

УДК 621.313

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ДВОЙНОЙ ЗИГЗАГ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ»

М.А. Прищепов,

профессор каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

А.И. Зеленкевич,

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

В.М. Збродыга,

зав. каф. электроснабжения БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье представлена методика технико-экономической оптимизации конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» по совокупным дисконтированным затратам. На основании данной методики разработаны алгоритм и программа технико-экономической оптимизации параметров трансформатора на ЭВМ. Проведен анализ влияния стоимости материала обмоток и магнитопровода, электрической энергии на конструктивные параметры, капитальные вложения и совокупные дисконтированные затраты трансформатора.

Ключевые слова: трансформатор, схема соединения обмоток, конструктивные параметры, технические характеристики, оптимизация, совокупные дисконтированные затраты.

The method of technical and economic optimization of the design parameters of a transformer with "star-double zigzag with a zero wire" winding connection scheme at the aggregate discounted costs is presented in the article. On the basis of this method an algorithm and a program for the technical and economic optimization of the parameters of the transformer using computer have been developed. The analysis of the influence of the cost of the material of the windings and magnetic circuit, electrical energy on the design parameters, capital investments and total discounted costs of the transformer has been carried out.

Keywords: transformer, winding connection diagram, design parameters, technical characteristics, optimization, total discounted costs.

Введение

Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» [1] имеет нулевую группу соединений обмоток, обеспечивает высокую синусоидальность кривых тока нагрузки и напряжения, и обладает хорошими симметрирующими свойствами [2-5].

При изготовлении целью производителей является трансформатор с минимальными капитальными затратами, а эксплуатирующие организации стремятся применять трансформатор с минимальными издержками при эксплуатации. Поэтому при проектировании необходимо получить трансформатор, у которого первоначальные капитальные вложения в сумме с текущими затратами на его эксплуатацию за определенный промежуток времени будут минимальными, что обеспечивает наименьшие совокупные дисконтированные затраты (СДЗ) и наиболее дешевую трансформацию электроэнергии [6, 7].

Целью работы является разработка методики оптимизации конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» по СДЗ.

тора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» по СДЗ.

Основная часть

В основу разработанной методики оптимизации параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» положены свойства однозначности и результативности, заключающиеся в однозначной ее реализации при изменении задаваемых конструктивных параметров в допустимых пределах.

В качестве оптимизируемой функции приняты СДЗ, состоящие из капиталовложений на производство трансформатора, издержек на эксплуатацию, включающих стоимость потерь электроэнергии в трансформаторе.

В качестве параметров оптимизации приняты плотности токов в первичной и вторичной обмотках, диаметр и высота стержней магнитопровода, величина магнитной индукции в магнитопроводе.

Наилучшим будет трансформатор, параметры которого обеспечивают наименьшие СДЗ за расчетный период.

Годовые издержки при эксплуатации трансформатора формируются из амортизационных отчислений I_A , издержек на обслуживание I_O и стоимости потерь электроэнергии $I_{ПЭ}$ [6]:

$$I_{\Sigma} = I_A + I_O + I_{ПЭ}. \quad (1)$$

Амортизационные отчисления определяются

$$I_A = \frac{K}{T}, \quad (2)$$

где K – капиталовложения на изготовление трансформатора, руб.;

T – нормативный срок службы трансформатора, лет.

Издержки на обслуживание трансформатора равны

$$I_O = \gamma_{уез} n_{уез}, \quad (3)$$

где $\gamma_{уез}$ – годовые расходы по обслуживанию одной условной единицы электрооборудования, руб./год.у.е.);

$n_{уез}$ – количество условных единиц электрооборудования, в которые оценивается трансформатор, у.е.

Издержки на обслуживание будут одинаковыми для всех вариантов расчета при определении оптимальных параметров трансформатора. Поэтому их можно не учитывать при сравнении различных вариантов.

Стоимость годовых потерь электроэнергии в трансформаторе

$$I_{ПЭ} = \Delta W_T c_{\Sigma}, \quad (4)$$

где ΔW_T – годовые потери электроэнергии в трансформаторе, кВт·ч/год;

c_{Σ} – тариф на электроэнергию, руб./(кВт·ч).

Годовые потери электроэнергии в трансформаторе равны:

$$\Delta W_T = (P_k + \kappa_{\Sigma} Q_k) \left(\frac{S_{\max}}{S_H} \right)^2 \tau_{\Sigma} + (P_x + \kappa_{\Sigma} Q_x) t_x, \quad (5)$$

где P_k – потери короткого замыкания, кВт;

P_x – потери холостого хода, кВт;

κ_{Σ} – экономический эквивалент, показывающий величину активной мощности, необходимой для производства и распределения единицы реактивной мощности, о.е.;

Q_k – реактивная составляющая мощности короткого замыкания трансформатора, кВ·Ар;

S_{\max} – максимальная загрузка трансформатора, кВ·А;

S_H – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

τ_{Σ} – время максимальных потерь, ч/год;

t_x – продолжительность работы трансформатора за год, ч/год.

Реактивная составляющая мощности короткого замыкания:

$$Q_k = \frac{U_{кр} S_H}{100}, \quad (6)$$

где $U_{кр}$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %.

Величина капиталовложений на изготовление трансформатора для различных вариантов расчета преимущественно определяется стоимостью активной части и в меньшей части зависит от стоимости бака и других элементов. Поэтому при сравнении вариантов, для упрощения расчета ограничимся учетом капиталовложений только на активную часть трансформатора, которые равны:

$$K = K_{из.пр.}^3 Z_M (G_1 + G_2) + K_{из.ст.} K_{отх}^3 Z_{СТ} (G_{Я} + G_C) + 3_{масл} G_{м.б}, \quad (7)$$

где $K_{из.пр.}$ – коэффициент, учитывающий стоимость изоляционных материалов и стоимость изготовления обмотки, о.е.;

Z_M – стоимость обмоточного провода, руб./кг;

G_1, G_2 – масса обмоток, соответственно, высшего и низшего напряжений, кг;

$K_{из.ст.}$ – коэффициент, учитывающий стоимость изготовления магнитопровода, о.е.;

$K_{отх}$ – коэффициент, учитывающий отходы при раскрое стали, о.е.;

$Z_{СТ}$ – стоимость электротехнической стали, руб./кг;

$G_{Я}, G_C$ – масса ярм и стержней магнитопровода, кг.

$3_{масл}$ – стоимость трансформаторного масла, руб./кг;

$G_{м.б}$ – масса масла в баке, кг.

Тогда, совокупные дисконтированные затраты:

$$СДЗ = K + (I_{ПЭ} - I_A) \alpha_T, \quad (8)$$

где α_T – дисконтирующий множитель.

$$\alpha_T = \frac{(1 + E)^T - 1}{E(1 + E)^T}, \quad (9)$$

где E – дисконтная ставка, о.е.

Трансформатор будет наиболее экономичным, если он выполнен с параметрами, обеспечивающими наименьшие значения СДЗ за расчетный период [6], т.е.

$$СДЗ \rightarrow \min. \quad (10)$$

Конструктивные размеры трансформатора, соответствующие наименьшим СДЗ, будут являться оптимальными.

Для определения оптимальных параметров трансформатора требуется рассмотрение большого числа вариантов расчета, отличающихся величиной капиталовложений и эксплуатационных издержек, которые зависят от степени загрузки, размеров элементов магнитной и электрической системы. Параметрами оптимизации выбраны плотности токов в первичной $X1$ и вторичной $X2$ обмотках, определяющие материалоемкость обмоток $G_{обм} = G_1 + G_2$ и величину потерь короткого замыкания P_k , диаметр $X3$ (d) и высота $X4$ (L_c) стержней, определяющие материалоемкость магнитопровода $G_{ст} = G_c + G_{я}$ и величину потерь холостого хода P_x , а также величина магнитной индукции $X5$ (B_c) в магнитопровode.

Для выполнения поставленной задачи была разработана блок-схема алгоритма технико-экономической оптимизации параметров трансформатора со схемой

соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» методом покоординатного поиска, приведенная на рисунке 1 (где $NN=5$ – число оптимизируе-

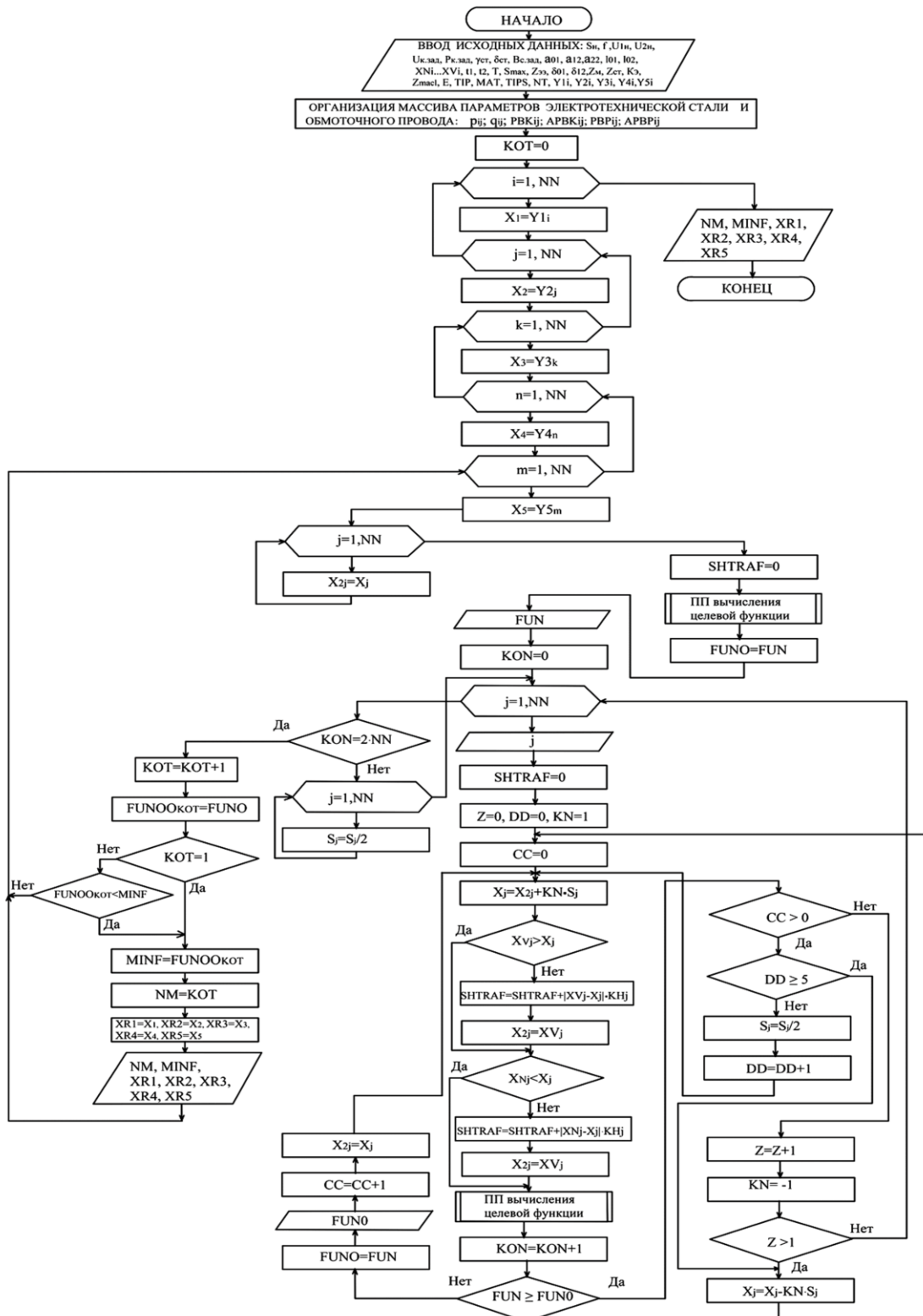


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма технико-экономической оптимизации параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

мых параметров; $X1, X2, X3, X4, X5$ – оптимизируемые параметры; KOT – количество начальных точек оптимизируемых параметров; $SHTRAF$ – штрафная функция; FUN – целевая функция; KON – количество вычислений целевой функции; Z – количество изменений направлений поиска; DD – количество неудачных шагов; KN – коэффициент направления поиска; S_j – шаг изменения оптимальных параметров; KH_j – коэффициент штрафа по параметрам; CC – количество удачных шагов; XV_j, XN_j – верхние и нижние значения оптимизируемых параметров; $FUN0$ – значение целевой функции, полученное в предыдущей итерации расчета (локальный минимум целевой функции); $FUNOO_{KOT}$ – значение целевой функции, полученное в предыдущей итерации расчета с одной из начальных точек оптимизируемых параметров; $MINF$ – минимальное значение целевой функции, полученное в любой из итераций расчета (глобальный минимум целевой функции); NM – номер начальной точки оптимизируемых параметров; $XR1, XR2, XR3, XR4, XR5$ – наименьшие значения оптимизируемых параметров) и соответственно программа на алгоритмическом языке Pascal.

Так как целевая функция имеет несколько локальных минимумов, то оптимизацию необходимо начинать с различных точек пространства оптимизации, для чего был организован распределенный массив начальных точек оптимизации по всем пяти параметрам, что позволило определить глобальный минимум целевой функции.

Для расчета целевой функции оптимизации FUN , равной СДЗ, использовалась разработанная ранее авторами методика [8] и компьютерная программа [9] расчета конструктивных параметров указанного трансформатора, которая предусматривает расчет оптимальных параметров трансформаторов различной мощности и напряжения с учетом выбора типа и материала применяемого обмоточного провода, марки и толщины пластин электротехнической стали магнитопровода. В программе предусмотрен выбор пользователем сечения и габаритных размеров обмоточного провода первичной и вторичной обмотки из введенного в нее массива стандартных значений. Она позволяет определять оптимальные технико-экономические показатели (потери холостого хода и короткого замыкания, капитальные вложения в активную часть трансформатора, амортизационные отчисления, стоимость потерь электроэнергии, совокупные дисконтированные затраты за расчетный период) трансформатора и соответствующие им конструктивные размеры трансформатора.

С использованием разработанной программы на ЭВМ проведены расчеты оптимальных параметров трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» различных мощностей. Характер изменения оптимальных параметров аналогичен для трансформаторов различной мощности.

В качестве примера выполнены расчеты оптимальных параметров для трансформатора типа ТМГ мощностью 100 кВА, напряжением 10/0,4 кВ с обмотками из

алюминиевого провода плоского сечения в зависимости от стоимости обмоточного провода при различных значениях тарифа на электроэнергию, т.е. при существующем тарифе на электроэнергию 0,243 руб./кВт·ч), а также при более высоких тарифах от 0,4 до 1,0 руб./кВт·ч). Изменение стоимости обмоточного провода принято в пределах от 2 до 32 руб./кг.

Результаты расчета показывают, что с ростом стоимости обмоточного провода Z_M при действующем в настоящее время тарифе на электроэнергию C_3 , оптимальный диаметр стержней магнитопровода d увеличивается незначительно. Увеличение тарифа на электроэнергию C_3 , при неизменных значениях стоимости обмоточного провода Z_M , приводит к уменьшению оптимального диаметра стержней d (рис. 2). При этом уменьшается площадь поперечного сечения стержней и ярм, а значения магнитной индукции увеличиваются.

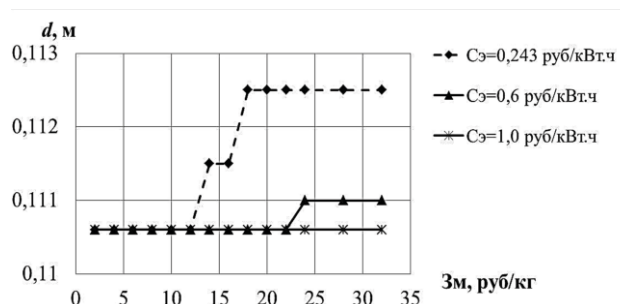


Рисунок 2. Зависимости для трансформатора типа ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

При увеличении стоимости обмоточного провода Z_M оптимальная высота стержней магнитопровода L_c несколько уменьшается. При постоянных значениях стоимости обмоточного провода увеличение тарифа на электроэнергию C_3 приводит к незначительному увеличению оптимальной высоты стержней L_c (рис. 3).

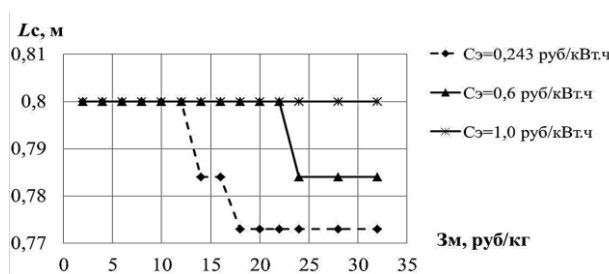


Рисунок 3. Зависимости для трансформатора типа ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

Увеличение стоимости обмоточного провода Z_M ведет к тому, что оптимальный вес металла обмоток $G_{обм}$ снижается за счет увеличения плотности токов в обмотках. Повышение тарифа на электроэнергию C_3 , при неизменных значениях стоимости обмоточного провода Z_M , увеличивает его вес $G_{обм}$ (рис. 4).

С учетом характера изменения оптимальных значений основных размеров магнитопровода при увеличении стоимости обмоточного провода Z_M , масса стали

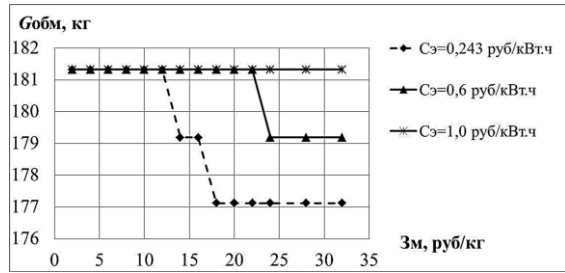


Рисунок 4. Зависимости для трансформатора типа ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

магнитопровода $G_{ст}$ трансформатора незначительно увеличивается в основном за счет увеличения массы ярм. Повышение стоимости электроэнергии $C_э$, при $Z_m = const$, уменьшает массу стали $G_{ст}$ (рис. 5).

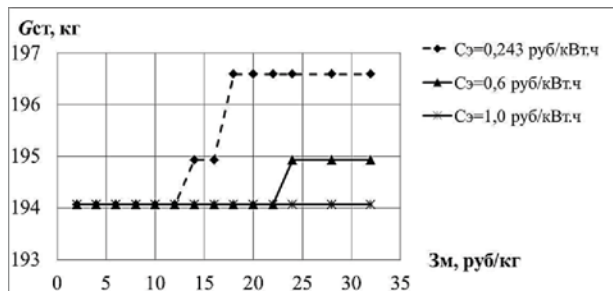


Рисунок 5. Зависимости для трансформатора типа ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

Характер изменения оптимального значения потерь короткого замыкания P_k определяется соотношением стоимости обмоточного провода Z_m и тарифа на электроэнергию $C_э$. С ростом стоимости обмоточного провода Z_m оптимальные значения потерь короткого замыкания P_k снижаются при действующем тарифе на электроэнергию $C_э$; при увеличении тарифа $C_э$ – потери P_k увеличиваются (рис. 6).

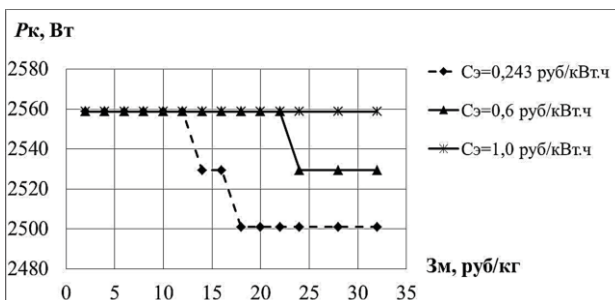


Рисунок 6. Зависимости для трансформатора типа ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

Так как с ростом стоимости обмоточного провода Z_m несколько увеличивается масса стали $G_{ст}$, в том числе и за счет увеличения площади поперечного сечения стержней и ярм, то незначительно возрастают оптимальные потери холостого хода P_x за счет

увеличения удельной нагрузки на магнитную систему. Повышение тарифа на электроэнергию $C_э$, при постоянных значениях стоимости обмоточного провода Z_m , снижает потери холостого хода P_x (рис. 7).

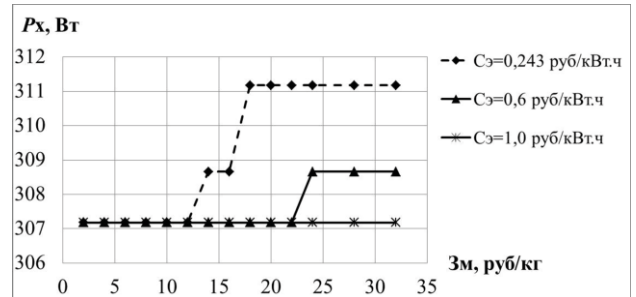


Рисунок 7. Зависимости для трансформатора типа ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

Оптимальные значения капитальных вложений K и амортизационных отчислений увеличиваются с ростом стоимости обмоточного провода Z_m . Увеличение тарифа на электрическую энергию $C_э$, при неизменных значениях стоимости обмоточного провода Z_m , незначительно увеличивает величину капитальных вложений K (рис. 8).

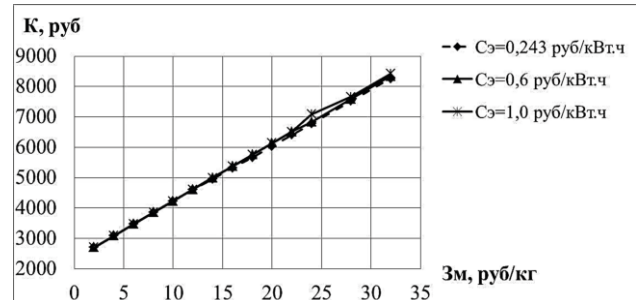


Рисунок 8. Зависимости для трансформатора типа ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

СДЗ возрастают с ростом стоимости обмоточного провода Z_m . Увеличение тарифа на электроэнергию $C_э$, при $Z_m = const$ также увеличивает СДЗ (рис. 9).

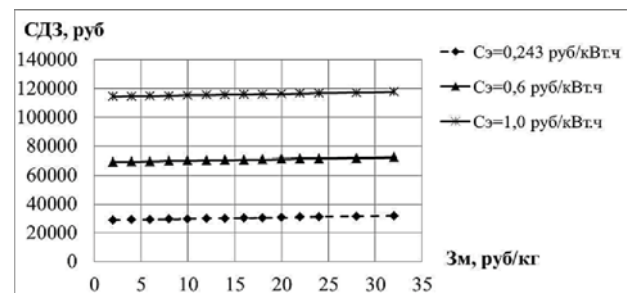


Рисунок 9. Зависимости для трансформатора типа ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»

Аналогичные зависимости получены и для трансформаторов других мощностей.

Заключение

1. Анализ проведенных расчетов показывает, что значения оптимальных конструктивных параметров трансформатора определяются соотношением стоимости обмоточного провода Z_M и тарифа на электрическую энергию C_3 .

2. С ростом стоимости обмоточного провода Z_M при действующем тарифе на электроэнергию C_3 диаметр стержней магнитопровода d несколько увеличивается, высота стержней магнитопровода L_c незначительно уменьшается, вес металла обмоток $G_{обм}$ снижается за счет увеличения плотности токов в обмотках, масса стали магнитопровода $G_{ст}$ незначительно увеличивается, что обуславливает снижение потерь короткого замыкания P_k и возрастание значений потерь холостого хода P_x . При этом капитальные вложения K , амортизационные отчисления I_a и СДЗ возрастают.

3. Увеличение тарифа на электроэнергию C_3 , при неизменных значениях стоимости обмоточного провода Z_M , приводит к уменьшению оптимального диаметра стержней d магнитопровода. При этом уменьшается площадь поперечного сечения стержней и ярм, а магнитная индукция увеличивается, оптимальная высота стержней L_c незначительно увеличивается, масса обмоточного провода $G_{обм}$ увеличивается, а стали магнитопровода $G_{ст}$ – снижается, что приводит к увеличению потерь короткого замыкания P_k и снижению потерь холостого хода P_x . Величина капитальных вложений K незначительно увеличивается, СДЗ значительно возрастают.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: патент №16008 Респ. Беларусь / А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга; заявитель Белорусский гос. аграрный технический ун-т. – № а 20100121; заявл. 01.02.2010; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180-181.

2. Прищепов, М.А. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым

проводом / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16-25.

3. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25-31.

4. Прищепов, М.А. Экспериментальные исследования работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга // Агропанорама. – 2019. – № 5. – С. 38-41.

5. Зеленкевич, А.И. Конструктивное исполнение трансформатора «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» / А.И. Зеленкевич, М.А. Прищепов, В.М. Збродыга // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы VII Национальной науч.-практич. конф. – РФ, Саратов. – Саратов: ГАУ, 2020. – С. 19-22.

6. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – Москва: Колос, 2000. – 536 с.

7. Королевич, Н.Г. Экономическое обоснование технических решений в дипломных проектах по электроснабжению предприятий АПК / Н.Г. Королевич, В.В. Ширшова, Г.И. Янукович. – Минск: БГАТУ, 2008. – 80 с.

8. Прищепов, М.А. Методика расчета конструктивных параметров и технических характеристик трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» / М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга // Агропанорама. – 2020. – № 6. – С. 32-37.

9. Расчет трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»: свидетельство о регистрации компьютерной программы №21370 / М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга, И.Г. Рутковский; заявитель Белор. гос. аграрн. технич. ун-т; заявл. 12. 11. 2020; дата регистр. 21. 12. 2020 // Реестр зарегистрированных компьютерных программ / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2020.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 05.04.2021

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842. Стоимость подписки на 1-е полугодие 2021 года: для индивидуальных подписчиков - 31,95 руб., ведомственная подписка - 33,51 руб.