

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК 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 расчета конструктивных параметров и технических характеристик трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом». На основании данной методики разработаны алгоритм и программа расчета характеристик трансформатора на ЭВМ при различных исходных параметрах. Произведен анализ их влияния на конструктивные параметры и технические характеристики трансформатора.*

*Ключевые слова: трансформатор, схема соединения обмоток, конструктивные параметры, технические характеристики.*

*Methodology for calculating the design parameters and technical characteristics of a transformer with a "star-double zigzag with a neutral wire" winding connection scheme is presented in the article. An algorithm and a program for computer-based calculating the characteristics of a transformer have been developed for various initial parameters on the basis of this methodology. An analysis of their influence on the design parameters and technical characteristics of the transformer has been carried out.*

*Keywords: transformer, winding connection diagram, design parameters, technical characteristics.*

### Введение

Трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» [1] имеет нулевую группу соединений обмоток, обеспечивает синусоидальность кривой тока нагрузки и напряжения и обладает хорошими симметрирующими свойствами [2-5]. При использовании трансформатора в качестве силового для питания сельскохозяйственных потребителей его целесообразно выполнить с масляным охлаждением, так как это уменьшает габариты и повышает надежность его работы.

Конструктивно трансформатор состоит из магнитной системы, системы обмоток с их изоляцией и системы охлаждения [6-11]. При работе трансформатора из-за потерь энергии в обмотках, магнитной системе и других элементах выделяется определенное количество теплоты. В масляных трансформаторах отвод теплоты от обмоток и магнитной системы осуществляется трансформаторным маслом, которое нагреваясь у поверхностей, отводит теплоту путем естественной конвекции и теплопроводности к стенкам бака трансформатора. Стенки бака трансформатора, омываемые воздухом, в свою очередь, отдают теплоту в окружающую среду конвекцией и излучением с внешней поверхности бака [12-19].

Загрузки магнитной и электрической систем должны находиться в пределах допустимых значений, которые установлены на основании имеющегося в стране и за рубежом опыта конструирования, изготовления и эксплуатации трансформаторов [6-11]. Завышенное значение параметров загрузки магнитной системы приводит к увеличению потерь холостого хода и перегреву магнитопровода, заниженное значение – к перерасходу обмоточных проводов и электротехнической стали. Завышенное значение параметров загрузки электрической системы приводит к увеличению потерь короткого замыкания и перегреву трансформатора, к увеличению напряжения короткого замыкания. Заниженное значение – к перерасходу проводникового материала и электротехнической стали.

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

### Основная часть

В основу разработанной методики расчета параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» положены такие свойства, как однозначность и результативность, заключающиеся в однозначной ее реали-

зации при изменении задаваемых параметров в определенных пределах. Это позволит использовать ее в дальнейшем при оптимизации технических (конструктивно-режимных) параметров трансформатора.

С учетом этого, авторами предлагается методика расчета технических (конструктивно-режимных) параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»:

1. Задаются исходные параметры рассчитываемого трансформатора: номинальная мощность  $S_n$ ; число фаз; частота тока  $f$ ; номинальное линейное напряжение первичной  $U_{1н}$  обмотки; номинальное линейное напряжение вторичной  $U_{2н}$  обмотки; способ охлаждения трансформатора; режим работы; материал и геометрический тип сечения обмоточных проводов; максимальная плотность тока первичной  $j_{1max}$  обмотки; максимальная плотность тока вторичной  $j_{2max}$  обмотки; рекомендуемое значение мощности  $P_{к.зад}$  короткого замыкания; рекомендуемое значение напряжения короткого замыкания  $u_{к.зад}$ ; марка стали магнитопровода; рекомендуемое значение магнитной индукции в стержнях магнитопровода  $B_{с.зад}$ ; рекомендуемое соотношение основных размеров трансформатора  $\beta_{зад}$ .

2. Производится расчет основных электрических параметров: номинального линейного тока первичной  $I_{1н}$  и вторичной  $I_{2н}$  обмоток, номинального фазного тока первичной  $I_{1ф}$  и вторичной  $I_{2ф}$  обмоток, номинального фазного напряжения первичной  $U_{1ф}$  и вторичной  $U_{2ф}$  обмоток, мощность одной фазы трансформатора  $S_{ф}$ , мощность на одном стержне  $S'$ , активную составляющую рекомендуемого значения напряжения короткого замыкания  $U_{а.зад}$ , реактивную составляющую рекомендуемого значения напряжения короткого замыкания  $U_{р.зад}$ .

3. В зависимости от класса напряжения обмоток производится выбор изоляции и изоляционных расстояний: между стержнем и вторичной обмоткой  $a_{01}$ , между основной частью вторичной обмотки и дополнительными частями вторичных полуобмоток  $a_{1'1''}$ ,  $a_{1''1''}$ , между вторичной и первичной обмоткой  $a_{12}$ , первичными обмотками разных фаз  $a_{22}$ , между ярмом и вторичной обмоткой  $l_{01}$ , между ярмом и первичной обмоткой  $l_{02}$ , толщины межслойной изоляции вторичной обмотки  $\delta_{из2}$ , толщины межслойной изоляции первичной обмотки  $\delta_{из1}$  (рис. 1).

4. Производится расчет размеров магнитной системы трансформатора: коэффициента заполнения стержня активной сталью  $K_c$ , предварительного значения приведенного канала рассеяния  $a'_p$  диаметра окружности, описанной вокруг стержня  $d$ , среднего диаметра канала между обмотками  $d'_{12}$ , предварительного значения средней высоты

обмоток  $l$ , высоты стержня  $l_c$ , размеров пакетов стали.

Если  $25kB \cdot A < S_n \leq 630kB \cdot A$ , то количество ступеней в поперечном сечении стержней принимается  $n_c=6$ , в сечении ярм –  $n_y=5$ ;

если  $16kB \cdot A < S_n \leq 25kB \cdot A$ , то количество ступеней в поперечном сечении стержней принимается  $n_c=5$ , в сечении ярм –  $n_y=4$ ;

если  $S_n = 16kB \cdot A$ , то количество ступеней в поперечном сечении стержней принимается  $n_c=4$ , в сечении ярм –  $n_y=3$ ;

если  $S_n < 16kB \cdot A$ , то количество ступеней в поперечном сечении стержней принимается  $n_c=3$ , в сечении ярм –  $n_y=2$ .

Затем определяется фактическая площадь поперечного сечения стержней  $P_{сф}$ , фактическая площадь

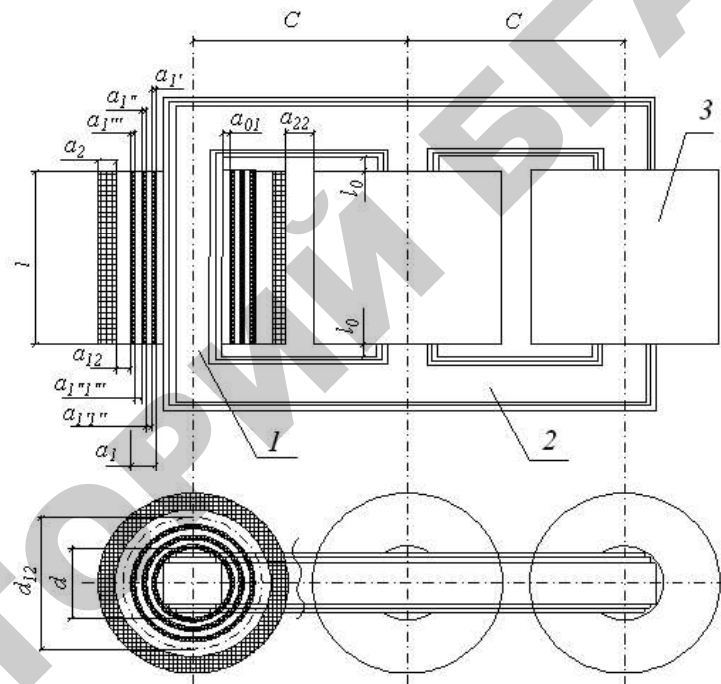


Рисунок 1. Основные размеры трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом»: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – обмотка;  $d$  – диаметр стержня магнитной системы, м;  $l$  – высота обмоток, м;  $d_{12}$  – диаметр осевого канала между первичными и вторичными обмотками, м;  $c$  – расстояние между осями стержней магнитопровода, м;  $a_1$  – суммарный радиальный размер вторичных обмоток, м;  $a_2$  – радиальный размер первичных обмоток, м;  $l_0$  – изоляционные расстояния между ярмами и обмотками, м;  $a_{01}$  – изоляционные расстояния между вторичной обмоткой и стержнем магнитопровода, м;  $a_{12}$  – изоляционные расстояния между первичной и вторичной обмоткой, м;  $a_{1'1''}$ ,  $a_{1''1''}$  – изоляционные расстояния между основной частью вторичной обмотки и дополнительными частями вторичных полуобмоток, м;  $a_{22}$  – изоляционные расстояния между первичными обмотками разных фаз, м;  $a_{1'}$ ,  $a_{1''}$ ,  $a_{1''}$  – радиальные размеры основной и дополнительных частей вторичных обмоток, м.

поперечного сечения ярм  $P_{яф}$ , активная площадь поперечного сечения стержней  $P_c$ , активная площадь поперечного сечения ярм  $P_я$ .

5. Производится расчет вторичной обмотки: ЭДС одного витка вторичной обмотки  $E_B$ , число витков во вторичной обмотке одной фазы  $W_2$ , напряжение одного витка  $U_B$ , уточняется действительная магнитная индукция в стержнях  $B_c$ , уточняется действительная магнитная индукция в ярмах  $B_я$ , расчетное сечение обмоточного провода  $F_2'$ . Принимают ближайшее стандартное сечение провода  $F_{2гост}$  (при необходимости, допускается увеличение количества параллельных сечений от одного до четырех), для провода круглого сечения определяют диаметр без изоляции  $d_2$  и диаметр с изоляцией  $d_2''$ , для провода прямоугольного сечения – радиальные размеры без изоляции  $a_{нн}$  и с изоляцией  $a_{нн}''$ , а также осевые размеры без изоляции  $b_{нн}$  и с изоляцией  $b_{нн}''$ . Определяется фактическая плотность тока  $j_2$ , расчетное число витков в одном слое вторичной обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $W_{2c}''$ , количество слоев вторичной обмотки  $n_2$ , действительное количество витков в одном слое  $W_{2c}$ , высота обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $l_2$ . Высота обмотки проверяется по условию размещимости на стержне, если условие не выполняется, то число слоев увеличивают на два и выполняют перерасчет осевого размера с последующей проверкой размещимости на стержне.

Затем рассчитывается радиальный размер вторичной обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $a_1$ , внутренний диаметр вторичной обмотки  $D_2'$ , наружный диаметр вторичной обмотки  $D_2''$ .

6. Производится расчет первичной обмотки: число витков в обмотке одной фазы первичной обмотки  $W_1$ , расчетное сечение обмоточного провода первичной обмотки  $F_1'$ . Принимают ближайшее стандартное сечение провода  $F_{1гост}$  (при необходимости допускается увеличение количества параллельных сечений от одного до четырех). Для провода круглого сечения определяют диаметр без изоляции  $d_1$  и диаметр с изоляцией  $d_1''$ , для провода прямоугольного сечения – радиальные размеры без изоляции  $a_{вн}$  и с изоляцией  $a_{вн}''$ , а также осевые размеры без изоляции  $b_{вн}$  и с изоляцией  $b_{вн}''$ .

Далее определяется фактическая плотность тока  $j_1$ , расчетное число витков в одном слое первичной обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $W_{1c}''$ , количество слоев первичной обмотки  $n_1$ . Полученное значение округляется до ближайшего целого числа, действительное количество витков в одном слое  $W_{1c}$ , высота первичной обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $l_1$ , высота первичной обмотки проверяется по условию размещимости на стержне.

Если условие не выполняется, то число слоев увеличивают на один и выполняют перерасчет осевого размера с последующей проверкой размещимости на стержне.

Определяется радиальный размер обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $a_2$ , внутренний диаметр обмотки  $D_1'$ , наружный диаметр обмотки  $D_1''$ , действительное расстояние между осями соседних стержней  $C$ , действительное значение диаметра канала между обмотками  $d_{12}$ , действительное соотношение основных размеров трансформатора  $\beta$ .

7. Выполняется расчет параметров короткого замыкания трансформатора, для чего определяются: средняя длина витка первичной обмотки  $D_{cp1}$ , средняя длина витка вторичной обмотки  $D_{cp2}$ , вес металла обмоточного провода первичной обмотки  $G_1$ , вес металла обмоточного провода вторичной обмотки  $G_2$ , основные потери в первичной  $P_{осн1}$  и вторичной  $P_{осн2}$  обмотке, средняя высота обмоток  $l_{cp}$ , коэффициент рассеяния  $\sigma$ , действительное значение коэффициента Роговского, коэффициент первичной обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $\beta_1$ , коэффициент вторичной обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $\beta_2$ , коэффициент добавочных потерь первичной обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $K_{д1}$ , коэффициент добавочных потерь вторичной обмотки для провода круглого или прямоугольного сечения  $K_{д2}$ , потери в стенках бака и других элементах конструкции  $P_б$ , потери мощности короткого замыкания трансформатора  $P_к$ . Затем рассчитывается размер приведенного канала рассеяния  $a_p$ , активная составляющая напряжения короткого замыкания  $U_{кв}$ , реактивная составляющая напряжения короткого замыкания  $U_{кр}$ , напряжения короткого замыкания трансформатора,  $U_k$ .

8. Производится расчет параметров холостого хода трансформатора, потерь мощности, тока холостого хода, а затем коэффициента полезного действия, предварительно рассчитав длину ярма  $l_я$ , вес стержней магнитопровода  $G_c$ , вес ярм магнитопровода  $G_я'$ , вес углов магнитной системы  $G_y$ , суммарный вес ярм и углов магнитной системы  $G_я$ , активная составляющая потерь холостого хода трансформатора  $P_x$ , намагничивающая мощность зазоров магнитопровода  $Q_з$ , намагничивающая мощность трансформатора  $Q_x$ , активная составляющая тока холостого хода  $I_{х.а}$ , реактивная составляющая тока холостого хода  $I_{х.р}$ , ток холостого хода трансформатора  $I_x$ , коэффициент полезного действия трансформатора  $\eta$ .

9. Выполняется проверочный тепловой расчет трансформатора: определяются поверхность охлаждения первичной обмотки  $P_{01}$ , поверхность охлаждения вторичной обмотки  $P_{02}$ , удельный тепловой поток с поверхности первичной обмотки  $q_1$ , удельный тепловой поток с поверхности вторичной обмотки  $q_2$ , внутренний перепад температуры первичной обмотки  $\theta_{01}$ , внутренний перепад температуры вторичной обмотки  $\theta_{02}$ , перепад температуры на поверхности первичной  $\theta_{0,м1}$  и вторичной  $\theta_{0,м2}$  обмоток, полный средний перепад температуры обмотки низкого напряжения

к маслу  $\theta_{0,м\text{ ср}2}$ , полный средний перепад температуры обмотки высокого напряжения к маслу  $\theta_{0,м\text{ ср}1}$ .

Проводится выбор основных размеров бака: ширина бака  $V_{\text{min}}$ , расстояние между осями соседних стержней  $C$ , длина бака  $A$ , высота активной части  $H_{\text{а.ч.}}$ , глубина бака  $H_{\text{б}}$ , периметр гладкого бака прямоугольного сечения в плане  $p_{\text{бп}}$ , периметр гладкого бака овального сечения в плане  $p_{\text{б}}$ .

Для гладкого бака (для масляных трансформаторов мощностью до 40 кВ·А) площадь боковой поверхности для гладкого бака прямоугольного сечения в плане  $P_{\text{бп}}$ , площадь боковой поверхности для гладкого бака овального сечения в плане  $P_{\text{б}}$ , общие площади поверхностей теплоотдачи конвекцией  $P_{\text{кп}}$  и излучением  $P_{\text{ил}}$  для гладкого бака прямоугольного сечения в плане, общие площади поверхностей теплоотдачи конвекцией  $P_{\text{к}}$  и излучением  $P_{\text{и}}$  для гладкого бака овального сечения в плане.

Для бака овального сечения в плане со стенками в виде волн для масляных трансформаторов мощностью 40...630 кВ·А площадь боковой поверхности излучения волнистой части стенки  $P_{\text{бп}}$ , развернутая длина волны  $l_{\text{в}}$ , шаг волны стенки  $t_{\text{в}}$ , число волн  $m$ , площадь конвективной поверхности волнистой части стенки бака  $P_{\text{кв}}$ , полная площадь поверхности излучения бака  $P_{\text{ил}}$ , полная площадь поверхности конвекции бака  $P_{\text{к}}$ .

Затем для всех типов баков определяется теплоотдача путем излучения со всей поверхности бака  $Q_{\text{ил}}$ , теплоотдача путем конвекции со всей поверхности бака  $Q_{\text{к}}$ , полная теплоотдача со всей поверхности бака  $Q$  [12-19].

Далее определяется превышение средней температуры стенки бака над температурой окружающего воздуха  $\theta_{\text{б.в.}}$ , среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой внутренней поверхности стенки бака  $\theta_{\text{м.в.}}$ , превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха  $\theta_{\text{м.в.в.}}$ . Полученное превышение температуры масла в верхних слоях в баке над температурой окружающего воздуха должно быть согласно ГОСТ 11677-85 [20] менее 60 °С.

Затем рассчитывается превышение средней температуры первичной  $\theta_{\text{о.в.1}}$  и вторичной  $\theta_{\text{о.в.2}}$  обмоток над температурой воздуха.

Если все три условия по температуре выполняются, то размер бака и выбранная изоляция обеспечивают допустимый нагрев трансформатора. Если расчетные температуры превышают допустимые, то необходимо увеличить размеры или изменить конструкцию бака и повторить его тепловой расчет.

Далее проводится определение массы масла  $G_{\text{м.б}}$ , для чего определяется объем прямоугольного  $V_{\text{бп}}$  или овального  $V_{\text{б}}$  бака, объем волнистой части бака  $V_{\text{бп}}$ , масса активной части  $G_{\text{а.ч.}}$ , объем активной части  $V_{\text{а.ч.}}$ , объем масла в прямоугольном  $V_{\text{м.б п}}$ , овальном или волнистом  $V_{\text{м.б в}}$  баке.

На основании вышеизложенной методики авторами разработана детальная блок-схема алгоритма и компьютерная программа расчета конструктивных параметров и технических характеристик трехфазного силового трансформатора со схемой соединения обмоток

«звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» на алгоритмическом языке программирования Pascal. Программа предназначена для расчета указанного трансформатора с масляным охлаждением. Она предусматривает расчет параметров трансформаторов различной мощности и напряжения с учетом выбора типа и материала применяемого обмоточного провода, марки и толщины пластин электротехнической стали магнитопровода, соотношения основных размеров в широком диапазоне значений плотности токов в обмотках и магнитной индукции в элементах магнитопровода. При расчете предусмотрена возможность использования медных и алюминиевых проводов круглого и прямоугольного сечения с максимальным числом параллельных сечений, равным четырем. В программе предусмотрен выбор сечения и габаритных размеров обмоточного провода первичной и вторичной обмотки из заложенного в нее массива стандартных значений. Программа позволяет определять основные конструктивные размеры активной части и бака трансформатора, расход обмоточного провода и электротехнической стали, производить расчет параметров холостого хода и короткого замыкания, а также проверочный тепловой расчет трансформатора.

При разработке новой серии трансформаторов необходимо получить их наиболее энергоэффективными и экономичными. Решение этой задачи для каждого типа трансформатора требует рассмотрения большого числа вариантов расчета, отличающихся соотношением основных размеров, а также параметрами холостого хода и короткого замыкания. Параметры холостого хода в значительной степени определяют заданной величиной магнитной индукции  $B$  в элементах магнитной системы, а параметры короткого замыкания – заданной величиной плотности тока в обмотках  $j$ . Соотношение основных размеров  $\beta$  оказывает значительное влияние не только на параметры трансформатора, но и определяет пропорции размеров трансформатора.

Для определения влияния соотношения основных размеров  $\beta$  на параметры трансформатора проведены расчеты трансформаторов различных мощностей. Расчеты выполнены на ЭВМ с использованием разработанной программы расчета в широком диапазоне изменения  $\beta$ . Проведены два варианта расчета: первый – при неизменном значении магнитной индукции в стержнях магнитопровода  $B_{\text{с}}=1,6$  Тл и различных значениях плотности тока в обмотках ( $j=1,0; 2,0; 3,0$  А/мм<sup>2</sup>); второй – при неизменном значении плотности тока в обмотках  $j=2,5$  А/мм<sup>2</sup> и различных значениях магнитной индукции в стержнях магнитопровода ( $B_{\text{с}}=1,4; 1,6; 1,8$  Тл). Результаты расчетов представлены в виде графиков для наиболее часто используемых в сельских сетях трансформаторов мощностью 100 кВ·А.

На рисунках 2-5 приведены зависимости веса стали и металла (алюминия) обмоточного провода, потерь и напряжения короткого замыкания, а также потерь и тока холостого хода от  $\beta$  для трансформатора типа ТМГ 100/10 со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом».

Аналогичные зависимости получены и для трансформаторов других мощностей.

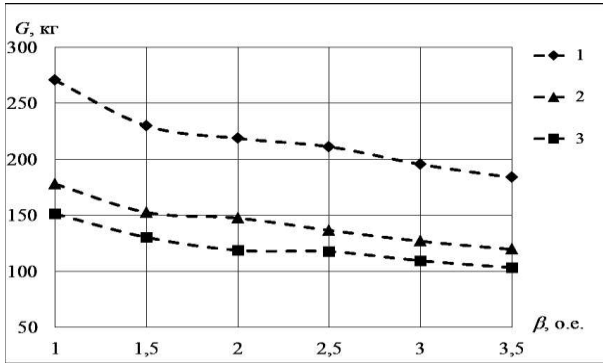


Рисунок 2. Зависимости веса металла обмоток  $G=f(\beta)$  при  $B_c=1,6$  Тл для трансформатора типа ТМГ-100/10:

1 –  $G$  при  $j = 1,0 \frac{A}{MM^2}$ ; 2 –  $G$  при  $j = 2,0 \frac{A}{MM^2}$ ;

3 –  $G$  при  $j = 3,0 \frac{A}{MM^2}$

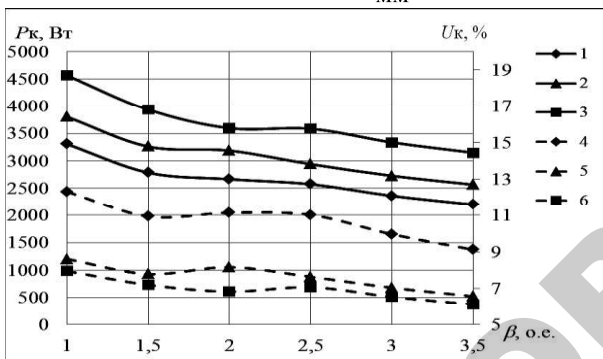


Рисунок 3. Зависимости потерь короткого замыкания  $P_k=f(\beta)$  и напряжения короткого замыкания  $U_k\%=f(\beta)$  при  $B_c=1,6$  Тл для трансформатора типа ТМГ-100/10:

1 –  $P_k$  при  $j = 1,0 \frac{A}{MM^2}$ ; 2 –  $P_k$  при  $j = 2,0 \frac{A}{MM^2}$ ;

3 –  $P_k$  при  $j = 3,0 \frac{A}{MM^2}$ ; 4 –  $U_k$  при  $j = 1,0 \frac{A}{MM^2}$ ;

5 –  $U_k$  при  $j = 2,0 \frac{A}{MM^2}$ ; 6 –  $U_k$  при  $j = 3,0 \frac{A}{MM^2}$

**Заключение**

1. Анализ результатов расчета показывает, что характер изменения конструктивных и энергетических параметров с изменением  $\beta$  одинаков для трансформаторов различной мощности.

2. С ростом  $\beta$  масса металла обмоток снижается. Увеличение плотности токов в обмотках при неизменных значениях  $\beta$  снижает массу обмоток, но при этом ухудшаются условия охлаждения обмоток. Увеличение магнитной индукции при неизменных значениях  $\beta$  незначительно снижает массу металла обмо-

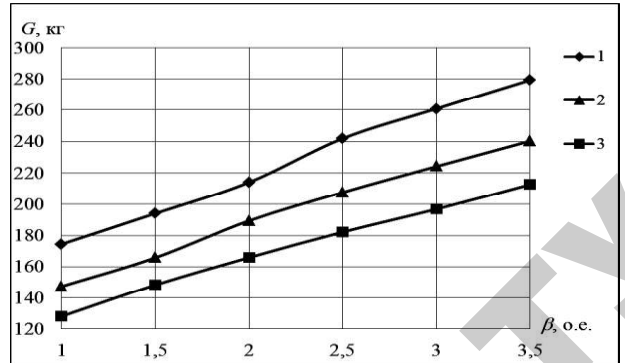


Рисунок 4. Зависимости веса стали магнитопровода  $G_{ст}=f(\beta)$  при  $j=2,5A/мм^2$  для трансформатора типа ТМГ-100/10:

1 –  $G_{ст}$  при  $B_c=1,4$ Тл; 2 –  $G_{ст}$  при  $B_c=1,6$ Тл; 3 –  $G_{ст}$  при  $B_c=1,8$ Тл

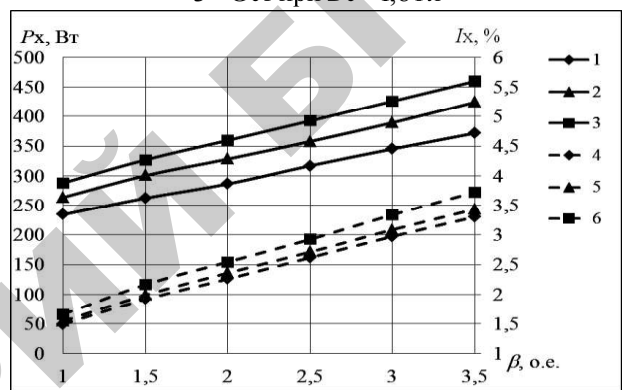


Рисунок 5. Зависимости потерь холостого хода  $P_x=f(\beta)$  и тока холостого хода  $I_x=f(\beta)$  при  $j=2,5A/мм^2$  для трансформатора типа ТМГ-100/10:

1 –  $P_x$  при  $B_c=1,4$ Тл; 2 –  $P_x$  при  $B_c=1,6$ Тл;

3 –  $P_x$  при  $B_c=1,8$ Тл; 4 –  $I_x$  при  $B_c=1,4$ Тл;

5 –  $I_x$  при  $B_c=1,6$ Тл; 6 –  $I_x$  при  $B_c=1,8$ Тл

ток за счет уменьшения диаметра стержней и соответственно средней длины витка. Использование для изготовления обмоток медного провода уменьшает объем металла обмоток из-за увеличения плотности тока, но масса провода значительно увеличивается, так как плотность меди выше алюминия.

3. Увеличение  $\beta$  ведет к снижению массы стали в стержнях, и к увеличению массы стали в ярмах и общей массы стали магнитопровода трансформатора. Увеличение магнитной индукции при неизменных значениях  $\beta$  снижает массу стали в стержнях, ярмах и общую массу стали. Увеличение плотности токов в обмотках при неизменных значениях  $\beta$  снижает массу стали в ярмах и общую массу стали. Использование медного провода для изготовления обмоток уменьшает массу стали в ярмах и общую массу стали незначительно.

4. Увеличение магнитной индукции при неизменных значениях  $\beta$  увеличивает потери и ток холостого хода за счет увеличения удельных потерь в стали и удельной намагничивающей мощности, хотя общая

масса стали при этом уменьшается. Так как с ростом  $\beta$  увеличивается масса стали, то возрастают потери и ток холостого хода. Увеличение плотности токов в обмотках при неизменных значениях  $\beta$  незначительно снижает потери холостого хода за счет снижения массы стали и незначительно снижает ток холостого хода. Применение медного провода для изготовления обмоток незначительно уменьшает потери и ток холостого хода по сравнению с алюминиевым.

5. Значения потерь короткого замыкания и напряжения короткого замыкания снижаются с возрастанием  $\beta$  практически пропорционально снижению массы металла обмоток. Увеличение плотности токов в обмотках при неизменных значениях  $\beta$  увеличивает потери и снижает напряжение короткого замыкания. С ростом потерь ухудшаются условия охлаждения обмоток. Увеличение магнитной индукции при неизменных значениях  $\beta$  незначительно снижает потери короткого замыкания из-за снижения массы металла обмоток за счет уменьшения диаметра стержней и соответственно средней длины витка, но поверхность охлаждения обмоток при этом снижается.

Применение медного провода для изготовления обмоток уменьшает потери и напряжение короткого замыкания по сравнению с алюминиевым проводом.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: патент ВУ 16008/А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга; заявитель Белор. гос. аграрн. технич. ун-т. – № а 20100121; заявл. 02.01.2010; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр 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. – Саратов: ГАУ, 2020. – С. 19-22.

6. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пос. / П.М. Тихомиров. – 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

7. Петров, Г.Н. Электрические машины / Г.Н. Петров. – М.: Энергия, 1974. – Ч. 1. – 240 с.

8. Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов/ С.Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.

9. Transformer design principles: with application to core-form transformers /Robert, M. Del Vecchio [et al.] // Gordon and Breach Science Publishers. – 2003. – 700 s.

10. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: МЭИ, 2006. – Т. 1. – 652 с.

11. Збродыга, В.М. Улучшение показателей несинусоидальности и несимметрии напряжений в электроустановках сельскохозяйственного назначения применением трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / В.М. Збродыга. – Минск, 2010. – 20 с.

12. Залесский, А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л.: Энергия, 1967. – 380 с.

13. Susa, D. Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers / D. Susa, M. Lehtonen, H. Nordman // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, iss. 1. – P. 197-204.

14. teNyenhuis, E.G. Calculation of core hot-spot temperature in power and distribution transformers / E.G. teNyenhuis, R.S. Girgis, G.F. Mechler, Gang Zhou // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, iss. 4. – P. 991-995.

15. Pierce, L.W. An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding / L.W. Pierce // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, iss. 3. – P. 1347-1358.

16. Hwang, M.D. Calculation of winding temperatures in distribution transformers subjected to harmonic currents / M.D. Hwang, W.M. Grady, H.W. Sanders // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1988. – Vol. 3, iss. 3. – P. 1074-1079.

17. Tanguy, A. Thermal performance of power transformers: thermal calculation tools focused on new operating requirements / A. Tanguy, J.P. Patelli, F. Devaux, J.P. Taishe, T. Ngnegueu // Presented at CIGRE Session, CIGRE, Paris, France – 2004. – Report Nr. A2-105. – 7 p.

18. Radakovic, Z. Numerical Determination of Characteristic Temperatures in Directly Loaded Power Oil Transformer / Z. Radakovic. // ETEP. – 2003. – Vol. 13, No. 1. – P. 1-8.

19. Eckholz, K. New developments in transformer cooling calculations / K. Eckholz, W. Knorr, M. Schäfer, K. Feser, E. Cardillo // Presented at CIGRE Session, CIGRE, Paris, France – 2004. – Report Nr. A2-107 – 8 p.

20. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: ГОСТ 11677-85; – взамен ГОСТ 11677-75. – Введ. 1986-07-01. – Минск: Госстандарт, 1992. – 44 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 22.10.2020