

## СЕКЦІЯ 1. СУЧАСНИЙ СТАН, ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

---

УДК 621.313

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Прищепов М.А., докт. техн. наук, доцент,  
Зеленькевич А.И., ст. преподаватель,  
Збродыга В.М., к.т.н., доцент  
*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск, Беларусь.*

Силовой трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» [1] обеспечивает высокую синусоидальность кривых тока нагрузки и напряжения и обладает хорошими симметрирующими свойствами [2-5].

При производстве стремятся получить трансформатор с минимальными капитальными затратами, а эксплуатирующие организации стремятся использовать трансформатор с минимальными издержками при эксплуатации, что порождает определенные противоречия. 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 наиболее дешевую трансформацию энергии. Целью работы является разработка методики оптимизации конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» по критерию совокупных дисконтированных затрат (СДЗ).

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  $I_0$  и стоимости потерь электроэнергии  $I_{ПЭ}$  [6]:

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

Амортизационные отчисления

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

где  $K$  – капиталовложения на изготовление трансформатора, руб.;

$T$  – нормативный срок службы трансформатора, лет.

Издержки на обслуживание

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

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

$n_{\text{уеэ}}$  – 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

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

где  $\Delta W_T$  – годовые потери электроэнергии в трансформаторе, кВт·ч/год;

$c_{\text{Э}}$  – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч.

Годовые потери электроэнергии равны:

$$\Delta W_T = (P_K + k_{\text{Э}} Q_K) \left( \frac{S_{\text{max}}}{S_H} \right)^2 \tau_{\text{Э}} + (P_X + k_{\text{Э}} Q_X) t_X, \quad (5)$$

где  $P_K$  – потери короткого замыкания, кВт;

$P_X$  – потери холостого хода, кВт;

$k_{\text{Э}}$  – 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;

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

$S_H$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$\tau_{\text{Э}}$  – время максимальных потерь, ч/год;

$t_X$  – продолжительность работы трансформатора за год, ч/год.

Реактивная составляющая мощности короткого замыкания:

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

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

Величина капиталовложений на изготовление трансформатора для различных вариантов расчета в наибольшей степени определяется стоимостью активной части. Поэтому при сравнении вариантов для упрощения расчета ограничимся учетом капиталовложений только на активную часть трансформатора, которые равны:

$$K = K_{\text{из.пр.}} \cdot Z_M (G_1 + G_2) + K_{\text{изг.ст.}} \cdot K_{\text{отх}} \cdot Z_{\text{ст}} (G_{\text{я}} + G_{\text{с}}) + Z_{\text{масл}} \cdot G_{\text{м.б}}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{из.пр.}}$  – 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;

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

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

$Z_{\text{ст}}$  – стоимость электротехнической стали, руб./кг;

$G_{\text{я}}, G_{\text{с}}$  – масса ярм и стержней магнитопровода, кг.

$Z_{\text{масл}}$  – стоимость трансформаторного масла, руб./кг;

$G_{\text{м.б}}$  – масса масла в баке, кг.

Тогда, совокупные дисконтированные затраты:

$$СДЗ = K + (I_{\text{пэ}} - I_{\text{а}}) \alpha_T, \quad (8)$$

где  $\alpha_T$  – дисконтирующий множитель.

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

где  $E$  – дисконтная ставка, о.е.

Трансформатор будет наилучшим, если он выполнен с параметрами, обеспечивающими наименьшие СДЗ за расчетный период [7], т.е.

$$СДЗ \rightarrow \min. \quad (10)$$

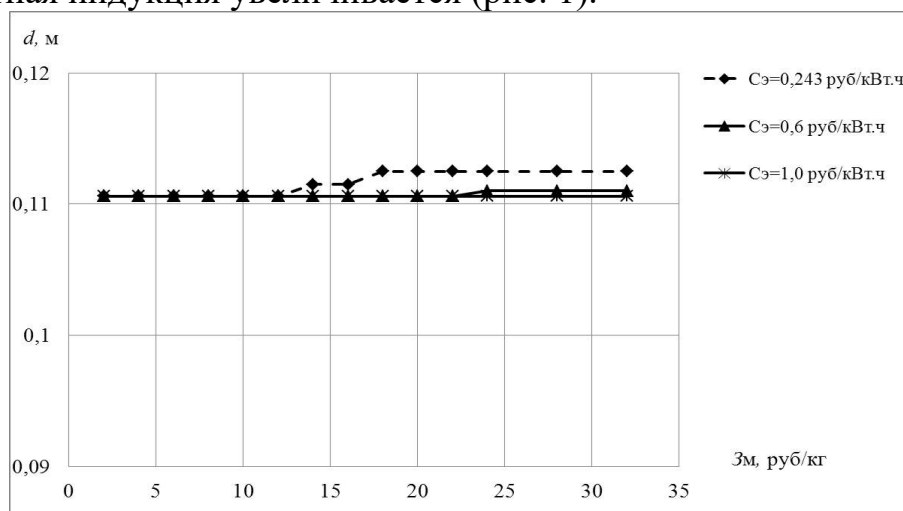
Конструктивные размеры трансформатора, соответствующие наименьшим СДЗ, будут являться оптимальными.

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. Поэтому параметрами оптимизации являются плотности токов в первичной  $X1$  и вторичной  $X2$  обмотках, определяющие материалоемкость обмоток  $G_{\text{обм}} = G_1 + G_2$  и величину потерь короткого замыкания  $P_{\text{к}}$ , диаметр  $X3$  ( $d$ ) и высота  $X4$  ( $L_{\text{с}}$ ) стержней, определяющие материалоемкость магнитопровода  $G_{\text{ст}} = G_{\text{с}} + G_{\text{я}}$  и величину потерь холостого хода  $P_{\text{х}}$ , а также величина магнитной индукции  $X5$  в магнитопроводе.

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, и соответственно программа на алгоритмическом языке Pascal.

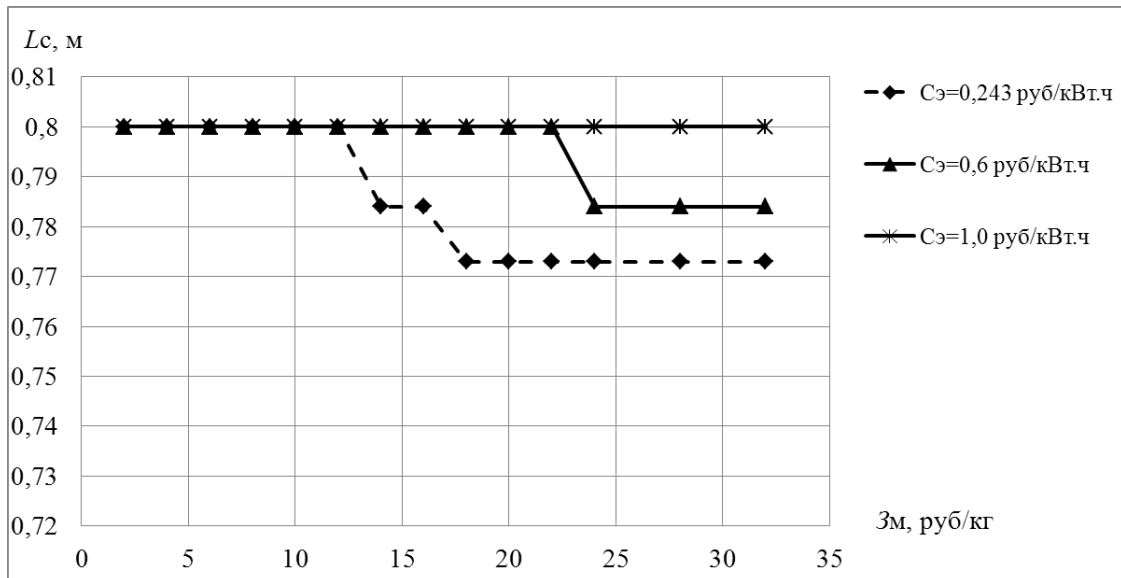
Так как целевая функция имеет несколько локальных минимумов, то оптимизацию необходимо начинать с различных точек пространства оптимизации, для чего был организован распределенный массив начальных точек оптимизации по всем пяти параметрам, что позволило определить глобальный минимум целевой функции. Для расчета целевой функции оптимизации, равной СДЗ, использовалась разработанная ранее авторами методика [8] и компьютерная программа [9] расчета конструктивных параметров указанного трансформатора.

В качестве примера, расчеты оптимальных параметров трансформатора выполнены 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 2 - 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  $d$  увеличивается незначительно. Увеличение тарифа на электроэнергию  $C_3$ , при неизменных значениях стоимости обмоточного провода  $Z_M$ , приводит к уменьшению оптимального диаметра стержней  $d$ . При этом уменьшается площадь поперечного сечения стержней и ярм, а магнитная индукция увеличивается (рис. 1).



**Рис. 1. Залежності  $d = f(Z_M)$  для трансформатора типу ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»**

Оптимальная высота стержней магнитопровода  $L_c$  незначительно уменьшается с ростом стоимости обмоточного провода  $Z_M$ . Увеличение тарифа на электроэнергию  $C_э$ , при неизменных значениях стоимости обмоточного провода, приводит к незначительному увеличению оптимальной высоты стержней  $L_c$  (рисунок 2).



**Рис. 2. Залежності  $L_c = f(Z_M)$  для трансформатора типу ТМГ-100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»**

**Вывод.** Анализ проведенных расчетов показывает, что значения оптимальных конструктивных параметров трансформатора определяются соотношением стоимости обмоточного провода  $Z_M$  и тарифа на электроэнергию  $C_э$ . С ростом стоимости обмоточного провода  $Z_M$  при действующем тарифе на электроэнергию  $C_э$  диаметр стержней  $d$  незначительно 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  $P_k$ , возрастание потерь холостого хода  $P_x$ . При этом капитальные вложения  $K$ , амортизационные отчисления  $I_a$  и СДЗ возрастают.

#### Список использованных источников

1. Патент №16008 Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: / А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» - № а 20100121; заявл. 2010.02.01; опубл. 30.06.2012 // Афіційны бюл. / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180-181.

2. Прищепов М.А., Збродыга В.М., Зеленкевич А.И. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым». Агропанорама. 2017. № 5. С. 16-25.

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

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

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

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

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

8. Прищепов М.А., Зеленкевич А.И., Збродыга В.М. Методика расчета конструктивных параметров и технических характеристик трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом». Агропанорама. - 2020. - N 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 УО «БГАТУ». - заявл. 12. 11. 2020; дата регистр. 21. 12. 2020 // Реестр зарегистрированных компьютерных программ / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. 2020.