

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА – ТРЕУГОЛЬНИК С ЗИГЗАГОМ»

М.А.Прищепов, докт. техн. наук, доцент, В.М. Збродыга, ст. препод., Г.И. Янукович, канд. техн. наук, профессор (БГАТУ)

### Аннотация

*В статье приведена методика технико-экономической оптимизации параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом». На основании данной методики разработаны алгоритм и программа расчета на ЭВМ, а также выполнены расчеты при различных исходных параметрах для анализа их влияния на технико-экономические показатели трансформатора.*

*The technique of technical and economic optimization of the transformer parameters with the scheme of windings connection «a star-triangle with a zigzag» is stated in the article. On the basis of the given technique the algorithm and the computer calculation program are developed, and also calculations are executed at the various initial parameters for the analysis of their influence on technical and economic indicators of the transformer.*

### Введение

В процессе производства трансформаторов заводы-изготовители стремятся изготовить трансформатор с самыми низкими капитальными затратами. Эксплуатирующие организации в большей степени интересуют минимальные издержки при их эксплуатации.

При проектировании трансформатора необходимо получить не самый дешевый трансформатор, а наиболее дешевую трансформацию энергии, то есть трансформатор, у которого первоначальные капитальные вложения в сумме с текущими затратами на его эксплуатацию за определенный промежуток времени будут минимальными. Разработанная методика позволяет получить трансформатор с высокими техническими характеристиками и минимальными совокупными дисконтированными затратами.

### Основная часть

Годовые издержки при эксплуатации трансформатора формируются из амортизационных отчислений  $I_A$ , издержек на обслуживание  $I_O$  и стоимости потерь электроэнергии  $I_{пэ}$  [1]:

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

Амортизационные отчисления:

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

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

$T$  – нормативный срок службы трансформатора, лет.

Издержки на обслуживание:

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

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

$n_{уез}$  – количество условных единиц электрооборудования, в которых оценивается трансформатор.

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:

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

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

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

Годовые потери электроэнергии равны:

$$\Delta W_T = (P_K + \kappa_{\Sigma} Q_K) \left( \frac{S_{\max}}{S_H} \right)^2 T_{\Sigma} + (P_X + \kappa_{\Sigma} Q_X) t_X, \quad (5)$$

где  $P_K$  – потери короткого замыкания, кВт;

$P_X$  – потери холостого хода, кВт;

$\kappa_{\Sigma}$  – экономический эквивалент, показывающий величину активной мощности, необходимой для производства и распределения единицы реактивной мощности;

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

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

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

$T_{\sigma}$  – время максимальных потерь, ч/год;

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

Реактивная составляющая мощности короткого замыкания:

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

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

Капиталовложения в изготовление трансформатора для различных вариантов расчета будут различаться только стоимостью активной части. Поэтому при сравнении вариантов для упрощения расчета ограничимся учетом капиталовложений только в активную часть трансформатора, которые равны:

$$K = K_{из.пр.} Z_M (G_1 + G_2) + K_{изг.ст.} K_{отх} Z_{CT} (G_{Я} + G_C), \quad (7)$$

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

$Z_M$  – стоимость обмоточного провода, руб./кг;

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

$K_{изг.ст.}$  – коэффициент, учитывающий стоимость изготовления магнитопровода;

$K_{отх}$  – коэффициент, учитывающий отходы при раскросе стали;

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

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

Совокупные дисконтированные затраты:

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

где  $\alpha_T$  – дисконтирующий множитель.

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

где  $E$  – дисконтная ставка.

Наилучшим будет трансформатор, параметры которого обеспечивают наименьшие совокупные дисконтированные затраты за расчетный период [2]:

$$СДЗ = \min. \quad (10)$$

Конструктивные размеры трансформатора, соответствующие наименьшим дисконтированным затратам, являются оптимальными.

Для определения оптимальных параметров трансформатора требуется рассмотрение большого числа вариантов расчета, отличающихся величиной капиталовложений и эксплуатационных издержек, которые зависят от степени загрузки и размеров элементов магнитной и электрической системы. Поэтому параметрами оптимизации являются плотности токов в первичной  $X1_1$  и вторичной  $X1_2$  обмотках, определяющие материалоемкость обмоток и величину потерь короткого замыкания, а также диаметр  $X1_3$  и высота  $X1_4$  стержней, определяющие материалоемкость магнитопровода и величину потерь холостого хода. Для выполнения поставленной задачи авторами публикации разработана блок-схема алгоритма технико-экономической оптимизации параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» методом покоординатного поиска, приведенная на рис. 1, где  $NN=4$  – число оптимизируемых параметров;  $X1_j$  – оптимизируемые параметры;  $SHTRAF$  – 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 оптимизируемых параметров;  $KN_j$  – коэффициент штрафа по параметрам;  $CC$  – количество удачных шагов;  $XV_j, XN_j$  – верхние и нижние значения оптимизируемых параметров, и соответственно программа на алгоритмическом языке Pascal. Для расчета целевой функции оптимизации  $FUN$ , равной совокупным дисконтированным затратам, использовалась разработанная ранее авторами методика [3] и компьютерная программа [4] расчета конструктивных параметров указанного трансформатора.

Разработанная программа 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 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 активной части.

С использованием разработанной программы проведены расчеты на ЭВМ оптимальных параметров трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» различных мощностей и различных вторичных напряжений. Характер изменения оптимальных параметров аналогичен для трансформаторов различной мощности и напряжения. Установлено, что при различном нормативном сроке службы трансформатора и различной продолжительности его работы в году оптимальные конструктивные

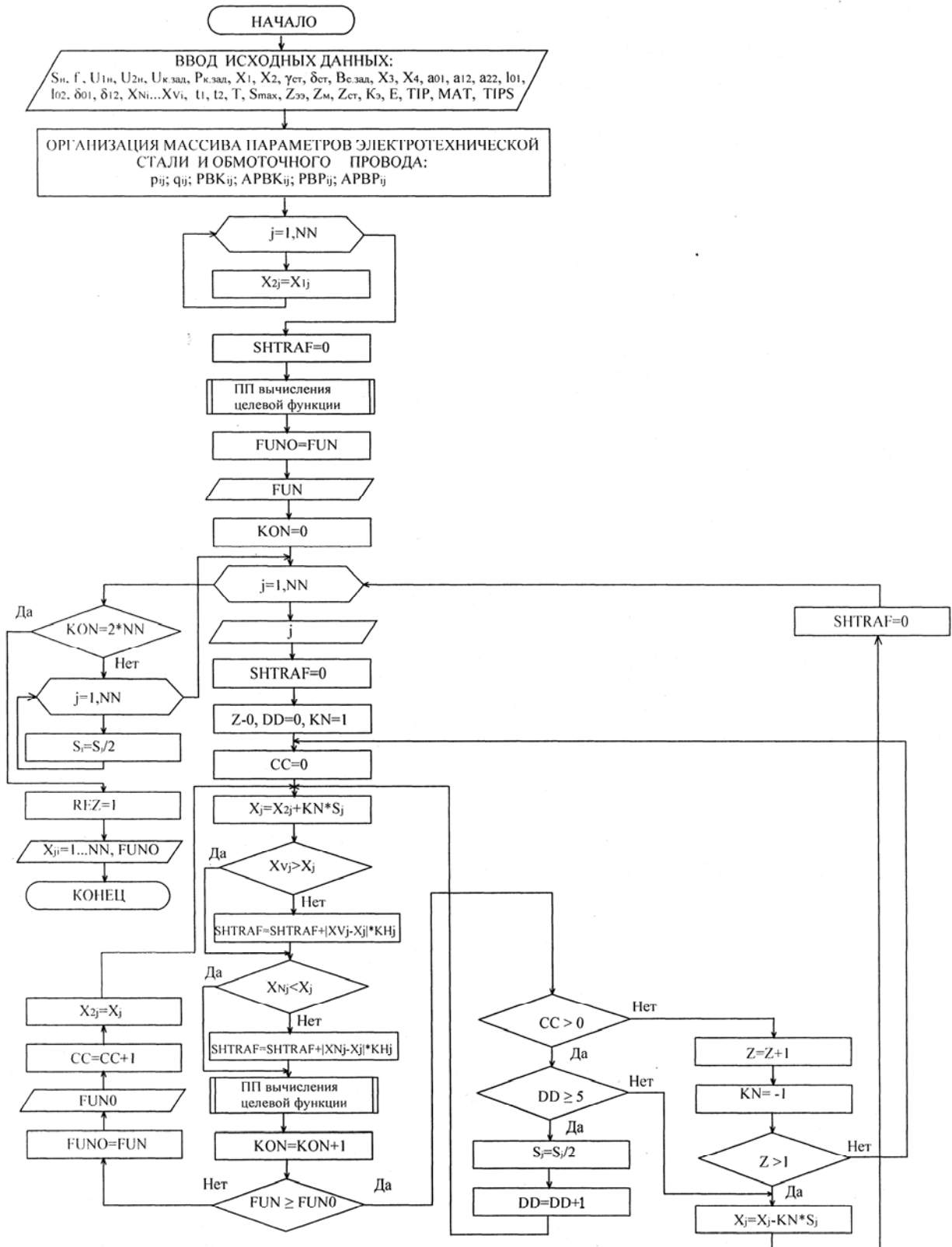


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма технико-экономической оптимизации параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом»

размеры трансформатора остаются неизменными. Оптимальные конструктивные размеры зависят от соотношения стоимости применяемых материалов и тарифа на электроэнергию.

Расчеты оптимальных параметров выполнены для трансформатора типа ТС мощностью 10 кВА напряжением 380/220 В с обмотками из медного провода круглого сечения в зависимости от стоимости обмоточного провода при различных значениях тарифа на электроэнергию (при существующем тарифе на электроэнергию – 323 руб./кВт·ч), а также при предполагаемых тарифах – 500 и 1000 руб./кВт·ч. Изменение стоимости обмоточного провода принято в пределах 16000–46000 руб./кг.

Результаты расчета показывают, что с ростом стоимости обмоточного провода при действующем в настоящее время тарифе на электроэнергию оптимальный диаметр стержней остается практически неизменным, а при увеличении тарифа – уменьшается. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях стоимости обмоточного провода приводит к увеличению оптимального диаметра стержней. При этом увеличивается площадь поперечного сечения стержней и ярм, а магнитная индукция уменьшается (рис. 2).

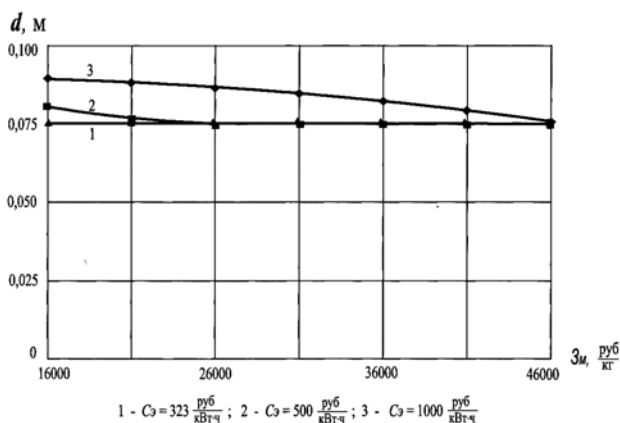


Рисунок 2. Зависимости  $d = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками

Оптимальная высота стержней магнитопровода незначительно увеличивается с ростом стоимости обмоточного провода. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях стоимости обмоточного провода приводит к незначительному уменьшению оптимальной высоты стержней.

С ростом стоимости обмоточного провода оптимальное расстояние между осями стержней  $s$  и оптимальное соотношение основных размеров  $\beta$  уменьшаются за счет снижения объема обмоточного провода. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях стоимости обмоточного провода приводит к увеличению оптимального расстояния между осями стержней  $s$  и соотношения основных

размеров  $\beta$  за счет увеличения объема обмоточного провода (рис. 3, 4).

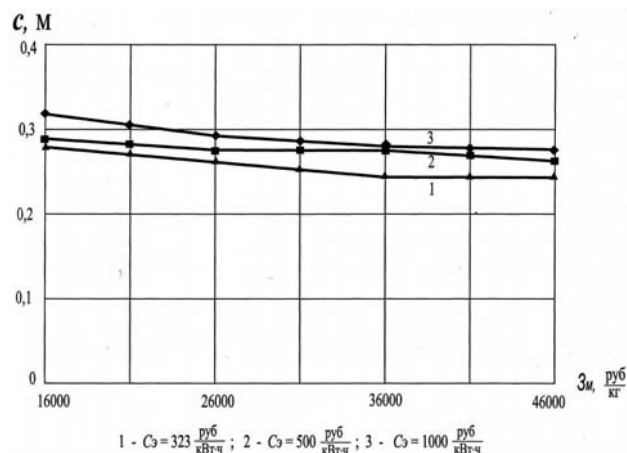


Рисунок 3. Зависимости  $s = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками

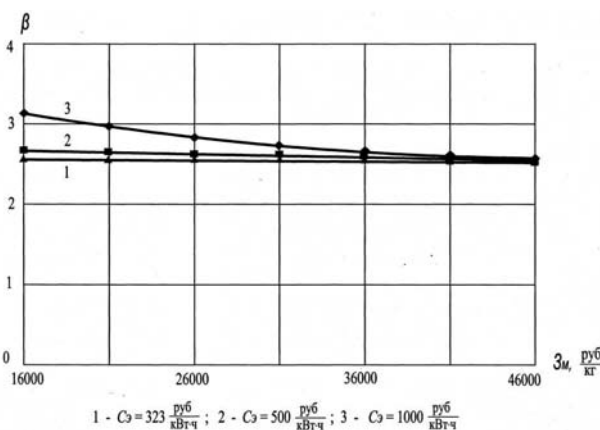
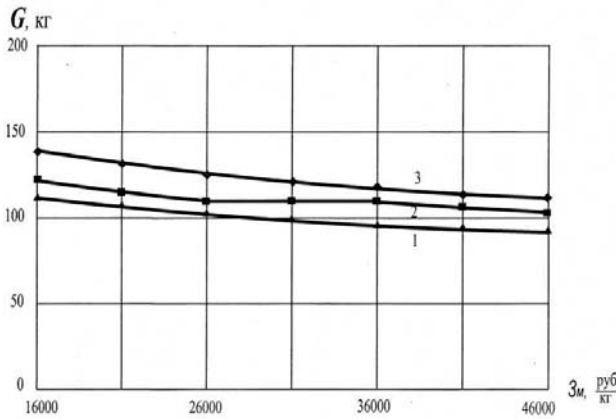


Рисунок 4. Зависимости  $\beta = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками

С ростом стоимости обмоточного провода оптимальный вес металла обмоток снижается за счет увеличения плотности токов в обмотках, что уменьшает радиальные размеры обмоток и длину ярм магнитопровода. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях стоимости обмоточного провода увеличивает его вес (рис. 5).

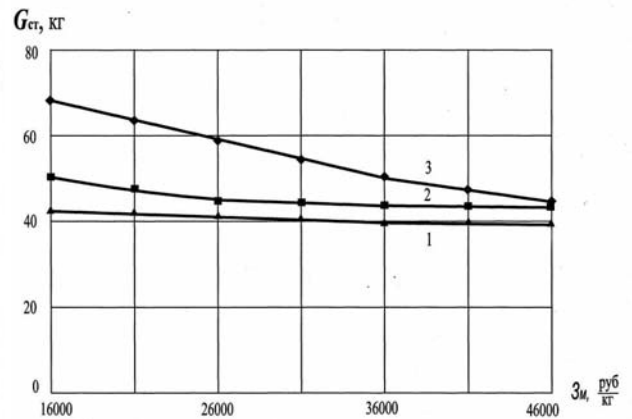
При увеличении стоимости обмоточного провода, с учетом характера изменения оптимальных значений основных размеров магнитопровода, масса стали магнитопровода трансформатора уменьшается в основном за счет снижения массы ярм. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях стоимости обмоточного провода увеличивает массу стали (рис. 6).

Характер изменения оптимального значения потерь короткого замыкания определяется соотношением стоимости обмоточного провода и тарифа



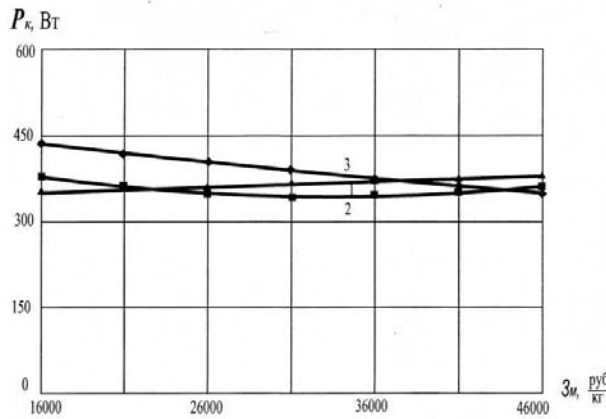
1 -  $C_3 = 323 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 2 -  $C_3 = 500 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 3 -  $C_3 = 1000 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$

**Рисунок 5. Зависимости  $G = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками**



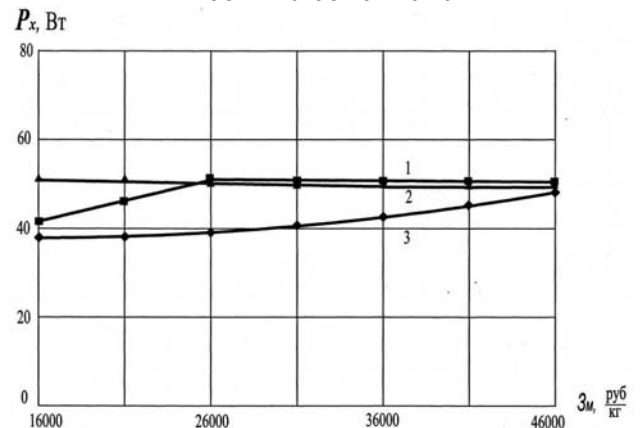
1 -  $C_3 = 323 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 2 -  $C_3 = 500 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 3 -  $C_3 = 1000 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$

**Рисунок 6. Зависимости  $G_{СТ} = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками**



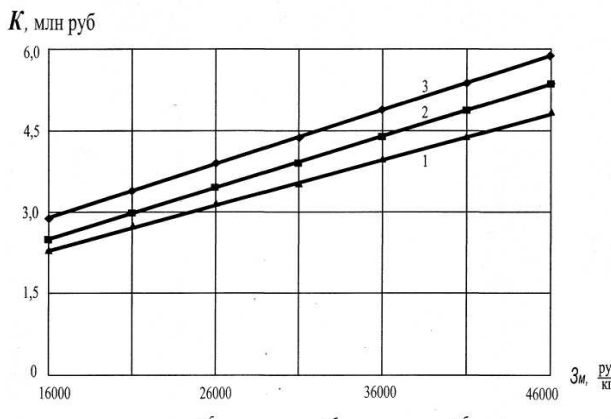
1 -  $C_3 = 323 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 2 -  $C_3 = 500 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 3 -  $C_3 = 1000 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$

**Рисунок 7. Зависимости  $P_K = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками**



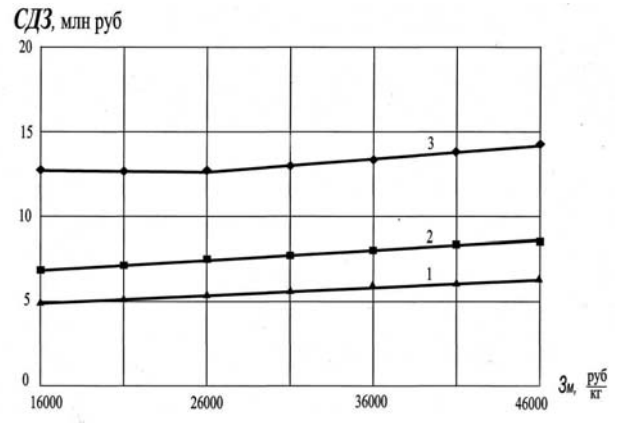
1 -  $C_3 = 323 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 2 -  $C_3 = 500 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 3 -  $C_3 = 1000 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$

**Рисунок 8. Зависимости  $P_X = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками**



1 -  $C_3 = 323 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 2 -  $C_3 = 500 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 3 -  $C_3 = 1000 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$

**Рисунок 9. Зависимости  $K = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками**



1 -  $C_3 = 323 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 2 -  $C_3 = 500 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$ ; 3 -  $C_3 = 1000 \frac{\text{руб}}{\text{кВтч}}$

**Рисунок 10. Зависимости  $CДЗ = f(Z_M)$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками**

на электроэнергию. С ростом стоимости обмоточного провода оптимальные потери короткого замыкания возрастают при действующем тарифе на электроэнергию, при увеличении тарифа – сначала уменьшаются до определенного значения и потом начинают возрастать, при еще большем увеличении тарифа – уменьшаются (рис. 7).

Поскольку с ростом стоимости обмоточного провода уменьшается масса стали, в том числе и за счет уменьшения площади поперечного сечения стержней и ярм, то незначительно возрастают оптимальные потери холостого хода за счет увеличения удельной нагрузки на магнитную систему. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях стоимости обмоточного провода увеличивает оптимальное сечение стержней и ярм. Магнитная индукция при этом уменьшается, и снижаются потери холостого хода (рис. 8).

Оптимальные капитальные вложения и амортизационные отчисления увеличиваются с ростом стоимости обмоточного провода. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях стоимости обмоточного провода увеличивает величину капитальных вложений (рис. 9).

Характер изменения оптимальной стоимости потерь электроэнергии в трансформаторе за год также определяется соотношением цены обмоточного провода и тарифа на электроэнергию. С ростом цены обмоточного провода оптимальная стоимость потерь электроэнергии возрастает при действующем тарифе на электроэнергию, а при значительном увеличении тарифа – сначала уменьшается до определенного значения и потом начинает возрастать. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях цены обмоточного провода увеличивает стоимость потерь электроэнергии в трансформаторе.

Оптимальные совокупные дисконтированные затраты возрастают с ростом стоимости обмоточного провода. Увеличение тарифа на электроэнергию при неизменных значениях стоимости обмоточного провода также увеличивает совокупные дисконтированные затраты (рис. 10).

С целью выявления влияния типа и материала обмоточного провода на оптимальные параметры трансформатора произведены расчеты на ЭВМ с использованием разработанной программы для медного

и алюминиевого провода круглого и прямоугольного сечения. При расчете приняты существующие в настоящее время усредненные цены на обмоточный провод (медный – 36000 руб./кг, алюминиевый – 8100 руб./кг), электротехническую сталь (8400 руб./кг) и действующий тариф на электроэнергию для производственных сельскохозяйственных потребителей, равный 323 руб./(кВт·ч). В табл. 1 представлены результаты расчетов для трансформатора мощностью 10 кВА, напряжением 380/220 В.

**Таблица 1. Оптимальные параметры трансформатора типа ТС-10/0,38 со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом для различного типа обмоточного провода**

Параметры	Медный обмоточный провод		Алюминиевый обмоточный провод	
	круглого сечения	прямоугольного сечения	круглого сечения	прямоугольного сечения
$d$ , м	0,078	0,075	0,075	0,089
$l_c$ , м	0,210	0,200	0,200	0,210
$c$ , м	0,259	0,265	0,444	0,420
$\beta$	2,59	2,72	3,14	3,75
$G$ , кг	84	89	113	118
$G_{cm}$ , кг	44	40	56	78
$P_k$ , Вт	421	376	392	346
$P_x$ , Вт	43	50	68	45
$K$ , млн. руб.	3,580	3,747	1,463	1,704
$I_{пз}$ , млн. руб.	0,570	0,563	0,639	0,510
$I_A$ , млн. руб.	0,238	0,249	0,097	0,113
$СДЗ$ , млн. руб.	5,702	5,752	4,771	4,222

Из табл. 1 видно, что тип сечения обмоточного провода оказывает меньшее влияние на оптимальные конструктивные параметры трансформатора, чем материал.

Провод прямоугольного сечения позволяет более плотно укладывать обмотки, что должно уменьшить радиальные размеры обмоток, среднюю длину витка, расход обмоточного провода и расход электротехнической стали за счет уменьшения длины ярм. Однако при этом ухудшаются условия охлаждения обмоток, и требуется введение дополнительных каналов охлаждения, что увеличивает радиальные размеры обмоток и длину ярм магнитопровода. Одновременно для улучшения условий охлаждения обмоток возможно снижение плотности тока в обмотках для уменьшения мощности короткого замыкания и тепловых потерь, что увеличивает сечение и вес обмоточного провода. Радиальные размеры обмоток и длина ярм магнитопровода при этом могут не увеличиваться, а даже уменьшаться за счет уменьшения количества каналов охлаждения. Одновременное взаимодействие всех вышеперечисленных факторов позволило определить оптимальные параметры трансформатора с учетом сложившегося уровня стоимости применяемых материалов и тарифа на электроэнергию. При использова-

нии медного провода прямоугольного сечения по сравнению с проводом круглого сечения незначительно снижается диаметр  $d$  и высота стержня  $l$  магнитопровода, увеличивается расстояние между осями стержней  $c$  и соотношение основных размеров  $\beta$ , увеличивается расход обмоточного провода  $G$ , снижаются потери короткого замыкания  $P_k$ , незначительно снижается расход стали  $G_{ст}$  и несколько увеличиваются потери холостого хода  $P_x$ , незначительно снижается годовая стоимость потерь электроэнергии  $I_{пэ}$ , незначительно увеличиваются капиталовложения  $K$ , амортизационные отчисления  $I_A$  и совокупные дисконтированные затраты  $СДЗ$ . При использовании алюминиевого провода прямоугольного сечения по сравнению с проводом круглого сечения увеличивается диаметр  $d$  и высота стержня  $l_c$  магнитопровода, уменьшается расстояние между осями стержней  $c$ , увеличивается соотношение основных размеров  $\beta$ , увеличивается расход обмоточного провода  $G$ , снижаются потери короткого замыкания  $P_k$ , увеличивается расход стали  $G_{ст}$ , снижаются потери холостого хода  $P_x$ , снижается годовая стоимость потерь электроэнергии  $I_{пэ}$ , увеличиваются капиталовложения  $K$  и амортизационные отчисления  $I_A$ , а совокупные дисконтированные затраты  $СДЗ$  снижаются.

Влияние материала обмоточного провода на оптимальные параметры трансформатора довольно существенное.

Во-первых, алюминиевый обмоточный провод имеет большее активное сопротивление электрическому току по сравнению с медным. Для обеспечения оптимального уровня потерь короткого замыкания и теплового режима плотность тока в алюминиевом проводе должна быть меньше, чем в медном. Следовательно, применение алюминия по сравнению с медью увеличивает сечение и объем обмоточного провода, размеры обмоток и расход электротехнической стали за счет увеличения длины ярем.

Во-вторых, стоимость алюминиевого обмоточного провода более чем в четыре раза ниже стоимости медного обмоточного провода, что значительно снижает капитальные вложения в производство трансформатора. При этом составляющая стоимости потерь электроэнергии в совокупных дисконтированных затратах увеличивает свой вес. Становится целесообразным снижение потерь электроэнергии в трансформаторе за счет дальнейшего снижения плотности тока в обмотках и величины магнитной индукции. Соответственно увеличивается сечение и объем обмоточного провода, размеры обмоток, длина ярем, а также площадь поперечного сечения стержней и ярем магнитопровода, что дополнительно увеличивает расход электротехнической стали.

Одновременное взаимодействие указанных факторов при использовании алюминиевого обмоточного

провода по сравнению с медным приводит к увеличению оптимального расстояния между осями стержней  $c$ , увеличению оптимального соотношения основных размеров  $\beta$ , увеличению сечения и расхода обмоточного провода  $G$ , снижению оптимальных потерь короткого замыкания  $P_k$ , увеличению расхода стали  $G_{ст}$ , значительному уменьшению капиталовложений  $K$  и амортизационных отчислений  $I_A$ , а также совокупных дисконтированных затрат  $СДЗ$ .

### Выводы

1. Расчеты показали, что значения оптимальных конструктивных параметров трансформатора определяются соотношением стоимости обмоточного провода и тарифа на электроэнергию. При этом изменение нормативного срока службы и продолжительности работы трансформатора в году, а также стоимость электротехнической стали, практически не влияет на значения оптимальных конструктивных параметров.

2. С ростом стоимости обмоточного провода при действующем тарифе на электроэнергию снижается оптимальная масса обмоток и магнитопровода, а оптимальные значения потерь холостого хода и короткого замыкания возрастает. При этом увеличиваются совокупные дисконтированные затраты на трансформацию электроэнергии.

3. Использование алюминиевого обмоточного провода при изготовлении трансформатора по сравнению с медным приводит к увеличению материалоемкости обмоток и магнитопровода, но при этом снижаются капитальные вложения и совокупные дисконтированные затраты.

### ЛИТЕРАТУРА

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

2. 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.

3. Прищепов, М.А. Методика расчета конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / М.А. Прищепов, В. М. Збродыга, Г. И. Янукович // Агропанорама. – 2010. – №5. – С. 29-33.

4. Расчет трансформатора: свид-тво о регистрации компьютерной программы №242 / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, И.Г. Рутковский, Г. И. Янукович; заявитель БГАТУ. – № С20100122; заявл. 14. 10. 2010; дата регистр. 25. 10. 2010 // Реестр зарегистрированных компьютерных программ / Нац. центр інтелектуал. власнасці. – 2010.