках ПБВ.
- Внешние и энергетические характеристики трансформатора на выбранных отпайках.

Правила оформления курсовой работы

Расчетно-пояснительная записка и графическая часть оформляются в соответствии с требованиями Государственного стандарта РФ от 1.07.1996 г. «Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам».

Текст расчетно-пояснительной записки необходимо излагать технически грамотным языком, в логической последовательности, делая по ходу расчетов краткие необходимые пояснения, соблюдая единую терминологию и однозначные обозначения одних и тех же параметров. Не следует применять обороты разговорной речи, произволь-

ные словообразования, сокращения слов, кроме установленных правилами орфографии, а также различные математические знаки вместо слов (например, «-» вместо «минус»), «=» вместо «равно»). Ссылки на литературу указываются в квадратных скобках.

Каждая страница текста нумеруется арабскими цифрами, проставляемыми внизу по центру страницы. Содержание расчетно-пояснительной записки разбивается на разделы и подразделы, которые должны иметь наименования и порядковую нумерацию. Каждый из основных разделов начинается с новой страницы.

В формулах следует применять установленные стандартами обозначения. Единицы измерения должны соответствовать международной системе СИ. Расшифровка входящих в формулы символов и коэффициентов (если они не расшифрованы ранее в тексте) дается непосредственно под формулой. Формулы нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках пределах раздела, которые проставляются справа на уровне формулы. Нумерация состоит из разделенных точкой номера раздела и порядкового номера формулы. Ссылки на формулы в тексте даются в круглых скобках.

Лист графической части сопровождается основной надписью (рисунок В.1), в которой указываются:

1. Наименование листа.
2. Обозначение документа (КР - курсовая работа; номер зачетной книжки; номер листа).
3. Наименование документа (курсовая работа).
4. Литера (учебная - У).
5. Масса (если имеется)
6. Масштаб.
7. Порядковый номер листа.
8. Общее количество листов.
9. Наименование предприятия, выпускающего документ (наименование ВУЗа и кафедры).
10. Должность лица, подписавшего документ.
11. Фамилия лица, подписавшего документ.
12. Подпись.
13. Дата.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Глава 1. Общие сведения о трансформаторах с ПБВ

1.1. Устройство и нормируемые параметры силовых трансформаторов 6 - 10/0,4 кВ

Силовые трансформаторы 6 - 10/0,4 кВ используются в электрических сетях для преобразования высокого напряжения 10 кВ, на котором электроэнергия передается на относительно большие расстояния по сетям 6 - 10 кВ, в напряжение 0,4 кВ, при котором осуществляется ее распределение непосредственно потребителям. Отличительной их особенностью является обязательное наличие выведенной нейтрали (нулевого провода), что необходимо для питания однофазных потребителей.

В электрических сетях Российской Федерации насчитывается более 800 тысяч силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ, которые являются важными элементами систем электроснабжения потребителей.

Одной из наиболее сложных задач, возникающих в процессе эксплуатации трансформаторов, является обеспечение достаточной стабильности вторичного напряжения, отклонения которого от номинального значения согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная» не должны превышать $\pm 10\%$

Различают два основных способа регулирования напряжения трансформаторов: переключение без возбуждения (ПБВ) и регулирование под нагрузкой (РПН). Оба способа связаны с изменением коэффициента трансформации путем переключения выводов обмоток.

Трансформаторы с ПБВ, применяемые в сетях 6 - 10/0,4 кВ, имеют по пять ответвлений в первичных обмотках, одно из которых соответствует номинальному напряжению, и называется «нулевым», а другие - напряжениям, отличающимся от номинального значения на $\pm 2,5\%$ и $\pm 5\%$. Ответвления размещают с таким расчетом, чтобы действие электродинамических сил на отключаемые витки было минимальным. Для переключений используются специальные переключатели ПБВ различных типов, которые приводятся в действие вручную.

На рис. 1.1 показано устройство переключателя ПБВ барабанного типа. Контактная система состоит из неподвижных контактов - полых токоведущих стержней 3 ($A_1 - A_6$ на рисунке), которые соеди-

нены с ответвлениями от обмоток 2, и подвижных контактных колец 5, замыкающих между собой нужные пары неподвижных контактов. Контактные кольца перемещаются коленчатым валом 4, ось которого с помощью изолирующей штанги 6 соединяется с приводом, установленным на крышке трансформатора. Привод переключателя осуществляется при помощи установленной на крышке или стенке бака трансформатора рукоятки. При положении подвижного кольца 5, указанном на рис. 1.1-б, замкнуты выводы $A_4 - A_5$, что соответствует нулевому положению переключателя. При повороте по часовой стрелке замыкаются вначале выводы $A_4 - A_3$, а затем выводы $A_3 - A_3$, при этом количество витков в первичной обмотке и коэффициент трансформации увеличиваются, что приводит к уменьшению напряжения на выводах вторичной обмотки на 2,5% и 5%. При повороте против часовой стрелки вначале замыкаются выводы $A_5 - A_6$, затем - выводы $A_6 - A_6$, количество витков в первичной обмотке и коэффициент трансформации уменьшаются, а вторичное напряжение возрастает на 2,5% и 5%.

Все переключения ПБВ производятся только при полностью отключенном трансформаторе.

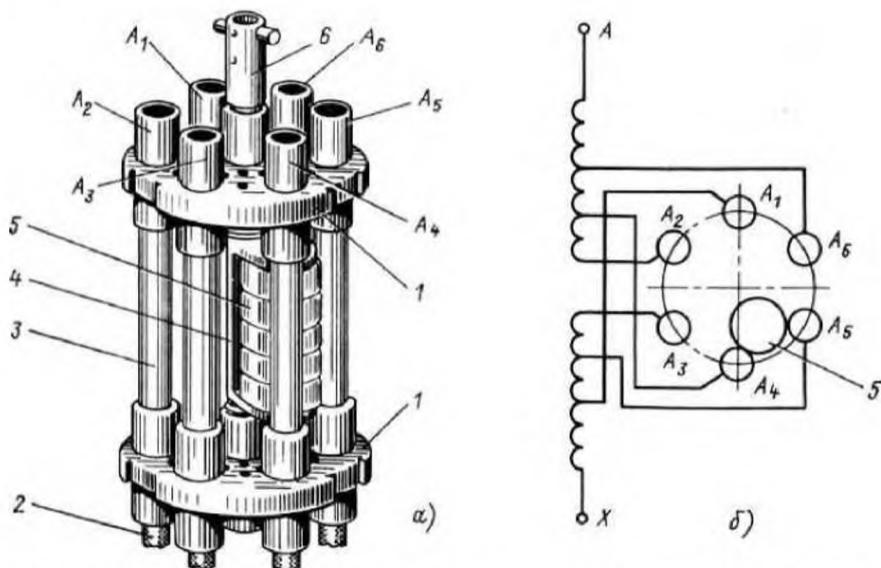


Рисунок 1.1 - Устройство (а) и принципиальная схема (б) переключателя ПБВ:

1 - изолирующие основания; 2 - ответвления от обмоток $A_1 - A_6$; 3 - полые токоведущие стержни; 4 - коленчатый вал; 5 - подвижные контактные кольца

Диаграмма переключений ПБВ дана в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Диаграмма переключений ПБВ

Пары выводов	Надбавка напряжения				
	-5%	-2,5%	0	+2,5%	+5%
A ₂ - A ₃	X	-	-	-	-
A ₃ - A ₄	-	X	-	-	-
A ₄ - A ₅	-	-	X	-	-
A ₅ - A ₆	-	-	-	X	-
A ₆ - A ₁	-	-	-	-	X

Заводы-изготовители выпускают трансформаторы различных типов, которые отличаются климатическим исполнением, способами охлаждения, и другими признаками.

В соответствии с ГОСТ Р 52719-2007 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия» предприятиями-изготовителями указываются следующие данные трансформаторов, по которым можно определить параметры схем их замещения.

- Номинальная мощность, номинальные высшее и низшее напряжения трансформатора.
- Ток $I^*_{0ном}$ (% от номинального) и потери $\Delta P_{0ном}$ холостого хода на основном ответвлении.
- Номинальные потери $\Delta P_{к ном}$ и напряжение короткого замыкания $u_{к.ном}$ на основном ответвлении.

Предельные отклонения этих параметров от нормированных значений не должны превышать:

- для коэффициента трансформации $\pm 0,5\%$;
- для напряжения короткого замыкания $\pm 10\%$;
- для потерь короткого замыкания $+ 10\%$;
- для потерь холостого хода $+15\%$;
- для суммарных потерь $+15\%$;
- для тока холостого хода $+ 30\%$.

Отсутствие нижнего предельного отклонения для тока холостого хода и потерь означает, что его значение не ограничено.

1.2. Определение параметров схемы замещения на основных отпайках при номинальном первичном напряжении

Для проведения различных расчетов по нормируемым параметрам определяют сопротивления, входящие в схему замещения трансформаторов (рис. 1.2.).

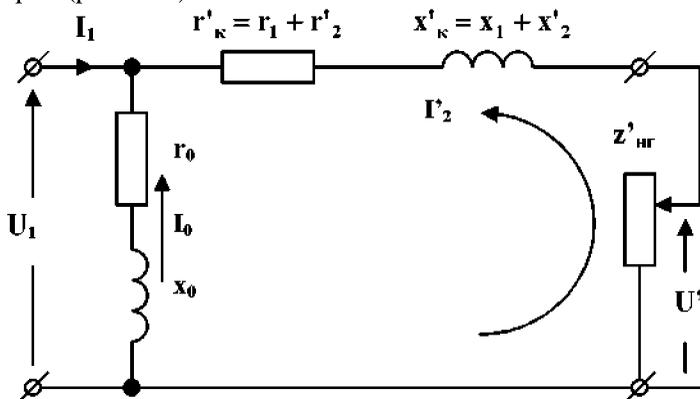


Рисунок 1.2 - Г-образная схема замещения трансформатора

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора на основном ответвлении определяется расчетным путем по формуле:

$$z_{\kappa} = \frac{u_{\kappa, \text{НОМ}} U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}, \quad (1.1)$$

где $u_{\kappa, \text{НОМ}}$ - номинальное напряжение короткого замыкания на основном ответвлении, %; $U_{\text{НОМ}}$ и $S_{\text{НОМ}}$ - номинальное напряжение и номинальная мощность трансформатора.

Активная и индуктивная составляющие полного сопротивления определяются по формулам:

$$r_{\kappa} = \frac{\Delta P_{\kappa, \text{НОМ}} U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}, \quad (1.2)$$

$$x_{\kappa} = \sqrt{z_{\kappa}^2 - r_{\kappa}^2} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \sqrt{\left(\frac{u_{\kappa, \text{НОМ}}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\kappa, \text{НОМ}}}{S_{\text{НОМ}}}\right)^2}. \quad (1.3)$$

Для расчета сопротивлений ветви намагничивания необходимо предварительно найти *номинальный ток трансформатора* и *ток холостого хода* в именованных единицах:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном.}}{\sqrt{3}U_{1ном}} ; \quad (1.4)$$

$$I_{0ном} = \frac{I_{0ном}^*}{100} I_{1ном} . \quad (1.5)$$

Полное, активное, и индуктивное сопротивления ветви намагничивания определяются по формулам:

$$z_0 = \frac{U_{1ном}}{I_{0.ном}} ; \quad r_0 = \frac{\Delta P_{0.ном}}{3I_{0.ном}^2} ; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} . \quad (1.6)$$

Помимо этого определяется установившийся ток симметричного трехфазного короткого замыкания:

$$I_{1к.ном} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3} * z_k} . \quad (1.7)$$

Согласно ГОСТ 11677-85 трехфазные двухобмоточные трансформаторы с выведенной нейтралью могут иметь схемы соединения обмоток Y/Y_0 (звезда - звезда с нулем), Δ/Y_0 (треугольник - звезда с нулем), и Y/Z_0 (звезда - зигзаг с нулем), и группы соединения обмоток 0 и 11. Выводы нейтрали должны выбираться на продолжительную нагрузку током, равным (в % от номинального тока):

- при схеме соединения обмоток Y/Y_0 - 25%;
- при схеме соединения обмоток Δ/Y_0 и Y/Z_0 - 75% .

Нормируемые параметры трансформаторов приводятся в каталогах и справочной литературе [19, 20, 28,32]. В стандартах или технических условиях на конкретные группы и типы трансформаторов допускается устанавливать дополнительные параметры.

Согласно ГОСТ 3 52119-2007 (Трансформаторы силовые. Общие технические условия) эти паспортные данные соответствуют «нулевому» ответвлению ПБВ и номинальному первичному напряжению.

Пример 1.1. Трансформатор ТМ-160 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Y₀ имеет следующие данные: S_{ном} = 160 кВА; U_{1ном} = 10 кВ; U_{2ном} = 0,4 кВ; I*_{0ном} = 2,4%; ΔP_{0.ном} = 0,51 кВт; ΔP_{к.ном} = 2,65 кВт; u_{к.ном} = 4,5%. Требуется определить параметры схемы замещения при «нулевом» положении отпаек ПБВ и номинальном первичном напряжении.

- Определяем номинальный коэффициент трансформации:

$$k_{\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{10}{0,4} = 25$$

- Полное сопротивление короткого замыкания, приведенное к высокому напряжению (формула 1.1):

$$z'_{\text{к}} = \frac{4,5 * 10^2 * 10^6}{100 * 160 * 10^3} = 28,125 \text{ Ом.}$$

- Активная и индуктивная составляющие полного сопротивления короткого замыкания (формулы 1.2, 1.3):

$$r'_{\text{к}} = \frac{2,65 * 10^3 * 10^2 * 10^6}{160^2 * 10^6} = 10,352 \text{ Ом.}$$

$$x'_{\text{к}} = \sqrt{28,125^2 - 10,352^2} = 26,125 \text{ Ом.}$$

- Номинальный ток трансформатора и ток холостого хода в именованных единицах на стороне первичного напряжения (формулы 1.4, 1.5):

$$I_{1\text{ном}} = \frac{160}{\sqrt{3} * 10} = 9,238 \text{ А; } I_{0\text{ном}} = \frac{2,4}{100} * 9,238 = 0,222 \text{ А.}$$

- Полное, активное, и индуктивное сопротивления ветви намагничивания на стороне первичного напряжения (формулы 1.6):

$$z_0 = \frac{10 * 10^3}{0,222} = 45045 \text{ Ом; } r_0 = \frac{0,51 * 10^3}{3 * 0,222^2} = 3449 \text{ Ом.}$$

$$x_0 = \sqrt{45045^2 - 3449^2} = 44913 \text{ Ом.}$$

- Установившийся ток короткого замыкания (формула 1.7):

$$I_{\text{к.ном}} = \frac{10000}{\sqrt{3} * 28,125} = 205,3 \text{ А.}$$

Глава 2. Расчет параметров трансформаторов на отпайках ПБВ

2.1. Параметры трансформаторов на отпайках ПБВ при номинальном первичном напряжении

При переключениях отпайки ПБВ изменяются количество витков в обмотках и коэффициент трансформации, в результате чего изменяются сопротивления обмоток, потери холостого хода, оптимальные коэффициенты загрузки и другие параметры, влияющие на величину выходного напряжения, потери и КПД. Уточнение их в расчетах является важным вопросом.

Фактический коэффициент трансформации с учетом переключений принимает значение:

$$k_{\phi} = \frac{W_1}{W_2} \pm \frac{\Delta W_1}{W_2} = k_{\text{ном}} (1 \pm \Delta k), \quad (2.1)$$

где $k_{\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}}$ - коэффициент трансформации при установке отпайки в нулевое положение; $\pm \Delta k$ - относительное изменение коэффициента трансформации на регулировочных отпайках.

Напряжение на выводах вторичных обмоток в режиме холостого хода изменяется прямо пропорционально U_1 , и с учетом возможного изменения изменяется обратно пропорционально коэффициенту трансформации и вычисляется по формуле:

$$U_{20\phi} = \frac{U_{1\text{ном}}}{k_{\phi}} = \frac{1}{(1 \pm \Delta k)} U_{20\text{ном}}, \quad (2.2)$$

Для анализа изменения других параметров трансформатора воспользуемся известным из теории электрических машин выражением:

$$U_1 = 4,44 W_1 f_1 B Q_c, \quad (2.3)$$

из которого видно, что при неизменных значениях частоты f_1 и сечения стержня Q_c при определенных значениях первичного напряжения U_1 тождественно соблюдается условие: $W_1 B = \text{const}$, поэтому увеличение количества витков W_1 приводит к уменьшению магнитной индукции B , а уменьшение W_1 - к ее увеличению.

Ток холостого хода изменяется пропорционально квадрату магнитного потока, поэтому изменения индукции при переключениях отпаек ПБВ приводят к изменению тока холостого хода в квадратичной зависимости. С учетом того, что:

$$W_{1\phi} = W_{1ном} \pm \Delta W_1 = \Delta W_1(1 \pm \Delta k)$$

фактический ток холостого хода $I_{0.\phi}$ изменяется по сравнению с $I_{0.ном}$ в соответствии с зависимостью:

$$I_{0.\phi} = \left(\frac{1}{1 \pm \Delta k} \right)^2 I_{0.ном} \quad (2.4)$$

Сопротивления ветви намагничивания, при которых выполняется (2.4) определяются по формулам:

$$r_{0.\phi} = (1 \pm \Delta k)^2 r_{0.ном}; \quad x_{0.\phi} = (1 \pm \Delta k)^2 x_{0.ном}; \quad z_{0.\phi} = (1 \pm \Delta k)^2 z_{0.ном} \quad (2.5)$$

Потери холостого хода с учетом (2.4) и 2.5) составляют:

$$\begin{aligned} \Delta P_{0.\phi} &= 3(I_{0.\phi})^2 r_{0.\phi} = 3 \left(\frac{1}{1 \pm \Delta k} \right)^4 I_{0.ном}^2 (1 \pm \Delta k)^2 r_{0.ном} = \\ &= \frac{1}{(1 \pm \Delta k)^2} \Delta P_{0.ном} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Изменение количества витков в первичных обмотках приводит к изменению их активных и индуктивных сопротивлений, а изменение коэффициента трансформации - к изменению приведенных значений сопротивлений вторичных обмоток.

Приведенные значения сопротивлений короткого замыкания рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} r'_{к.\phi} &= r'_{к.ном} \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2 \right); \quad x'_{к.\phi} = x'_{к.ном} \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2 \right); \\ z'_{к.\phi} &= z'_{к.ном} \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2 \right). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Выражение в скобках представляет собой коэффициент, характеризующий изменение приведенных сопротивлений короткого замыкания на регулировочных отпайках. При увеличении коэффициента трансформации $\mathbf{r}'_{к.ф}$ и $\mathbf{x}'_{к.ф}$ увеличиваются, при уменьшении - уменьшаются. При небольших изменениях коэффициента трансформации величина $\Delta \mathbf{k}^2$ мала по сравнению с другими составляющими.

Напряжение короткого замыкания ($\mathbf{u}_{к.ном}$) представляет собой относительное значение напряжения, которое необходимо приложить к первичной обмотке, чтобы получить номинальные токи в обмотках.

Поскольку параметры трансформатора приводятся к стороне первичного напряжения, неизменным остается номинальное значение приведенного тока: $\mathbf{I}_{1ном} = \mathbf{I}_{2ном} = \text{const}$, а фактическое напряжение короткого замыкания изменяется по сравнению с номинальным значением пропорционально сопротивлению короткого замыкания:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{к.ф} &= \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta \mathbf{k} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{k}^2 \right) \frac{\mathbf{I}_{1ном} \mathbf{z}'_{к.ном}}{\mathbf{U}_{1ном}} 100\% = \\ &= \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta \mathbf{k} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{k}^2 \right) \mathbf{u}_{к.ном} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Потери короткого замыкания определяются при номинальном первичном токе, и изменяются при изменении коэффициента трансформации пропорционально сопротивлению короткого замыкания:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P}_{к.ф} &= 3 \mathbf{I}_{1ном}^2 \mathbf{r}'_{к.ном} \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta \mathbf{k} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{k}^2 \right) = \\ &= \Delta \mathbf{P}_{к.ном} \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta \mathbf{k} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{k}^2 \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Увеличение коэффициента трансформации приводит к возрастанию напряжения и потерь короткого замыкания при тех же значениях приложенного напряжения \mathbf{U}_1 и тока в первичных обмотках. Его уменьшение приводит к обратному эффекту. Однако при $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_{1ном}$ фактическое значение вторичного тока вследствие изменения коэффициента трансформации отличается от номинального:

$$(1 \pm \Delta k) I'_{2\phi} = I_{1\text{НОМ}}, \quad (2.10)$$

т.е. при увеличении коэффициента трансформации номинальный ток в первичной обмотке устанавливается при меньшем вторичном токе, а при уменьшении - при большем..

Ток короткого замыкания на различных отпайках равен:

$$I_{1к.ф} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * \sqrt{r_{к.ф}^2 + x_{к.ф}^2}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2\right) z'_{к.НОМ}} = \frac{1}{\left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2\right)} I_{1к.НОМ} \quad (2.11)$$

Из этих уравнений видно, что увеличение коэффициента трансформации приводит к уменьшению тока короткого замыкания, а его уменьшение - к возрастанию.

Значения коэффициентов пропорциональности изменения параметров трансформаторов с ПБВ для крайних положений отпаяк при номинальном первичном напряжении приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Коэффициенты пропорциональности изменения номинальных параметров трансформаторов

Коэффициент пропорциональности	Δk		
	+5%	0	-5%
$1 \pm \Delta k$	1,05	1,0	0,95
$\frac{1}{1 \pm \Delta k}$	0,9524	1,0	1,0526
$(1 \pm \Delta k)^2$	1,1025	1,0	0,9025
$\frac{1}{(1 \pm \Delta k)^2}$	0,907	1,0	1,108
$1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2$	1,0763	1,0	0,9263
$\frac{1}{\left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2\right)}$	0,9292	1,0	1,0796

Пример 2.1. Определить параметры трансформатора, паспортные данные которого даны в примере 1.1, на отпайках ПБВ $\pm 5\%$ при номинальном первичном напряжении.

- Фактический коэффициент трансформации (формула 2.1):

$$k_{(+5\%)} = 25(1 + 0,05) = 26,25 ;$$

$$k_{(-5\%)} = 25(1 + 0,05) = 23,75 .$$

- Напряжение на выводах вторичных обмоток в режиме холостого хода (формула 2.2):

$$U_{20(+5\%)} = \frac{1}{(1 + 0,05)} 400 = 380,95 \text{ В};$$

$$U_{20(-5\%)} = \frac{1}{(1 - 0,05)} 400 = 421,05 \text{ В};$$

- Ток холостого хода на отпайках (формула 2.4):

$$I_{0(+5\%)} = \left(\frac{1}{1 + 0,05} \right)^2 \frac{2,4}{100} * \frac{160}{\sqrt{3} * 10} = 0,201 \text{ А};$$

$$I_{0(-5\%)} = \left(\frac{1}{1 - 0,05} \right)^2 \frac{2,4}{100} * \frac{160}{\sqrt{3} * 10} = 0,246 \text{ А}.$$

- Сопротивления ветви намагничивания (формулы 2.5):

$$r_{0(+5\%)} = (1 + 0,05)^2 * 3449 = 3802,5 \text{ Ом};$$

$$x_{0(+5\%)} = (1 + 0,05)^2 * 44913 = 49516,6 \text{ Ом};$$

$$z_{0(+5\%)} = (1 + 0,05)^2 * 45045 = 49662,1 \text{ Ом};$$

$$r_{0(-5\%)} = (1 - 0,05)^2 * 3449 = 3112,7 \text{ Ом};$$

$$x_{0(-5\%)} = (1 - 0,05)^2 * 44913 = 40534,0 \text{ Ом};$$

$$z_{0(-5\%)} = (1 - 0,05)^2 * 45045 = 40653,1 \text{ Ом};$$

- Потери холостого хода (формула 2.6):

$$\Delta P_{0(+5\%)} = \frac{0,51}{(1 + 0,05)^2} = 0,463 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{0(-5\%)} = \frac{0,51}{(1 - 0,05)^2} = 0,565 \text{ кВт}.$$

- Приведенные к первичному напряжению значения сопротивлений короткого замыкания (формулы 2.7):

$$r'_{к(+5\%)} = 10,352 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 11,154 \text{ Ом};$$

$$x'_{к(+5\%)} = 26,125 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 28,15 \text{ Ом};$$

$$z'_{к(+5\%)} = 28,125 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 30,3 \text{ Ом};$$

$$r'_{к(-5\%)} = 10,352 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 9,601 \text{ Ом};$$

$$x'_{к(-5\%)} = 26,125 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 24,231 \text{ Ом};$$

$$z'_{к(-5\%)} = 28,125 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 26,09 \text{ Ом};$$

- Напряжение короткого замыкания (формула 2.8):

$$u_{к(+5\%)} = 4,5 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 4,85\%;$$

$$u_{к(-5\%)} = 4,5 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 4,17\%.$$

- Потери короткого замыкания (формула 2.9):

$$\Delta P_{к(+5\%)} = 2,65 * 10^3 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 2,86 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{к(-5\%)} = 2,65 * 10^3 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right) = 2,46 \text{ кВт};$$

- Установившийся ток короткого замыкания (формула 2.11):

$$I_{1к(+5\%)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right)} 205,3 = 190,5 \text{ А};$$

$$I_{1к(-5\%)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right)} 205,3 = 221,3 \text{ А};$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 - Параметры трансформатора при номинальном первичном напряжении на отпайках ПБВ

Наименование параметра	Δk		
	+5%	0	-5%
Напряжение холостого хода U_{20} , В	380,95	400	421,05
Ток холостого хода, I_{10} , А	0,201	0,222	0,246
Активная составляющая сопротивления ветви намагничивания r_0 , Ом	3802,5	3449	3112,7
Реактивная составляющая сопротивления ветви намагничивания x_0 , Ом	49516,6	44913	40534,0
Полное сопротивление ветви намагничивания z_0 , Ом	49662,1	45045	40653,1
Потери холостого хода ΔP_0 , кВт	0,463	0,51	0,565
Активная составляющая сопротивления короткого замыкания $r'_{кз}$, Ом	11,154	10,352	9,601
Реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания $x'_{кз}$, Ом	28,15	26,125	24,231
Полное сопротивление короткого замыкания $z'_{кз}$, Ом	30,3	28,125	26,09
Напряжение короткого замыкания $u_{кз}$, %	4,85	4,5	4,17
Потери короткого замыкания $\Delta P_{кз}$, кВт	2,86	2,65	2,46
Установившийся ток короткого замыкания $I_{кз}$, А	190,5	205,3	221,3

2.2. Параметры трансформаторов на отпайках ПБВ при неизменном магнитном потоке

Из выражения (2.3) следует, что при неизменных значениях частоты f_1 и сечения стержня Q_c индукция и магнитный поток при изменениях первичного напряжения остаются неизменными, если пропорционально напряжению изменяется количество витков в первичной обмотке, т.е. выполняется условие:

$$\frac{U_1}{W_1} = \frac{U_1}{W_{1ном} (1 \pm \Delta k)} = \frac{U_{1ном}}{W_{1ном}} * \frac{U^*_{1}}{(1 \pm \Delta k)} = const ,$$

где $U^*_{1} = U_1 / U_{1ном}$ - относительное значение первичного напряжения.

Поскольку $\frac{U_{1\text{ном}}}{W_{1\text{ном}}} = \text{const}$, коэффициент трансформации необходимо изменять в соответствии с зависимостью:

$$\frac{U^*_1}{(1 \pm \Delta k)} = 1; \quad 1 \pm \Delta k = U^*_1, \quad (2.12)$$

учитывая которую получаем следующие значения параметров трансформатора с ПБВ при неизменном магнитном потоке.

Напряжение на выводах вторичных обмоток в режиме холостого хода остается неизменным:

$$U_{20\phi} = \frac{U_1}{k_\phi} = \frac{U_{1\text{ном}}}{k_{\text{ном}}} * \frac{U^*_1}{1 \pm \Delta k} = \frac{1 \pm \Delta k}{1 \pm \Delta k} = U_{20\text{ном}} = U_{20\text{ном}}. \quad (2.13)$$

Потери холостого хода (потери в стали) при неизменном магнитном потоке также остаются неизменными: $\Delta P_{0,\phi} = \Delta P_{0,\text{ном}}$.

Сопротивления ветви намагничивания, как и в предыдущем случае, зависят от количества витков в первичных обмотках и определяются по формулам (2.5).

Ток холостого хода при неизменном магнитном потоке зависит от первичного напряжения, определяемого выражением 2.12, и полного сопротивления ветви намагничивания (2.5). В соответствии с этим:

$$I_{0\phi} = \frac{U_{1\phi}}{z_{0\phi}} = \frac{(1 \pm \Delta k)}{(1 \pm \Delta k)^2} * \frac{U_{1\text{ном}}}{z_{0\text{ном}}} = \frac{1}{(1 \pm \Delta k)} I_{0\text{ном}}. \quad (2.14)$$

Изменение количества витков в первичных обмотках приводит к изменению их активных и индуктивных сопротивлений, а изменение коэффициента трансформации - к изменению приведенных значений сопротивлений вторичных обмоток.

Приведенные сопротивления короткого замыкания не зависят от первичного напряжения и рассчитываются по формулам 2.7.

Напряжение короткого замыкания не зависит от U_1 , изменяется по сравнению с номинальным значением пропорционально сопротивлению короткого замыкания, и определяется по формуле 2.8.

Потери короткого замыкания определяются при номинальном первичном токе, не зависят от напряжения U_1 , изменяются при изменении коэффициента трансформации пропорционально сопротивлению короткого замыкания, и рассчитываются по формуле 2.9.

Ток короткого замыкания на различных отпайках зависит от первичного напряжения (2.12) и сопротивления короткого замыкания (2.7). В соответствии с этим:

$$I_{1к.ф} = \frac{1 \pm \Delta k}{\left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2\right)} I_{1к.ном} \quad (2.15)$$

Пример 2.2. Определить параметры трансформатора, паспортные данные которого даны в примере 1.1, на отпайках ПБВ $\pm 5\%$ при условии неизменности магнитного потока.

- Фактический коэффициент трансформации (формула 2.1):

$$k_{(+5\%)} = 25(1 + 0,05) = 26,25 ;$$

$$k_{(-5\%)} = 25(1 + 0,05) = 23,75 .$$

- Напряжение на выводах вторичных обмоток в режиме холостого хода в соответствии с 2.13 остается неизменным:

$$U_{20(+5\%)} = U_{20ном} = U_{20(-5\%)} = 400 \text{ В}.$$

- Потери холостого хода остаются неизменными:

$$\Delta P_{0(+5\%)} = \Delta P_{0ном} = \Delta P_{0(-5\%)} = 0,51 \text{ кВт}$$

- Сопротивления ветви намагничивания (формулы 2.5) определены в предыдущем примере 2.1:

$$r_{0(+5\%)} = 3802,5 \text{ Ом}; \quad x_{0(+5\%)} = 49516,6 \text{ Ом}; \quad z_{0(+5\%)} = 49662,1 \text{ Ом};$$

$$r_{0(-5\%)} = 3112,7 \text{ Ом}; \quad x_{0(-5\%)} = 40534,0 \text{ Ом}; \quad z_{0(-5\%)} = 40653,1 \text{ Ом};$$

- Ток холостого хода на отпайках (формула 2.14):

$$I_{0(+5\%)} = \left(\frac{1}{1 + 0,05}\right) 0,222 = 0,211 \text{ А}; \quad I_{0(-5\%)} = \left(\frac{1}{1 - 0,05}\right) 0,222 = 0,234 \text{ А}$$

- Приведенные к первичному напряжению сопротивления короткого замыкания (формулы 2.7): определены в предыдущем примере 2.1:

$$r'_{к(+5\%)} = 11,154 \text{ Ом}; \quad x'_{к(+5\%)} = 28,15 \text{ Ом}; \quad z'_{к(+5\%)} = 30,3 \text{ Ом};$$

$$r'_{к(-5\%)} = 9,601 \text{ Ом}; \quad x'_{к(-5\%)} = 24,231 \text{ Ом}; \quad z'_{к(-5\%)} = 26,09 \text{ Ом}.$$

- Напряжения короткого замыкания (формула 2.8) определены в предыдущем примере 2.1:

$$u_{к(+5\%)} = 4,85 \%; \quad u_{к(-5\%)} = 4,17 \%.$$

- Потери короткого замыкания (формула 2.9) определены в предыдущем примере 2.1:

$$\Delta P_{к(+5\%)} = 2,86 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{к(-5\%)} = 2,46 \text{ кВт}.$$

- Установившийся ток короткого замыкания (формула 2.15):

$$I_{1к(+5\%)} = \frac{1 + 0,05}{\left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2\right)} 205,3 = 200,1 \text{ А};$$

$$I_{1к(-5\%)} = \frac{1 - 0,05}{\left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} \Delta 0,05^2\right)} 205,3 = 210,3 \text{ А}.$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Параметры трансформатора при неизменном магнитном потоке на отпайках ПБВ

Наименование параметра	Δk		
	+5%	0	-5%
Напряжение холостого хода U_{20} , В	400	400	400
Ток холостого хода, I_{10} , А	0,211	0,222	0,234
Активная составляющая сопротивления ветви намагничивания γ_0 , Ом	3802,5	3449	3112,7
Реактивная составляющая сопротивления ветви намагничивания χ_0 , Ом	49516,6	44913	40534,0
Полное сопротивление ветви намагничивания z_0 , Ом	49662,1	45045	40653,1
Потери холостого хода ΔP_0 , кВт	0,51	0,51	0,51
Активная составляющая сопротивления короткого замыкания $\gamma'_{к}$, Ом	11,154	10,352	9,601
Реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания $\chi'_{к}$, Ом	28,15	26,125	24,231
Полное сопротивление короткого замыкания $z'_{к}$, Ом	30,3	28,125	26,09
Напряжение короткого замыкания $u_{к}$, %	4,85	4,5	4,17
Потери короткого замыкания $\Delta P_{к}$, кВт	2,86	2,65	2,46
Установившийся ток короткого замыкания $I_{1к}$, А	200,1	205,3	210,3

2.3. Параметры трансформаторов на отпайках ПБВ при изменениях первичного напряжения и магнитного потока

В условиях реальной эксплуатации первичное напряжение не остается постоянным, а регулирование, строго обеспечивающее неизменность магнитного потока, как правило, невозможно. Это связано с тем, что отклонения напряжения не всегда соответствуют шагу изменения коэффициента трансформации даже при отклонениях в пределах $\pm 5\%$, которые были установлены как нормально допустимые ранее действовавшим ГОСТ 13109-97. Согласно же действующему в настоящее время ГОСТ 32144-2013 допустимые пределы изменения отклонений напряжения составляют $\pm 10\%$, что не согласуется с максимальными пределами изменения уставок ПБВ ($\pm 5\%$). Поэтому выдерживать точно рассмотренные закономерности на практике невозможно.

Наиболее характерными являются следующие случаи.

1. Первичное напряжение повышено, отпайки ПБВ установлены в «нулевое» положение.
2. Первичное напряжение понижено, отпайки ПБВ установлены в «нулевое» положение.
3. Первичное напряжение повышено, отпайки установлены в положение -5% .
4. Первичное напряжение понижено, отпайки установлены в положение $\pm 5\%$.

Напряжение на выводах вторичных обмоток в режиме холостого хода зависит как от первичного напряжения, так и от коэффициента трансформации и вычисляется по формуле:

$$U_{20\Phi} = \frac{U_1^*}{(1 \pm \Delta k)} U_{20\text{ном}} \quad (2.16)$$

Сопротивления ветви намагничивания, не зависят от первичного напряжения и определяются по формулам 2.5.

Ток холостого хода зависит от первичного напряжения и полного сопротивления ветви намагничивания. В соответствии с этим:

$$I_{0\Phi} = \frac{U_1}{z_{0\Phi}} = \frac{U_1^*}{(1 \pm \Delta k)^2} * \frac{U_{1\text{ном}}}{z_{0\text{ном}}} = \frac{U_1^*}{(1 \pm \Delta k)^2} I_{0\text{ном}} \quad (2.17)$$

Потери холостого хода зависят от тока $I_{0,\phi}$ (формула 2.17) и активного сопротивления ветви намагничивания (формула 2.5):

$$\Delta P_{0,\phi} = 3 \left(\frac{U_{*1}}{(1 \pm \Delta k)^2} \right)^2 I_{0,\text{ном}}^2 (1 \pm \Delta k)^2 r_{0,\text{ном}} = \left(\frac{U_{*1}}{1 \pm \Delta k} \right)^2 \Delta P_{0,\text{ном}} \quad (2.18)$$

Приведенные сопротивления короткого замыкания не зависят от первичного напряжения и рассчитываются по формулам 2.7.

Напряжение короткого замыкания не зависит от U_1 , изменяется по сравнению с номинальным значением пропорционально сопротивлению короткого замыкания, и определяется по формуле 2.8.

Потери короткого замыкания определяются при номинальном первичном токе, не зависят от напряжения U_1 , изменяются при изменении коэффициента трансформации пропорционально сопротивлению короткого замыкания, и рассчитываются по формуле 2.9.

Ток короткого замыкания на различных отпайках зависит от первичного напряжения и сопротивления короткого замыкания (2.7). В соответствии с этим:

$$I_{1к,\phi} = \frac{U_{*1}}{\left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2 \right)} I_{1к,\text{ном}} \quad (2.19)$$

Пример 2.3. Определить параметры трансформатора, паспортные данные которого даны в примере 1.1, на отпайках ПБВ 0 и $\pm 5\%$ при отклонениях напряжения от номинального значения на $\pm 10\%$.

Расчет при $U_{*1} = 1.1$

Значения параметров, зависящих только от положения отпайки, и не зависящих от первичного напряжения, принимаем из предыдущих примеров.

- Коэффициенты трансформации на отпайках ПБВ:
 $k_{(+5\%)} = 25(1 + 0,05) = 26,25$; $k_{(0\%)} = 25$; $k_{(-5\%)} = 25(1 - 0,05) = 23,75$.
- Сопротивления ветви намагничивания:
 $r_{0(+5\%)} = 3802,5 \text{ Ом}$; $x_{0(+5\%)} = 49516,6 \text{ Ом}$; $z_{0(+5\%)} = 49662,1 \text{ Ом}$;
 $r_{0(0\%)} = 3449 \text{ Ом}$; $x_{0(0\%)} = 44913 \text{ Ом}$; $z_{0(0\%)} = 45045 \text{ Ом}$;
 $r_{0(-5\%)} = 3112,7 \text{ Ом}$; $x_{0(-5\%)} = 40534,0 \text{ Ом}$; $z_{0(-5\%)} = 40653,1 \text{ Ом}$.

- Приведенные к первичному напряжению сопротивления короткого замыкания:

$$r'_{\kappa(+5\%)} = 11,154 \text{ Ом}; \quad x'_{\kappa(+5\%)} = 28,15 \text{ Ом}; \quad z'_{\kappa(+5\%)} = 30,3 \text{ Ом};$$

$$r'_{\kappa(0\%)} = 10,352 \text{ Ом}; \quad x'_{\kappa(0\%)} = 26,125 \text{ Ом}; \quad z'_{\kappa(0\%)} = 28,125 \text{ Ом};$$

$$r'_{\kappa(-5\%)} = 9,601 \text{ Ом}; \quad x'_{\kappa(-5\%)} = 24,231 \text{ Ом}; \quad z'_{\kappa(-5\%)} = 26,09 \text{ Ом}.$$

- Напряжения короткого замыкания:

$$u_{\kappa(+5\%)} = 4,85 \%; \quad u_{\kappa(+5\%)} = 4,5 \%; \quad u_{\kappa(-5\%)} = 4,17 \%.$$

- Потери короткого замыкания:

$$\Delta P_{\kappa(+5\%)} = 2,86 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{\kappa(+5\%)} = 2,65 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{\kappa(-5\%)} = 2,46 \text{ кВт}.$$

Параметры, зависящие от первичного напряжения.

- Напряжения на выводах вторичных обмоток в режиме холостого хода (формула 2.16):

$$U_{20(+5\%)} = \frac{1,1}{1+0,05} 400 = 419,0 \text{ В}; \quad U_{20(0\%)} = \frac{1,1}{1,0} 400 = 440 \text{ В};$$

$$U_{20(-5\%)} = \frac{1,1}{1-0,05} 400 = 463,2 \text{ В}$$

- Ток холостого хода на отпайках (формула 2.17):

$$I_{0(+5\%)} = \frac{1,1}{(1+0,05)^2} 0,222 = 0,221 \text{ А}; \quad I_{0(+5\%)} = \frac{1,1}{1,0^2} 0,222 = 0,269 \text{ А};$$

$$I_{0(-5\%)} = \frac{1,1}{(1-0,05)^2} 0,222 = 0,271 \text{ А}$$

- Потери холостого хода (формула 2.18):

$$\Delta P_{0(+5\%)} = \left(\frac{1,1}{1+0,05} \right)^2 * 0,51 = 0,56 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{0(0\%)} = \left(\frac{1,1}{1,0} \right)^2 * 0,51 = 0,617 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{0(-5\%)} = \left(\frac{1,1}{1-0,05} \right)^2 * 0,51 = 0,684 \text{ кВт}$$

- Установившийся ток короткого замыкания (формула 2.19):

$$I_{1к(+5\%)} = \frac{1,1}{\left(1 + \frac{3}{2} \cdot 0,05 + \frac{1}{2} \cdot 0,05^2\right)} 205,3 = 209,8 \text{ А}; \quad I_{1к(0\%)} = \frac{1,1}{2} 205,3 = 225,8 \text{ А};$$

$$I_{1к(-5\%)} = \frac{1,1}{\left(1 - \frac{3}{2} \cdot 0,05 + \frac{1}{2} \cdot 0,05^2\right)} 205,3 = 243,8 \text{ А}.$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - Параметры трансформатора на отпайках ПБВ при повышенном на 10% напряжении

Наименование параметра	Δk		
	+5%	0	-5%
Напряжение холостого хода U_{20} , В	419,0	440	463,2
Ток холостого хода, I_{10} , А	0,221	0,269	0,271
Активная составляющая сопротивления ветви намагничивания γ_0 , Ом	3802,5	3449	3112,7
Реактивная составляющая сопротивления ветви намагничивания χ_0 , Ом	49516,6	44913	40534,0
Полное сопротивление ветви намагничивания z_0 , Ом	49662,1	45045	40653,1
Потери холостого хода ΔP_0 , кВт	0,56	0,617	0,684
Активная составляющая сопротивления короткого замыкания $\gamma'_{к}$, Ом	11,154	10,352	9,601
Реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания $\chi'_{к}$, Ом	28,15	26,125	24,231
Полное сопротивление короткого замыкания $z'_{к}$, Ом	30,3	28,125	26,09
Напряжение короткого замыкания $u_{к}$, %	4,85	4,5	4,17
Потери короткого замыкания $\Delta P_{к}$, кВт	2,86	2,65	2,46
Установившийся ток короткого замыкания $I_{1к}$, А	209,8	225,8	243,8

Расчет при $U^*_1 = 0,9$

Значения параметров, зависящих только от положения отпайек, и не зависящих от первичного напряжения, принимаем из предыдущих примеров.

- Коэффициенты трансформации на отпайках ПБВ:

$$k_{(+5\%)} = 25(1 + 0,05) = 26,25; \quad k_{(0\%)} = 25; \quad k_{(-5\%)} = 25(1 - 0,05) = 23,75$$

- Сопротивления ветви намагничивания:
 $r_{0(+5\%)} = 3802,5 \text{ Ом}; x_{0(+5\%)} = 49516,6 \text{ Ом}; z_{0(+5\%)} = 49662,1 \text{ Ом};$
 $r_{0(0\%)} = 3449 \text{ Ом}; x_{0(0\%)} = 44913 \text{ Ом}; z_{0(0\%)} = 45045 \text{ Ом};$
 $r_{0(-5\%)} = 3112,7 \text{ Ом}; x_{0(-5\%)} = 40534,0 \text{ Ом}; z_{0(-5\%)} = 40653,1 \text{ Ом};$
- Приведенные к первичному напряжению сопротивления короткого замыкания:
 $r'_{к(+5\%)} = 11,154 \text{ Ом}; x'_{к(+5\%)} = 28,15 \text{ Ом}; z'_{к(+5\%)} = 30,3 \text{ Ом};$
 $r'_{к(0\%)} = 10,352 \text{ Ом}; x'_{к(0\%)} = 26,125 \text{ Ом}; z'_{к(0\%)} = 28,125 \text{ Ом};$
 $r'_{к(-5\%)} = 9,601 \text{ Ом}; x'_{к(-5\%)} = 24,231 \text{ Ом}; z'_{к(-5\%)} = 26,09 \text{ Ом}.$
- Напряжения короткого замыкания:
 $u_{к(+5\%)} = 4,85 \%; u_{к(0\%)} = 4,5 \%; u_{к(-5\%)} = 4,17 \%.$
- Потери короткого замыкания:
 $\Delta P_{к(+5\%)} = 2,86 \text{ кВт}; \Delta P_{к(0\%)} = 2,65 \text{ кВт}; \Delta P_{к(-5\%)} = 2,46 \text{ кВт}$

Параметры, зависящие от первичного напряжения.

- Напряжения на выводах вторичных обмоток в режиме холостого хода (формула 2.16):

$$U_{20(+5\%)} = \frac{0,9}{1+0,05} 400 = 342,8 \text{ В}; U_{20(0\%)} = \frac{0,9}{1,0} 400 = 360 \text{ В};$$

$$U_{20(-5\%)} = \frac{0,9}{1-0,05} 400 = 378,9 \text{ В}$$

- Ток холостого хода на отпайках (формула 2.17):

$$I_{0(+5\%)} = \frac{0,9}{(1+0,05)^2} 0,222 = 0,181 \text{ А}; I_{0(0\%)} = \frac{0,9}{1,0^2} 0,222 = 0,2 \text{ А};$$

$$I_{0(-5\%)} = \frac{0,9}{(1-0,05)^2} 0,222 = 0,221 \text{ А}$$

- Потери холостого хода (формула 2.18):

$$\Delta P_{0(+5\%)} = \left(\frac{0,9}{1+0,05} \right)^2 * 0,51 = 0,375 \text{ кВт}; \Delta P_{0(0\%)} = \left(\frac{0,9}{1,0} \right)^2 * 0,51 = 0,413 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{0(-5\%)} = \left(\frac{0,9}{1 - 0,05} \right)^2 * 0,51 = 0,458 \text{ кВт}$$

- Установившийся ток короткого замыкания (формула 2.19):

$$I_{1к(+5\%)} = \frac{0,9}{\left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right)} 205,3 = 171,7 \text{ А}; \quad I_{1к(0\%)} = \frac{0,9}{2} 205,3 = 184,7 \text{ А};$$

$$I_{1к(-5\%)} = \frac{0,9}{\left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2 \right)} 205,3 = 199,5 \text{ А.}$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 - Параметры трансформатора на отпайках ПБВ при пониженном на 10% напряжении

Наименование параметра	Δk		
	+5%	0	-5%
Напряжение холостого хода U_{20} , В	342,8	360	378,9
Ток холостого хода, I_{10} , А	0,181	0,2	0,221
Активная составляющая сопротивления ветви намагничивания r_0 , Ом	3802,5	3449	3112,7
Реактивная составляющая сопротивления ветви намагничивания x_0 , Ом	49516,6	44913	40534,0
Полное сопротивление ветви намагничивания z_0 , Ом	49662,1	45045	40653,1
Потери холостого хода ΔP_0 , кВт	0,375	0,413	0,458
Активная составляющая сопротивления короткого замыкания $r'_{к}$, Ом	11,154	10,352	9,601
Реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания $x'_{к}$, Ом	28,15	26,125	24,231
Полное сопротивление короткого замыкания $z'_{к}$, Ом	30,3	28,125	26,09
Напряжение короткого замыкания $u_{к}$, %	4,85	4,5	4,17
Потери короткого замыкания $\Delta P_{к}$, кВт	2,86	2,65	2,46
Установившийся ток короткого замыкания $I_{1к}$, А	171,7	184,7	199,5

2.4. Преобразованная схема замещения трансформатора с ПБВ

Изменения параметров трансформатора на отпайках ПБВ можно отобразить на его преобразованной схеме замещения (рис. 2.1), которая отличается от традиционной (рис. 1.2) коэффициентами пропорциональности изменения номинальных значений сопротивлений ветви намагничивания и сопротивлений короткого замыкания. Множитель

$$\frac{\beta}{1 \pm \frac{3}{2}k + \Delta k^2}$$

представляет собой относительное значение фактического коэффициента загрузки трансформатора.

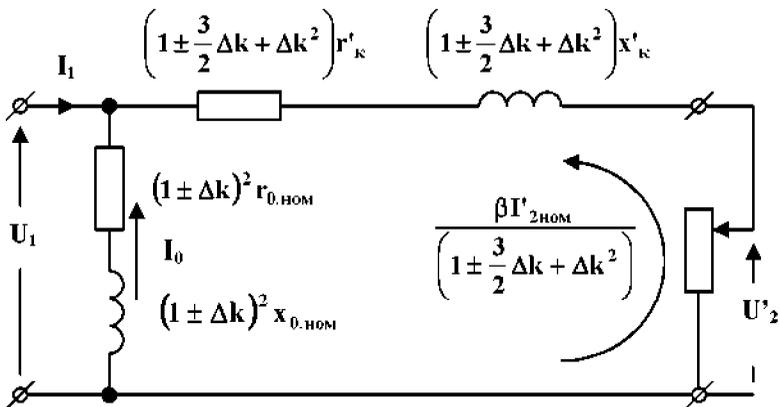


Рисунок 2.1 - Преобразованная Г-образная схема замещения трансформатора с ПБВ

Преобразованная таким образом схема замещения удобна для расчета различных характеристик трансформаторов с ПБВ, поскольку в ней учитываются как возможные изменения первичного напряжения, так и положение отпаяк (коэффициента трансформации).

Глава 3. Расчет внешних и энергетических характеристик трансформаторов на отпайках ПБВ

3.1. Расчет внешних характеристик

Внешние характеристики трансформаторов представляют собой зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки от коэффициента загрузки по току $U_2 = f(\beta)$. При характерных для двухобмоточных силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ значениях напряжения короткого замыкания ($u_{кз} = 0,05 - 0,07$) в пределах рабочих нагрузок ($\beta \leq 2,0$) они с высокой точностью описываются уравнением:

$$U_2 = U_{20} (1 - \beta (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2)), \quad (3.1)$$

где U_{20} - напряжение на выводах вторичной обмотки в режиме холостого хода; $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$ - коэффициент загрузки трансформатора по току; $u_{ка}$ и $u_{кр}$ - активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания (в относительных единицах); φ_2 - фазовый угол нагрузки.

Фазовый угол φ_2 при различном характере нагрузки может изменяться в пределах: $90^\circ \geq \varphi_2 \geq -90^\circ$. При этом $\cos \varphi_2$ всегда имеет положительное значение, а $\sin \varphi_2$ при активно-индуктивной нагрузке имеет положительное значение, а при емкостной - отрицательное, поэтому при активном и индуктивном характере нагрузки напряжение U_2 всегда падает, а при емкостном может не только уменьшаться, но и возрастать, если: $|u_{кр} \sin \varphi_2| \geq |u_{ка} \cos \varphi_2|$

На практике часто используется иная форма записи уравнения (3.1), полученная путем тригонометрических преобразований с учетом того, что $u_{ка} = u_{к} \cos \varphi_{к}$; $u_{кр} = u_{к} \sin \varphi_{к}$:

$$\begin{aligned} U_2 &= U_{20} (1 - \beta u_{к} (\cos \varphi_{к} \cos \varphi_2 + \sin \varphi_{к} \sin \varphi_2)) = \\ &= U_{20} (1 - \beta u_{к} \cos(\varphi_{к} - \varphi_2)) \end{aligned}, \quad (3.2)$$

где $\varphi_{к} = \arctg \frac{x_{к}}{r_{к}}$
 $r_{к}$ - угол короткого замыкания трансформатора.

Типичный вид внешних характеристик при индуктивном, активном и емкостном характере нагрузки показан на рис. 3.1 (рабочая область выделена жирными линиями). При коротком замыкании характеристики сходятся в одной точке, соответствующей току установившегося короткого замыкания.

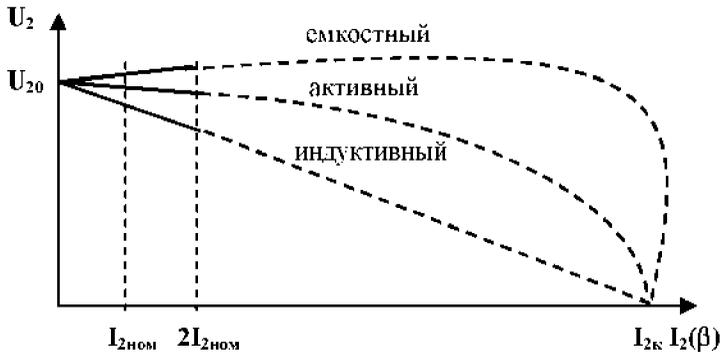


Рисунок 3.1 - Общий вид внешних характеристик трансформатора при различном характере нагрузки

При переключении отпаяк и изменениях первичного напряжения остаются неизменными значения углов φ_k и φ_2 , а фактические значения вторичного напряжения в режиме холостого хода $U_{20,\varphi}$ и напряжения короткого замыкания $u_{к,\varphi}$ изменяются в соответствии с зависимостями (2.16) и (2.8). С учетом этого уравнение (3.2) преобразуется к виду:

$$U_2 = U_{20ном} \frac{U^*_1}{(1 \pm \Delta k)} \left(1 - \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \Delta k^2 \right) \beta u_{к,ном} \cos(\varphi_k - \varphi_2) \right). \quad (3.3)$$

При номинальном первичном напряжении:

$$U_2 = U_{20ном} \frac{1}{(1 \pm \Delta k)} \left(1 - \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \Delta k^2 \right) \beta u_{к,ном} \cos(\varphi_k - \varphi_2) \right). \quad (3.4)$$

На величину напряжения U_2 основное влияние оказывает изменение напряжения U_{20} в режиме холостого хода, наклон характеристик в рабочей области изменяется незначительно. Типичный вид внешних характеристик для этого случая дан на рис. 3.2.

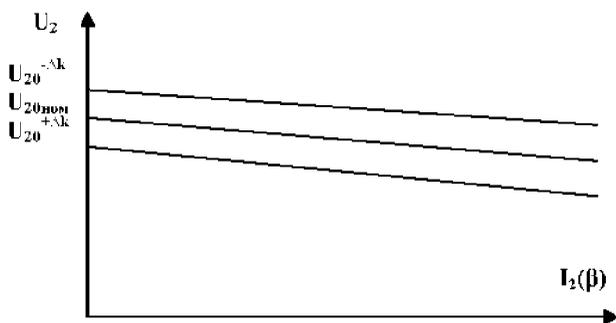


Рисунок 3.2 - Типичный вид внешних характеристик трансформатора при различном положении отпаяк ПБВ и номинальном первичном напряжении

При неизменном магнитном потоке, что достигается соблюдением при переключениях отпаяк условия: $\frac{U_1^*}{(1 \pm \Delta k)} = 1$, вторичное напряжение в режиме холостого хода остается неизменным: $U_{20} = U_{20ном}$, и уравнение 3.2 принимает вид:

$$U_2 = U_{20ном} \left(1 - \left(1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \Delta k^2 \right) \beta u_{к.ном} \cos(\varphi_k - \varphi_2) \right). \quad (3.5)$$

Характеристики, типичный вид которых дан на рис. 3.3, имеют общую точку $U_{20ном}$, и различаются наклоном.

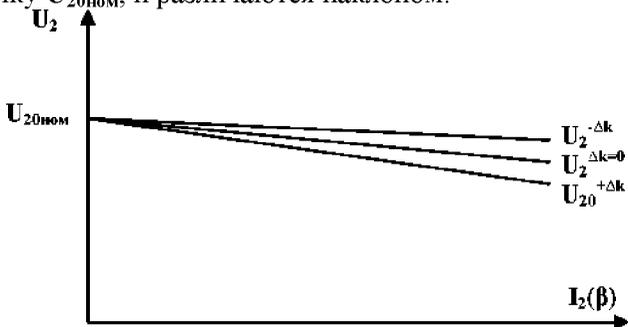


Рисунок 3.3 - Типичный вид внешних характеристик трансформатора при различном положении отпаяк ПБВ при неизменном магнитном потоке

Пример 3.1. Коэффициент мощности нагрузки равен: $\cos \varphi_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}$ ($\varphi_2 = 30^\circ$). Рассчитать внешние характеристики трансформатора на отпайках ПБВ +5%, 0, и -5%: а - при номинальном первичном напряжении; б - при неизменном магнитном потоке; в - при повышенном на 10% первичном напряжении, г - при пониженном на 10% первичном напряжении.

- Вычисляем фазовый угол короткого замыкания трансформатора. При изменениях коэффициента трансформации активная и реактивная составляющие сопротивления короткого замыкания изменяются пропорционально, поэтому угол φ_k останется неизменным на всех отпайках.

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{r_k} = \arctg \frac{26,125}{10,352} = 68,4^\circ$$

При этом: $\cos(\varphi_k - \varphi_2) = 0,784$. Для расчетов пользуемся формулой (3.5), которую преобразуем в зависимости от первичного напряжения и положения отпая.

- *Характеристики при номинальном первичном напряжении* (рис. 3.4-а) рассчитываются по уравнению (3.4), которое с учетом числовых значений соответствующих параметров принимает вид:

$$U_{2(+5\%)} = U_{20ном} \frac{1}{(1 + 0,05)} \left(1 - 0,045 * 0,784 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + 0,05^2 \right) \beta \right);$$

$$U_{2(0\%)} = U_{20ном} (1 - 0,045 * 0,784 \beta).$$

$$U_{2(-5\%)} = U_{20ном} \frac{1}{(1 - 0,05)} \left(1 - 0,045 * 0,784 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + 0,05^2 \right) \beta \right),$$

где β , о.е. - коэффициент загрузки (переменная).

- *Характеристики при неизменном магнитном потоке* (рис. 3.4-б) рассчитываются по уравнению (3.5), которое с учетом числовых значений соответствующих параметров принимает вид:

$$U_{2(+5\%)} = 400 \left(1 - 0,045 * 0,784 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + 0,05^2 \right) \beta \right);$$

$$U_{2(0\%)} = 400 (1 - 0,045 * 0,784 \beta);$$

$$U_{2(-5\%)} = 400 \left(1 - 0,045 * 0,784 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + 0,05^2 \right) \beta \right).$$

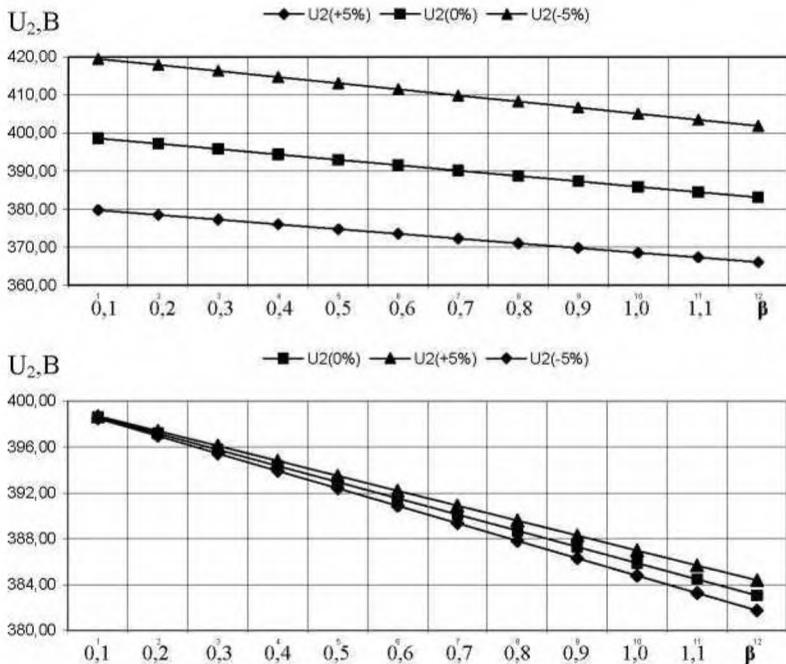


Рисунок 3.4 - Внешние характеристики трансформатора на отпайках ПБВ: а - при неизменном первичном напряжении; б - при неизменном магнитном потоке

- Характеристики при повышенном на 10% первичном напряжении (рис. 3.5-а) рассчитываются по уравнению (3.3), которое с учетом числовых значений соответствующих параметров принимает вид:

$$U_{2(+5\%)} = U_{20ном} \frac{1,1}{(1 + 0,05)} \left(1 - 0,045 * 0,784 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + 0,05^2 \right) \beta \right);$$

$$U_{2(0\%)} = 1,1 U_{20ном} (1 - 0,045 * 0,784 \beta);$$

$$U_{2(-5\%)} = U_{20ном} \frac{1,1}{(1 - 0,05)} \left(1 - 0,045 * 0,784 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + 0,05^2 \right) \beta \right).$$

- Характеристики при пониженном на 10% первичном напряжении (рис. 3.5-б) рассчитываются по уравнению (3.3), которое с учетом числовых значений соответствующих параметров принимает вид:

$$U_{2(+5\%)} = U_{20\text{ном}} \frac{0,9}{(1+0,05)} \left(1 - 0,045 * 0,784 \left(1 + \frac{3}{2} 0,05 + 0,05^2 \right) \beta \right);$$

$$U_{2(0\%)} = 0,9 U_{20\text{ном}} (1 - 0,045 * 0,784 \beta);$$

$$U_{2(-5\%)} = U_{20\text{ном}} \frac{0,9}{(1-0,05)} \left(1 - 0,045 * 0,784 \left(1 - \frac{3}{2} 0,05 + 0,05^2 \right) \beta \right).$$

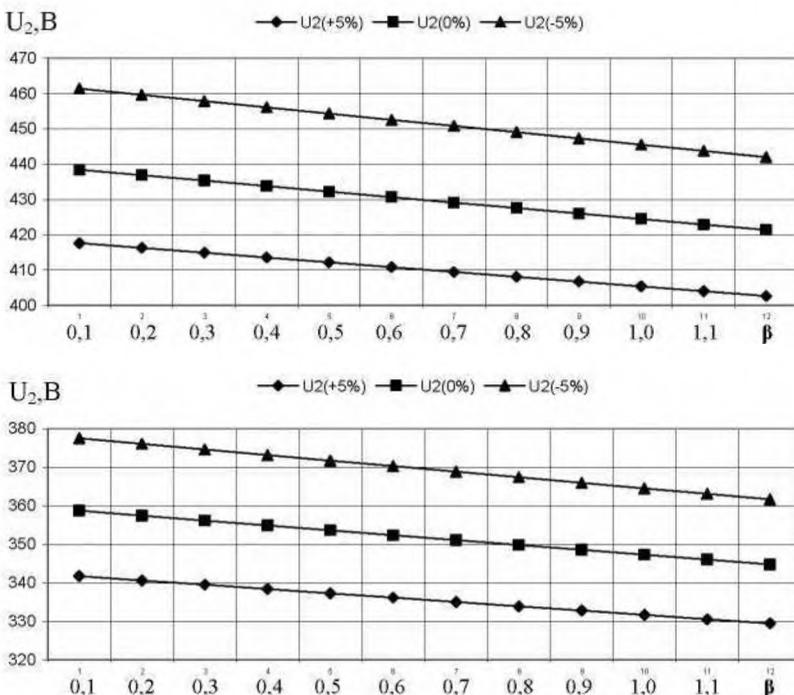


Рисунок 3.5 - Внешние характеристики трансформатора на отпайках ПБВ: а - при повышенном на 10% первичном напряжении; б - при пониженном на 10% первичном напряжении

Анализ внешних характеристик показывает, что для соблюдения норм ГОСТ 32144-2013 к отклонениям напряжения ($\pm 10\%$) необходимо правильно выбирать отпайки ПБВ, в особенности при отклонениях первичного напряжения. Так, при его повышении на 10% удовлетворительные результаты достигаются только на отпайках $\pm 5\%$, а при понижении на 10% - только на отпайках -5% .

3.2. Расчет энергетических характеристик

Основным критерием оценки энергетической эффективности трансформаторов является КПД, для вычисления которого обычно используется известная формула:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P_{0, \text{ном}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \Delta P_{0, \text{ном}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}, \quad (3.6)$$

где $P_2 = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2$ - активная мощность нагрузки; $S_{\text{ном}}$ - номинальная мощность трансформатора; $\Delta P_{0, \text{ном}}$ - потери холостого хода; $\Delta P_{\text{к.ном}}$ - номинальные потери короткого замыкания короткого замыкания; $\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}$ - коэффициент загрузки; $\cos \varphi_2$ - коэффициент мощности нагрузки.

КПД достигает максимума в том случае, если потери короткого замыкания равны потерям холостого хода. Это имеет место, если коэффициент загрузки, называемый оптимальным, равен:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\Delta P_{0, \text{ном}} / \Delta P_{\text{к.ном}}}. \quad (3.7)$$

Оптимальный коэффициент загрузки в отличие от КПД не зависит от коэффициента мощности нагрузки. Обычно пределы его изменения при номинальном коэффициенте трансформации составляют $0,7 \geq \beta_{\text{опт}} \geq 0,5$, что соответствует средней загрузке силовых трансформаторов. КПД резко возрастает при малых нагрузках, и при $\beta = 0,2 - 0,3$ приближается к максимальному значению, после чего его изменения очень незначительны в широком диапазоне. Это является ценным свойством трансформаторов, поскольку позволяет обеспечить высокую эффективность их работы при значительных колебаниях нагрузки. Абсолютный максимум достигается при чисто активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$). При $\cos \varphi_2 < 1$ КПД уменьшается, поэтому при эксплуатации трансформаторов следует стремиться к высоким значениям коэффициента мощности.

Недостаток формулы (3.6) заключается в том, что в ней не учитываются изменения напряжения (принимается $U_2 \approx U_{2\text{ном}} = \text{const}$) и соответствующие изменения активной мощности P_2 :

$$P_2 = 3U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx 3\beta U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2$$

В результате при $U_2 > U_{\text{ном}}$, КПД занижается, в противном случае ($U_2 < U_{\text{ном}}$) - завышается. Для повышения точности можно учитывать относительное изменение напряжения U^*_2 , которое предварительно рассчитывается по формуле (3.2).

Типичный вид характеристик $\eta = f(\beta)$ при различных коэффициентах мощности нагрузки показаны на рисунке 3.6.

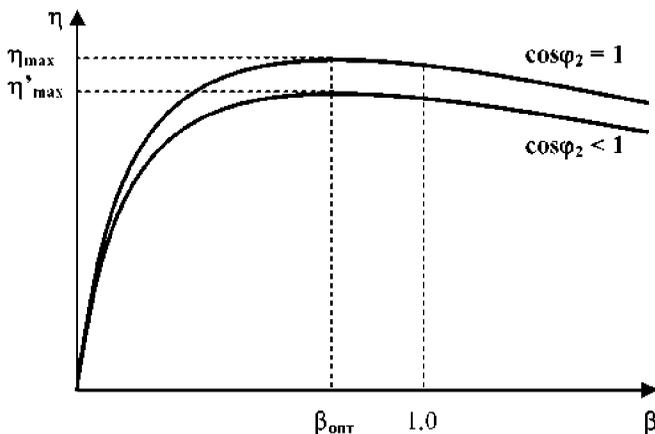


Рисунок 3.6 - Типичный вид зависимостей КПД от коэффициента загрузки при различных коэффициентах мощности нагрузки

При изменениях коэффициента трансформации нужно учитывать фактические значения потерь холостого хода и короткого замыкания, вычисляемые по формулам (2.9) и (2.18). С учетом этого для расчета КПД следует пользоваться зависимостью:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{0,\text{ф}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ф}}}{\left(\frac{U_2}{U_{2\text{ном}}} \right) \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \Delta P_{0,\text{ф}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ф}}} \quad (3.8)$$

где $U_2 = f(\beta)$ - определяется при расчете внешних характеристик.

Поскольку при переключении отпаек ПБВ изменяются потери холостого хода (2.18) и короткого замыкания (2.9), фактический оптимальный коэффициент загрузки также изменится:

$$\beta_{\text{опт.ф}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{0.ф}}{\Delta P_{к.ф}}} = \frac{U^*_1}{(1 \pm \Delta k) \sqrt{1 \pm \frac{3}{2} \Delta k + \frac{1}{2} \Delta k^2}} \beta_{\text{опт.ном}} \quad (3.9)$$

Дробь в этом выражении показывает относительную степень изменения оптимального коэффициента загрузки при переключении отпаек. Оптимальный коэффициент загрузки изменяется пропорционально первичному напряжению. Увеличение коэффициента трансформации при изменении положения отпаяк ПБВ приводит к уменьшению оптимального коэффициента загрузки, а уменьшение - напротив, к его увеличению.

Типичные зависимости $\eta = f(\beta)$ при изменениях коэффициента трансформации показаны на рисунке 3.7.

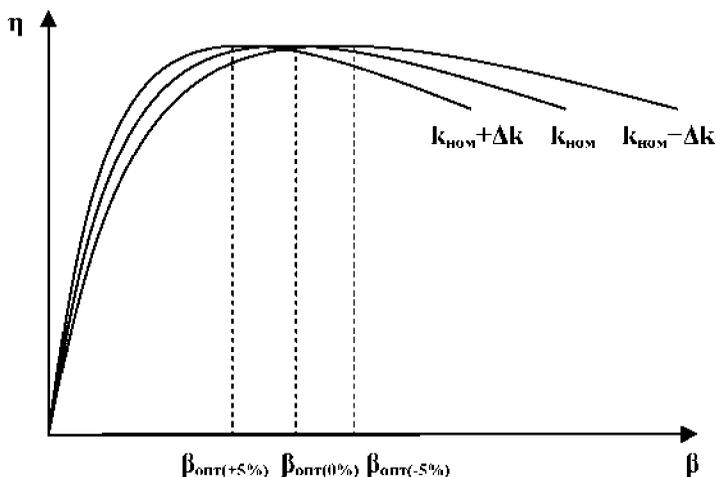


Рисунок 3.7 - Зависимости КПД от коэффициента загрузки при различных положениях регулировочных отпаяк

Пример 3.2. Рассчитать зависимости КПД трансформатора от коэффициента загрузки на отпайках ПБВ +5%, 0, и -5%: а - при номинальном первичном напряжении; б - при неизменном магнитном потоке; в - при повышенном на 10% первичном напряжении, г - при пониженном на 10% первичном напряжении.

Для расчета КПД и оптимального коэффициента загрузки пользуемся формулами 3.8 и 3.9, в которых учитываются не только фактические первичные напряжения и изменения коэффициента трансформации, но изменения вторичных напряжений, полученные в результате расчета внешних характеристик, т.е при $U_2 = f(\beta)$.

• *Характеристики при номинальном первичном напряжении.* При расчетах пользуемся полученными ранее для этого случая данными. Формула 3.8 на различных отпайках принимает вид:

$$\begin{aligned} \eta_{(+5\%)} &= 1 - \frac{\Delta P_{0(+5\%)} + \beta^2 \Delta P_{K(+5\%)}}{\frac{U_{2(+5\%)}(\beta)}{U_{2ном}} \beta S_{ном} \cos \varphi_2 + \Delta P_{0(+5\%)} + \beta^2 \Delta P_{K(+5\%)}} = \\ &= 1 - \frac{0,464 + 2,856 * \beta^2}{160 * \beta * 0,866 \frac{U_{2(+5\%)}(\beta)}{380} + 0,464 + 2,856 * \beta^2} = \\ &= 1 - \frac{0,464 + 2,856 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(+5\%)}(\beta) + 0,464 + 2,856 * \beta^2} \\ \eta_{(0\%)} &= 1 - \frac{\Delta P_{0(0\%)} + \beta^2 \Delta P_{K(0\%)}}{\frac{U_{2(0\%)}(\beta)}{U_{2ном}} \beta S_{ном} \cos \varphi_2 + \Delta P_{0(0\%)} + \beta^2 \Delta P_{K(0\%)}} = \\ &= 1 - \frac{0,51 + 2,65 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(0\%)}(\beta) + 0,51 + 2,65 * \beta^2} \\ \eta_{(-5\%)} &= 1 - \frac{\Delta P_{0(-5\%)} + \beta^2 \Delta P_{K(-5\%)}}{\frac{U_{2(-5\%)}(\beta)}{U_{2ном}} \beta S_{ном} \cos \varphi_2 + \Delta P_{0(-5\%)} + \beta^2 \Delta P_{K(-5\%)}} = \\ &= 1 - \frac{0,51 + 2,65 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(-5\%)}(\beta) + 0,51 + 2,65 * \beta^2} \end{aligned}$$

Полученные зависимости $\eta = f(\beta)$ показаны на рис. 3.8.

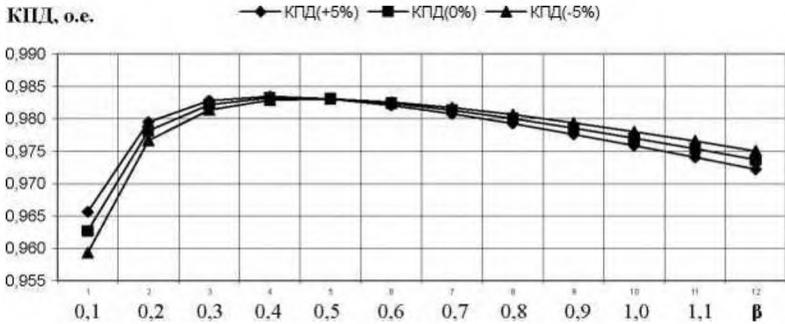


Рисунок 3.8 - Зависимости КПД от коэффициента загрузки трансформатора на отпайках ПБВ при номинальном первичном напряжении

Для расчета оптимальных коэффициентов загрузки на отпайках пользуемся формулой 3.9, в которую подставляем полученные ранее для этого случая числовые значения:

$$\beta_{\text{опт}(+5\%)} = \frac{1}{(1 + 0,05) \sqrt{1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2}} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,403 ;$$

$$\beta_{\text{опт}(0\%)} = \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,439 ;$$

$$\beta_{\text{опт}(-5\%)} = \frac{1}{(1 - 0,05) \sqrt{1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2}} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,479 .$$

• *Характеристики при неизменном магнитном потоке.* С учетом полученных ранее значений потерь холостого хода и короткого замыкания, а также вторичных напряжений, полученных при расчете внешней характеристики, формула 2.8 на различных отпайках принимает вид:

$$\eta_{(+5\%)} = 1 - \frac{0,51 + 2,856 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(+5\%)}(\beta) + 0,51 + 2,856 * \beta^2} ;$$

$$\eta_{(0\%)} = 1 - \frac{0,51 + 2,65 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(0\%)}(\beta) + 0,51 + 2,65 * \beta^2};$$

$$\eta_{(-5\%)} = 1 - \frac{0,51 + 2,458 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(-5\%)}(\beta) + 0,51 + 2,458 * \beta^2}$$

Зависимости $\eta = f(\beta)$ показаны на рис. 3.9

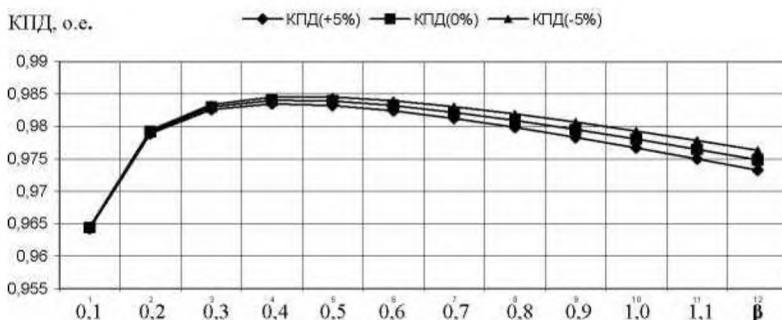


Рисунок 3.9 - Зависимости КПД от коэффициента загрузки трансформатор; на отпайках ПБВ при неизменном магнитном потоке

При неизменном магнитном потоке: $\frac{U^*_1}{(1 \pm \Delta k)} = 1$. Деля необходимые подстановки в формулу 3.9, определяем оптимальные коэффициенты загрузки на отпайках ПБВ:

$$\beta_{\text{опт}(+5\%)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3}{2} * 0,05 + \frac{1}{2} * 0,05^2}} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,422;$$

$$\beta_{\text{опт}(0\%)} = \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,439;$$

$$\beta_{\text{опт}(-5\%)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{3}{2} * 0,05 + \frac{1}{2} * 0,05^2}} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,455.$$

• *Характеристики при повышенном на 10% первичном напряжении.* Формулу 2.8 преобразуем с учетом значений потерь холостого хода и короткого замыкания, полученных для этого случая, и зависимости вторичного напряжения от коэффициента загрузки:

$$\eta_{(+5\%)} = 1 - \frac{0,557 + 2,856 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(+5\%)}(\beta) + 0,557 + 2,856 * \beta^2};$$

$$\eta_{(0\%)} = 1 - \frac{0,612 + 2,65 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(0\%)}(\beta) + 0,612 + 2,65 * \beta^2};$$

$$\eta_{(-5\%)} = 1 - \frac{0,68 + 2,458 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(-5\%)}(\beta) + 0,68 + 2,458 * \beta^2}.$$

Зависимости $\eta = f(\beta)$ показаны на рис. 3.10.

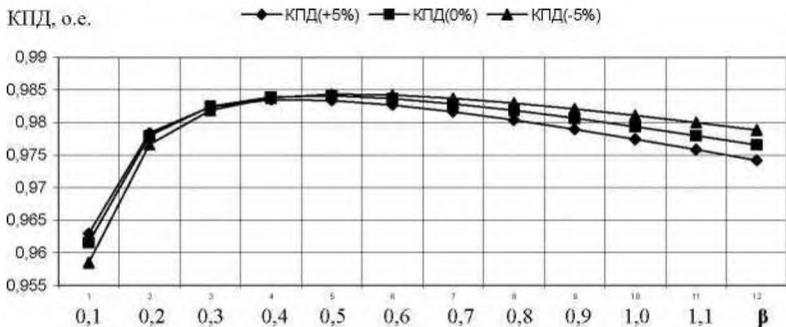


Рисунок 3.10 - Зависимости КПД от коэффициента загрузки трансформатора на отпайках ПБВ при повышенном на 10% первичном напряжении

Оптимальные коэффициенты загрузки вычисляем по формулам, преобразованным из (3.9):

$$\beta_{\text{опт}(+5\%)} = \frac{1,1}{(1 + 0,05) \sqrt{1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2}} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,442;$$

$$\beta_{\text{опт}(0\%)} = \frac{1,1}{1,0} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,483;$$

$$\beta_{\text{опт}(-5\%)} = \frac{1,1}{(1 - 0,05) \sqrt{1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2}} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,526.$$

- *Характеристики при пониженном на 10% первичном напряжении. В данном случае формула (3.8) на различных отпайках принимает вид:*

$$\eta_{(+5\%)} = 1 - \frac{0,68 + 2,458 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(+5\%)}(\beta) + 0,68 + 2,856 * \beta^2};$$

$$\eta_{(0\%)} = 1 - \frac{0,612 + 2,65 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(0\%)}(\beta) + 0,612 + 2,65 * \beta^2};$$

$$\eta_{(-5\%)} = 1 - \frac{0,68 + 2,458 * \beta^2}{0,36463 * \beta * U_{2(-5\%)}(\beta) + 0,68 + 2,458 * \beta^2}.$$

Зависимости $\eta = f(\beta)$ показаны на рис. 3.11.

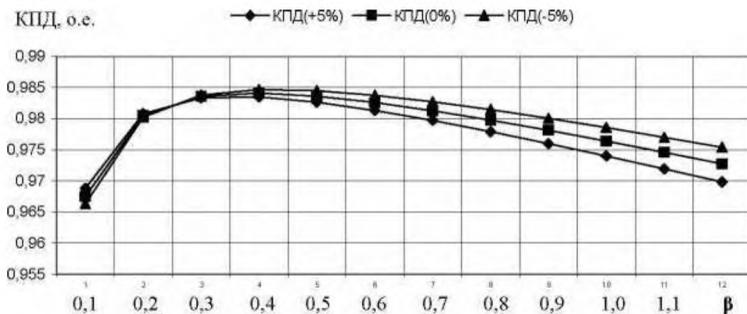


Рисунок 3.11 - Зависимости КПД от коэффициента загрузки трансформатора на отпайках ПБВ при пониженном на 10% первичном напряжении

Оптимальные коэффициенты загрузки вычисляем по формулам:

$$\beta_{\text{опт}(+5\%)} = \frac{0,9}{(1 + 0,05) \sqrt{1 + \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2}} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,362;$$

$$\beta_{\text{опт}(0\%)} = \frac{0,9}{1,0} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,395;$$

$$\beta_{\text{опт}(-5\%)} = \frac{0,95}{(1 - 0,05) \sqrt{1 - \frac{3}{2} 0,05 + \frac{1}{2} 0,05^2}} \sqrt{\frac{0,51}{2,65}} = 0,431.$$

3.3. Обоснование выбора отпаяк ПБВ

Основной целью расчета является выбор отпаяк ПБВ, на которых трансформатор обеспечивает требуемые значения вторичного напряжения в ожидаемом диапазоне изменения нагрузок и наилучшие энергетические показатели с учетом возможных изменений первичного напряжения.

Для решения этой задачи, как правило, необходимо рассмотреть и проанализировать несколько вариантов.

Результаты расчетов в рассмотренных примерах показывают, что при отклонениях первичного напряжения в допустимых по ГОСТ 32144-2013 пределах $\pm 10\%$ на различных отпайках ПБВ параметры трансформатора существенно изменяются. По сравнению с нормируемыми при номинальном первичном напряжении и «нулевом» положении отпаяк значениями изменения составляют:

- для потерь холостого хода: $(-26,9\%) - (+33,3\%)$;
- для потерь короткого замыкания: $(-7,2\%) - (+7,8\%)$;
- для напряжения короткого замыкания: $(-7,3\%) - (+7,8\%)$;
- для установившегося тока короткого замыкания: $(-16,5\%) - (+18,6\%)$;
- для вторичного напряжения в режиме холостого хода: $(-14,3\%) - (+15,8\%)$.

Вторичное напряжение и КПД трансформатора зависят не только от первичного напряжения и положения отпаяк, но и от нагрузки, модуль которой характеризуется коэффициентом загрузки β , а аргумент - коэффициентом мощности $\cos\varphi_2$ (в примере его значение составляет 0,866). Основное влияние на характеристики трансформаторов оказывает коэффициент загрузки, который может изменяться в довольно широких пределах, причем нагрузка менее 30% ($\beta = 0,3$) считается неэффективной.

Пример 4.1. Определить оптимальные положения отпаяк ПБВ при первичных напряжениях, заданных в предыдущих примерах и коэффициентах загрузки от 0,3 до 1,0 при коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,866$.

- *Первичное напряжение повышено на 10% ($U_1 = 1,11U_{ном}$) $\beta = 0,3$.* Пользуясь характеристиками, показанными на рис. 3.5-а, находим вторичные напряжения на отпайках +5%, 0, и -5%:

$$U_{2(+5\%)} = 415,1\text{В} (1,09U_{2\text{ном}}); U_{2(0\%)} = 435,3\text{В} (1,15U_{2\text{ном}});$$

$$U_{2(-5\%)} = 457,9\text{В} (1,21U_{2\text{ном}}).$$

Т.о. отпайки должны быть установлены в положение +5%, поскольку в противном случае нормативные требования не выполняются. КПД трансформатора (рис. 3.10) при этом составляет 0,983.

- *Первичное напряжение повышено на 10% ($U_1 = 1,1U_{1\text{ном}}$), $\beta = 1,0$. Вторичные напряжения на отпайках +5%, 0, и -5% равны:*

$$U_{2(+5\%)} = 405,4\text{В} (1,07U_{2\text{ном}}); U_{2(0\%)} = 424,5\text{В} (1,12U_{2\text{ном}});$$

$$U_{2(-5\%)} = 445,5\text{В} (1,17U_{2\text{ном}}).$$

Вторичное напряжение удовлетворяет нормативным требованиям на отпайках +5%. КПД составляет 0,977. Внешняя и энергетическая характеристики при повышенном на 10% первичном напряжении на отпайках +5% даны на рис. 3.12.

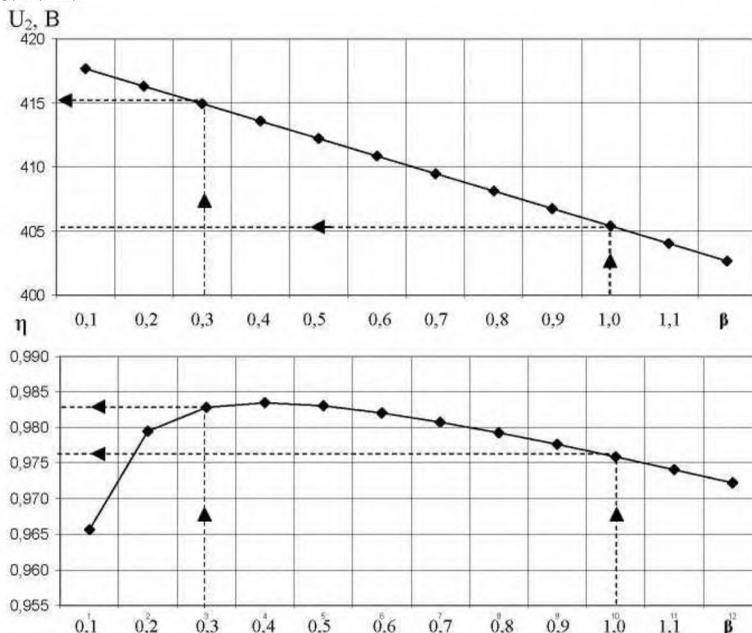


Рисунок 3.12 - Внешняя (а) и энергетическая (б) характеристики трансформатора на отпайках +5% при повышенном на 10% первичном напряжении

Также целесообразно проверить возможность подключения на отпайки +2,5%, что может обеспечить повышение КПД при относительно большой нагрузке и лучшие условия для удаленных потребителей за счет компенсации падения напряжения в линиях электропередачи.

- *Первичное напряжение равно номинальному значению*

$$(U_1 = 1,0U_{1ном}), \beta = 0,3$$

Вторичные напряжения на отпайках +5%, 0, и -5% равны:

$$U_{2(+5\%)} = 377,2В (0,99U_{2ном}); U_{2(0\%)} = 395,8В (1,04U_{2ном});$$

$$U_{2(-5\%)} = 416,2В (1,095U_{2ном}).$$

Требования ко вторичному напряжению выполняются при любом положении отпаяк, но целесообразно установить их в положение -5%, что обеспечит определенный запас по вторичному напряжению при относительно больших нагрузках при незначительном снижении КПД, который при этом равен 0,982.

- *Первичное напряжение равно номинальному значению*

$$(U_1 = 1,0U_{1ном}), \beta = 1,0.$$

Вторичные напряжения на отпайках +5%, 0, и -5% равны:

$$U_{2(+5\%)} = 368,6В (0,97U_{2ном}); U_{2(0\%)} = 385,9В (1,02U_{2ном});$$

$$U_{2(-5\%)} = 405,1В (1,07U_{2ном}).$$

Отпайки целесообразно установить в положение -5%, поскольку в этом случае допустимо снижение нагрузки и обеспечивается достаточно высокий (0,978) КПД. Внешняя и энергетическая характеристики при номинальном первичном напряжении на отпайках -5% даны на рис. 3.13, 3.14.

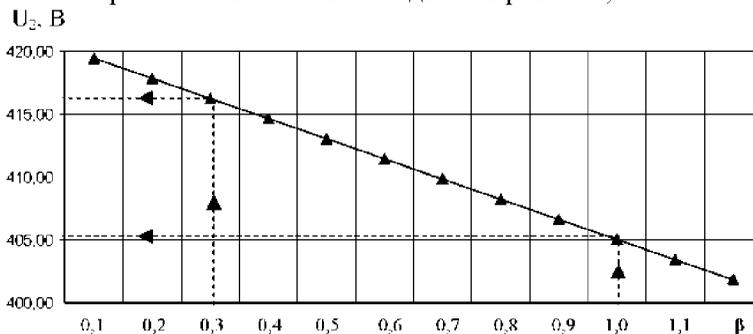


Рисунок 3.13 - Внешняя характеристика трансформатора на отпайках -5% при номинальном первичном напряжении

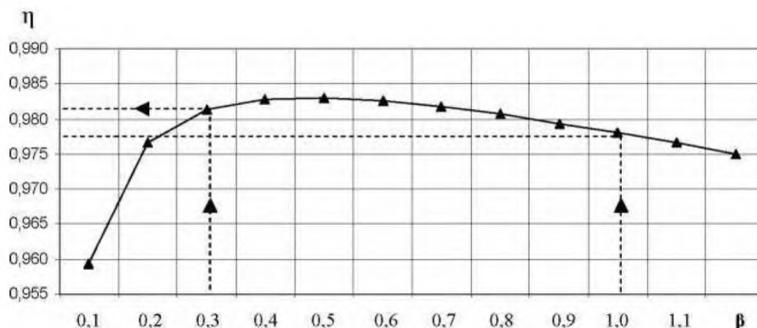


Рисунок 3.14 - Энергетическая характеристика трансформатора на отпайках -5% при номинальном первичном напряжении

- *Первичное напряжение понижено на 10% ($U_1 = 0,9U_{1ном}$), $\beta = 0,3$. Вторичные напряжения на отпайках +5%, 0, и -5%:*

$$U_{2(+5\%)} = 339,5В (0,89U_{2ном}); \quad U_{2(0\%)} = 356,2В (0,94U_{2ном});$$

$$U_{2(-5\%)} = 374,6В : (0,99U_{2ном}).$$

Отпайки необходимо установить в положение -5%. КПД при этом составит 0,983.

- *Первичное напряжение понижено на 10% ($U_1 = 0,9U_{1ном}$), $\beta = 1,0$. Вторичные напряжения на отпайках +5%, 0, и -5%:*

$$U_{2(+5\%)} = 331,7В (0,87U_{2ном}); \quad U_{2(0\%)} = 347,3В (0,91U_{2ном});$$

$$U_{2(-5\%)} = 364,5В : (0,96U_{2ном}).$$

КПД трансформатора при номинальной нагрузке составляет 0,978.

Это наиболее неблагоприятный случай, поскольку при любом положении отпаяк вторичное напряжение меньше номинального значения, хотя и соответствует нормативному предельному значению по ГОСТ 32144-2013 при установке отпаяк в положение -5%.

Внешняя и энергетическая характеристики при пониженном на 10% первичном напряжении на отпайках -5% даны на рис. 3.15.

Этот пример показывает, что существующие ($\pm 5\%$) пределы регулирования ПБВ не согласованы с требованиями ГОСТ 32144-2013 к отклонениям напряжения ($\pm 10\%$). Это объясняется тем, что ранее действовавший ГОСТ 13109-97 устанавливал норму отклонений напряжения $\pm 5\%$.

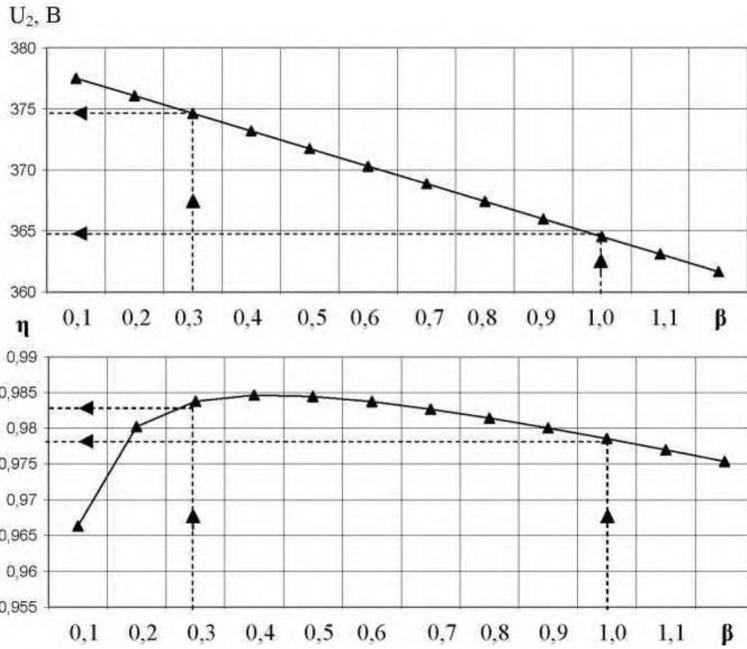


Рисунок 3.15 - Внешняя (а) и энергетическая (б) характеристики трансформатора на отпайках -5% при пониженном на 10% первичном напряжении

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов С.Н. Проектирование систем электрификации: учебное пособие для выполнения курсового проекта / С.Н. Антонов. - Ставрополь: АГРУ С, 2015 - 92 с..
2. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартинформ, 2013.
3. ГОСТ 3484.1 - 88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний // М.: Изд-во стандартов, 1989.
4. ГОСТ Р 52719 - 2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия // М.: Стандартинформ, 2007.
5. Кобозев В.А. Электрические машины. Часть 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы: учебное пособие /В.А. Кобозев. - Ставрополь: Сервисшкола, 2015. - 200 с.
6. Основные параметры силовых трансформаторов // www.ee-svstem.ru
7. Параметры трансформаторов - Портал электриков // www.electricsiteaiet
8. Петров Г.И. Электрические машины. В 3-х частях. 4.1. Введение. Трансформаторы / учебник для ВУЗов. М.: Энергия, 1974.
9. Расчет характеристик трансформаторов и электрических машин. Контрольные вопросы, расчетные задания и методические указания по дисциплине «электрические машины» для студентов электроэнергетического факультета / составители В.В. Шевченко, Е.Ю. Юрьева, Д.В. Потоцкий / Под ред. проф. В.И. Милых - Харьков: НТУ «ХПИ», 2015.
10. Силовые трансформаторы: АБС Электро // www.abselectro.com
11. Торопцев Н.Д. Электрические машины сельскохозяйственного назначения. - М.: Энергоиздат, 2005.
12. Трансформаторы силовые и распределительные масляного и сухого типа // www.aospol-electroau
13. Электронный учебник «Электрические машины» / Кафедра электромеханики Московского энергетического института (технического университета). - 452 с. // elmech.mpei.ac.ru > em/EM/EM_cont_ohtm

ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

В целях выполнения требований по хранению курсовых работ законченная и оформленная в соответствии с установленными требованиями курсовая работа и сопроводительный материал предоставляется преподавателю для защиты в распечатанном виде.

Курсовая работа допускается к защите при выполнении следующих условиях:

- степень оригинальности текста курсовой работы (проекта) не ниже 10% для работ, выполненных обучающимися по образовательным программам бакалавриата и специалитета;

- наличия рецензии преподавателя, принимающего курсовую работу (Приложение 4).

Защита курсовой работы относится к промежуточной аттестации и проводится в конце семестра. Защита курсовой работы назначается кафедрой, дирекцией/деканатом вносится в расписание промежуточной аттестации и отражается в расписании учебных занятий.

Защиту курсовой работы проводит ведущий преподаватель, а в случае возникновения спорных ситуаций создается комиссия, в состав которой входит заведующий кафедрой и преподаватели кафедры.

Защита работы проходит в форме публичного выступления (5-7 мин.) с представлением результатов работы в виде листа графической части и ответов на вопросы преподавателя/комиссии (5 мин).

Для защиты курсовой работы обучающийся готовит текст доклада. В тексте выступления отражается:

- актуальности выбранной темы;
- цели и основные задачи курсовой работы;
- основное содержание курсовой работы;
- основные выводы и практические рекомендации.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Выполненная и защищенная курсовая работа оценивается в соответствии с учетом балльно-рейтинговой системы оценивания и критериями оценки, которые указаны в рабочей программе дисциплины.

В соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе оценки знаний студентов, обучающихся по образовательным программам высшего образования курсовую работу необходимо оценить по следующим критериям с учетом установленных максимальных баллов:

Критерий	Максимальное значение в баллах	Набранных баллов
Оформление курсовой работы	10	
Содержание курсовой работы	60	
Защита курсовой работы	30	
ИТОГО	100	

Содержание критериев оценки курсовой работы:

1. Оформление курсовой работы:

- 10 баллов - курсовая работа соответствует всем требованиям к ее оформлению. При оформлении курсовой работы использовались современные средства визуализации информации.

- 5 баллов - курсовая работа частично соответствует требованиям к ее оформлению, представленный материал проиллюстрирован не качественно. При оформлении курсовой работы современные средства визуализации информации не использовались.

2. Содержание курсовой работы:

- 60 баллов - в курсовой работе подобраны необходимые информационные источники, информация использована корректно, все вопросы и разделы освещены полностью, для выводов приведены достаточные обоснования;

- 40 баллов - в курсовой работе подобраны не все необходимые информационные источники, информация использована не везде корректно, не все вопросы и разделы освещены полностью, для выводов не приведены достаточные обоснования;

- 20 баллов - в курсовой работе отсутствуют некоторые разделы, или их название не отвечает содержанию.

3. Защита курсовой работы:

- 30 баллов - студент продемонстрировал полное понимание всех положений защищаемой работы, четкость и правильность изложения ответов на все вопросы, заданные преподавателем;

- 20 баллов - студент продемонстрировал понимание основных положений защищаемой работы, четкость и правильность изложения ответов на большую часть вопросов, заданных преподавателем;

- 10 баллов - студент дал недостаточно полные ответы на вопросы, на некоторые из них дал ошибочные ответы или не ответил.

Перевод оценки из 100-балльной в пятибалльную систему оценки знаний осуществляется следующим образом:

- 89-100 - оценка «отлично»,

- 77 - 88 баллов - оценка «хорошо»,

- 65 - 76 баллов - оценка «удовлетворительно»,

- менее 64 баллов - оценка «неудовлетворительно».

При неудовлетворительной оценке курсовой работы обучающийся имеет право на повторную защиту после доработки и внесения исправлений.

У обучающегося, не сдавшего в установленный срок курсовую работу и/или не защитившего её по неуважительной причине, образуется академическая задолженность.

Оценка за курсовую работу фиксируется в зачетной книжке обучающегося и в электронной ведомости. Распечатанный и подписанный оригинал ведомости храниться в деканате института в соответствии с номенклатурой дел и сроками хранения документов 5 лет.

Приложение 1. Оформление титульного листа

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ставропольский государственный аграрный университет»

Институт механики и энергетики
Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

Курсовая работа

по дисциплине «Электрические машины»

Тема: Расчет параметров и характеристик трансформаторов с ПБВ

Выполнил(а):

Студент(ка) 3 курса ЭиЭ-О-22/1 группы

Иванов Иван Иванович

ФИО

Направление подготовки:

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Форма обучения: очная

Проверил:

к.т.н., доцент кафедры ЭиЭЭО

уч. степень, должность

Адошев Андрей Иванович

ФИО

Зарегистрирована:

« » 20 г.

Критерий	Максимальное значение в баллах	Набранных баллов
Оформление курсовой работы	10	
Содержание курсовой работы	60	
Защита курсовой работы	30	
ИТОГО	100	

Оценка « »

Дата

Подпись

Ставрополь, 2025

Приложение 4. Рецензия на курсовую работу

Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

РЕЦЕНЗИЯ на курсовую работу

Тема «Расчет параметров и характеристик трансформаторов с ПБВ»

Обучающийся (Ф.И.О.) Петров Антон Антонович

Курс 3 группа ЭиЭ-О-22/1

Преподаватель (Ф.И.О.) Иванов Иван Иванович

Выполнение общих требований к курсовой работе (проекту)

1	Объем работы соответствует установленным требованиям	Да/нет
2	Степень оригинальности курсовой работы (проекта) соответствует установленным требованиям	Да/нет (указать %)

Критерии оценивания курсовой работы (проекта)

Критерии	Количество баллов	Содержание критерия оценки	Итоговый балл
Оформление курсовой работы	10	Курсовая работа соответствует всем требованиям к ее оформлению. При оформлении курсовой работы использовались современные средства визуализации информации.	
	5	Курсовая работа частично соответствует требованиям к ее оформлению, представленный материал проиллюстрирован не качественно. При оформлении курсовой работы современные средства визуализации информации не использовались.	
Содержание курсовой работы	60	В курсовой работе подобраны необходимые информационные источники, информация использована корректно, все вопросы и разделы освещены полностью, для выводов приведены достаточные обоснования.	
	40	В курсовой работе подобраны не все необходимые информационные источники, информация использована не везде корректно, не все вопросы и разделы освещены полностью, для выводов не приведены достаточные обоснования.	

	20	В курсовой работе отсутствуют некоторые разделы, или их название не отвечает содержанию.	
Защита курсовой работы	30	Студент продемонстрировал полное понимание всех положений защищаемой работы, четкость и правильность изложения ответов на все вопросы, заданные преподавателем.	
	20	Студент продемонстрировал понимание основных положений защищаемой работы, четкость и правильность изложения ответов на большую часть вопросов, заданных преподавателем.	
	10	Студент дал недостаточно полные ответы на вопросы, на некоторые из них дал ошибочные ответы или не ответил.	
ИТОГО:			<i>Указывается итоговый балл по всем критериям</i>

Рекомендации:

Ведущий преподаватель _____ *Иванов И.И.* / _____
(ФИО) (подпись)

Приложение 5. Технические данные трансформаторов

Таблица П.5.1 - Основные параметры и характеристики трансформаторов типа ТМ

Тип трансформатора	Мощность, кВА	Сочетание напряжений, кВ		Потери, Вт			U _{кз} , %	Ток XX, %
		ВН	НН	XX	КЗ	Суммарные		
ТМ-63	63	6; 10; 20	0,23; 0,4	255	1450	1705	4,0	2,5
		27,5; 35		265	1400	1665	4,5	
ТМ-100	100	6; 10; 20		320	1750	2070	4,0	2,3
		27,5; 35		320	1700	2020	4,5	
ТМ-160	160	6; 10; 20		460	2450	2910	4,0	2,1
		27,5; 35		460	2450	2910	4,5	
ТМ-250	250	6; 10; 20		650	3250	3900	4,0	2,0
		27,5; 35		650	3250	3900	4,5	
ТМ-400	400	6; 10; 20		930	4600	5530	4,0	1,9
		27,5; 35		930	4900	5830	4,5	
ТМ-630	630	6; 10; 20		1300	6500	7800	4,0	1,7
		27,5; 35		1160	6500	7660	6,0	
ТМИ 000	1000	6; 10; 20		1700	10500	12200		1,3
		27,5; 35		1400	10800	12200		
ТМ-1600	1600	6; 10; 20; 27,5; 35		2600	17000	19600	1,1	
ТМ-2500	2500	6; 10; 20; 27,5; 35		2800	24000	26800	1,0	
ТМ-4000	4000	6; 10; 20; 27,5; 35		4200	29000	33200	0,9	

Примечания

1. ВН - обмотки высшего напряжения.
2. НН - обмотки низшего напряжения.
3. Значения потерь холостого хода (XX) и напряжения короткого замыкания (КЗ) указаны на основном ответвлении.

Таблица П.4.2 - Основные параметры и характеристики трансформаторов типа ТМГ

Тип трансформатора	Мощность, кВА	Сочетание напряжений, кВ		Потери, Вт			U _{кз} , %	Ток XX, %
		ВН	НН	XX	КЗ	Суммарные		
ТМГ-63	63	6; 10; 20	0,23; 0,4	210	1300	1510	4,0	2,5
ТМГ-63		27,5; 35		265	1400	1665	4,5	
ТМГ-100	100	6; 10; 20		210	1750	1960	4,0	2,3
ТМГ-100		27,5; 35		320	1700	2020	4,5	
ТМГ-160	160	6; 10; 20		300	2000	2300	4,0	2,1
ТМГ-160		27,5; 35		460	2450	2910	4,5	
ТМГ-250	250	6; 10; 20		425	2750	3175	4,0	2,0
ТМГ-250		27,5; 35		650	3250	3900	4,5	
ТМГ-400	400	6; 10; 20		610	3850	4460	4,0	1,9
ТМГ-400		27,5; 35		930	4900	5830	4,5	
ТМГ-630	630	6; 10; 20		1240	7600	8840	5,5	1,7
ТМГ-630		27,5; 35		1160	6500	7660	6,0	
ТМГ-1000	1000	6; 10; 20; 27,5; 35	1600	10800	12400	5,5	1,3	
ТМГ-1600	1600	6; 10; 20; 27,5; 35	2300	16500	18800	6,0	1,1	
ТМГ-2500	2500	6; 10; 20; 27,5; 35	2800	24000	26800	6,0	1,0	
ТМГ-4000	4000	6; 10; 20; 27,5; 35	4200	29000	33200	6,0	0,9	

Примечания

1. ВН - обмотки высшего напряжения.
2. НН - обмотки низшего напряжения.
3. Значения потерь холостого хода (XX) и напряжения короткого замыкания (КЗ) указаны на основном ответвлении.

Таблица П.4.3 - Основные параметры и характеристики трансформаторов типа ТС и ТСЗ

Тип трансформатора	Мощность, кВА	Сочетание напряжений, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Коэффициент трансформации	Потери, Вт			U _{кз} , %	Ток ХХ, %	
		ВН	НН			ХХ	КЗ	Суммарные			
ТС-63	63	6; 10	0,4; 0,23	Y/Y _n -0; Y/Δ-11; Δ/Y-11; Y/Z _n -11	15; 25; 26,09; 43,48	280	1050	1330	4,0	2,4	
ТСЗ-63											
ТС-100	100					440	1700	2140			2,2
ТСЗ-100											
ТС-160	160					630	2300	2930			2,0
ТСЗ-160											
ТС-250	250					950	3200	4150	1,7		
ТСЗ-250											
ТС-400	400					1300	4600	5900	1,4		
ТСЗ-400											
ТС-630	630					1750	6600	8350	1,2		
ТСЗ-630											
ТС-1000	1000	2200	10800	13000	0,9						
ТСЗ-1000											
ТС-1600	1600	3100	15600	18700	0,8						
ТСЗ-1600											

Примечания

1. ВН - обмотки высшего напряжения.
2. НН - обмотки низшего напряжения.
3. Значения потерь холостого хода (ХХ) и напряжения короткого замыкания (КЗ) указаны на основном ответвлении.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Цель и задачи курсовой работы	4
Состав, содержание и правила оформления курсовой работы	4
Методические указания по выполнению курсовой работы	8
Глава 1. Общие сведения о трансформаторах с ПБВ	8
1.1. Устройство и нормируемые параметры силовых трансформаторов 6 - 10/0,4 кВ	8
1.2. Определение параметров схемы замещения на основных отпайках при номинальном первичном напряжении	11
Глава 2. Расчет параметров трансформаторов на отпайках ПБВ	14
2.1. Параметры трансформаторов на отпайках ПБВ при номинальном первичном напряжении	14
2.2. Параметры трансформаторов на отпайках ПБВ при неизменном магнитном потоке	20
2.3. Параметры трансформаторов на отпайках ПБВ при изменениях первичного напряжения и магнитного потока	24
2.4. Преобразованная схема замещения трансформатора с ПБВ	30
Глава 3. Расчет внешних и энергетических характеристик трансформаторов на отпайках ПБВ	31
3.1. Расчет внешних характеристик	31
3.2. Расчет энергетических характеристик	37
3.3. Обоснование выбора отпаяк ПБВ	45
Список литературы	50
Требования к защите работы	51
Критерии оценки работы	52
Приложение 1. Пример оформления титульного листа	54
Приложение 2. Форма задания на курсовую работу	55
Приложение 3. Пример оформления листа графической части	56
Приложение 4. Рецензия на курсовую работу	57
Приложение 5. Технические данные трансформаторов	59

Публикуется в авторской редакции.

Подписано в печать 06.04.2025 г. Бумага офсетная
Гарнитура «Times». Формат 64 х 84 1/16.
Уел. печ. л. 3,5. Тираж 300. Заказ №9.

*Налоговая льгота - Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93-953000*

Издательская лицензия ЛРН№065840 от 23.04.1998 г.
Издательство «Ставрополь-Сервис-Школа»
355011, г. Ставрополь, ул. 45-я Параллель, 36.
Тел.: (8652) 57-47-27. E-mail: s-school@mail.ru, [http: книга-ставрополь.рф](http://книга-ставрополь.рф)

Отпечатано в типографии «ССШ», 355011, г. Ставрополь, ул. 45-я Параллель, 36.

Для заметок