

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ 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 расчета конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом». На основании данной методики разработана программа его расчета на ЭВМ при различных исходных параметрах. Произведен анализ их влияния на конструктивные параметры и технические характеристики трансформатора.*

*The methodology of calculation of design factors of a transformer with a “star-delta with zigzag” scheme of windings connection is represented in the article. Based on this methodology the PC transformer calculation program using various metrics has been worked out. The influence of various metrics on the design factors and performance specification of a transformer has been analyzed.*

### Введение

В настоящее время в сельскохозяйственное производство и быт населения все больше внедряются новые, более мощные, однофазные и трехфазные потребители электроэнергии, оснащенные электронными регуляторами параметров, создающими нелинейный и импульсный характер нагрузки, существенно ухудшающий показатели качества электроэнергии. В итоге такие показатели как несимметрия и несинусоидальность напряжения часто не отвечают установленным требованиям. Поэтому проблема качества электроэнергии в электроустановках сельскохозяйственного назначения не утратила свою актуальность и становится всё более острой.

Несинусоидальность и несимметрия напряжений неблагоприятно воздействуют на энергосистему и электропотребителей, вызывая увеличение потерь напряжения и мощности в сетях и уменьшение их пропускной способности, нарушение нормальной работы электрооборудования и снижение его срока службы, а также снижение качества и количества выпускаемой продукции, уменьшение производительности труда [1, 2].

Существующие технические средства, предназначенные для снижения несинусоидальности и несимметрии напряжений в сетях промышленных предприятий, требуют значительных дополнительных капиталовложений и эксплуатационных издержек при их применении, что не всегда является приемлемым для протяжённых сетей 0,38 кВ сельскохозяйственного назначения с низкой удельной плотностью нагрузки, так как не всегда они обеспечивают ожидаемый эффект. Предложенный авторами публикации трансформатор [3] со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$  с зигза-

гом позволяет обеспечить более высокий уровень симметрии и синусоидальности напряжения в электроустановках 0,38 кВ сельскохозяйственного назначения, что подтверждают проведенные теоретические и экспериментальные исследования.

### Основная часть

Особенности конструктивного исполнения трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» определяются областью его применения. При использовании в электроустановках сельскохозяйственных потребителей в качестве преобразовательного трансформатора его рекомендуется выполнять с естественным воздушным охлаждением. Отсутствие в системе охлаждения масла, которое является горючим материалом, в значительной мере повышает пожарную безопасность. Применение в качестве твердой изоляции обмоток стекловолокна и кремний-органических материалов позволяет получить практически пожаробезопасную электроустановку, что дает возможность использовать сухой трансформатор в тех случаях, когда обеспечение пожарной безопасности является решающим обстоятельством.

В конструктивном отношении трансформатор состоит из магнитной системы и системы обмоток с их изоляцией.

Магнитная система состоит из отдельных частей – стержней и ярм. По схеме их взаимного расположения принят наиболее распространенный в практике трансформаторостроения плоский стержневой тип магнитной системы со ступенчатой формой поперечного сечения стержня, вписанной в окружность, и с обмотками в виде круговых цилиндров. Форма и размеры поперечного

сечения ярама равны форме и размерам стержней. Стержни и ярамы выполнены из изолированных пластин холоднокатанной текстурованной электротехнической стали (толщиной 0,35 мм), обладающей анизотропией магнитных свойств. Ступенчатое сечение стержня и ярама образуется сечениями пакетов пластин. Число ступеней равно числу пакетов. С целью снижения потерь и намагничивающей мощности из-за анизотропии магнитных свойств стали, применен косой стык пластин в углах магнитной системы. Для стяжки ярам применены прессующие балки, опрессовка стержней осуществляется после насадки обмоток путем расклинивания с внутренней обмоткой.

Система обмоток включает в себя первичные обмотки трех фаз, которые присоединяются к питающей сети системы электроснабжения, вторичные обмотки, к которым подключается нагрузка, а также главную и продольную изоляцию обмоток. Вторичные обмотки состоят из двух одинаковых половин, соединенных последовательно. Причём на каждом из стержней магнитопровода размещены половины вторичных обмоток двух разных фаз. Первичные и вторичные обмотки могут быть выполнены изолированным медным либо алюминиевым проводом круглого или прямоугольного сечения в виде цилиндров и расположены на стержнях концентрически относительно друг друга (вторичные обмотки – внутри, первичные – снаружи). Высоты обеих обмоток должны быть одинаковыми. По форме выполнения приняты круглые обмотки, являющиеся более простыми в конструктивном отношении и более прочными в механическом и электрическом отношении по сравнению с обмотками прямоугольной формы. Первичные фазные обмотки трансформатора соединены в звезду без нулевого провода, вторичные – в треугольник.

Обмотки изолированы одна от другой и от всех заземленных частей конструкции трансформатора – магнитной системы, деталей крепления, защитного кожуха. Эта изоляция является главной и создается путем сочетания изоляционных деталей, изготовленных из твердых диэлектриков, с воздушными изоляционными промежутками. Изоляция между различными точками одной обмотки является продольной и включает в себя изоляцию между витками, слоями обмотки, катушками.

Единая конструкция, включающая в собранном виде магнитопровод трансформатора, обмотки с изоляцией, а также все детали, служащие для механического соединения, представляют собой активную часть трансформатора. Она защищена от внешней среды кожухом.

В основу расчета трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом положена задача унификации его деталей, а также загрузки магнитной и электрической систем в пределах рациональных значений, которые установлены на основании имеющегося отечественного и зарубежного опыта конст-

руирования, изготовления и эксплуатации трансформаторов.

Авторами предложен следующий порядок расчета конструктивных параметров и технических характеристик трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом:

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

2. По известным выражениям [4] рассчитываются основные электрические величины: номинальные линейные токи первичной  $I_{1н}$  и вторичной  $I_{2н}$  обмоток, номинальные фазные токи первичной  $I_{1ф}$  и вторичной  $I_{2ф}$  обмоток, номинальные фазные напряжения первичной  $U_{1ф}$  и вторичной  $U_{2ф}$  обмоток, мощность одной фазы трансформатора  $S'_ф$  и мощность на одном стержне  $S'$ , активная  $U_{а.зад}$  и соответственно реактивная  $U_{р.зад}$  составляющие рекомендуемого значения напряжения короткого замыкания.

3. В зависимости от класса напряжения обмоток производится выбор изоляции и изоляционных расстояний: между стержнем и вторичной обмоткой  $a_{01}$ , между вторичной и первичной обмоткой  $a_{12}$ , первичными обмотками разных фаз  $a_{22}$ , между яром и вторичной обмоткой  $l_{01}$ , между яром и первичной обмоткой  $l_{02}$ , толщины межслойной изоляции вторичной обмотки  $\delta_{из2}$ , толщины межслойной изоляции первичной обмотки  $\delta_{из1}$ .

4. Производится расчет размеров магнитной системы трансформатора:

коэффициент заполнения стержня активной сталью  $K_c$ , предварительное значение приведенного канала рассеяния  $a'_p$ , диаметр описанной вокруг стержня окружности  $d$ , высоты обмоток  $l$  и высоты стержня  $l_c$ .

Если  $S_n < 10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ , то количество ступеней в поперечном сечении стержней принимается  $n_c = 3$ , в сечении ярем –  $n_y = 2$ ;

если  $10 \text{ кВ}\cdot\text{А} \leq S_n < 16 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ , то количество ступеней в поперечном сечении стержней принимается  $n_c = 4$ , в сечении ярем –  $n_y = 3$ ;

если  $16 \text{ кВ}\cdot\text{А} \leq S_n < 100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ , то количество ступеней в поперечном сечении стержней принимается  $n_c = 5$ , в сечении ярем –  $n_y = 4$ .

Определяется фактическая площадь поперечного сечения стержней.

5. По известным выражениям [5] производится расчет первичной и вторичной обмоток. При этом определяется число витков в обмотках  $W_1$  и  $W_2$ , индукция в стержнях  $B_c$  и ярмах  $B_y$  и сечение обмоточного провода  $F_1$  и  $F_2$ .

6. Производится расчет параметров короткого замыкания трансформатора.

Активная составляющая напряжения короткого замыкания определяется по формуле:

$$U_{ka} = \frac{P_k}{10S_n}, \quad (1)$$

где  $P_k$  – потери короткого замыкания трансформатора, Вт;

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

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_{kp} = \frac{7,9f \cdot S' a_p k_p}{10U_g^2}, \quad (2)$$

где  $f$  – частота тока, Гц;

$S'$  – мощность на одном стержне, кВ·А;

$a_p$  – размер приведенного канала рассеяния, м;

$k_p$  – коэффициент Роговского;

$U_g$  – напряжение одного витка обмотки трансформатора, В.

Напряжение короткого замыкания трансформатора

$$U_k = \sqrt{U_{ka}^2 + U_{kp}^2}. \quad (3)$$

7. Производится расчет параметров холостого хода трансформатора.

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{x.a} = \frac{P_x}{3U_{1\phi}}, \quad (4)$$

где  $P_x$  – активная составляющая потерь холостого хода, Вт;

$U_{1\phi}$  – номинальное фазное напряжение первичной обмотки, В.

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{x.p} = \frac{Q_x}{3U_{1\phi}}, \quad (5)$$

где  $Q_x$  – намагничивающая мощность трансформатора, В·Ар.

Ток холостого хода трансформатора

$$I_x = \sqrt{I_{x.a}^2 + I_{x.p}^2}. \quad (6)$$

8. Выполняется проверочный тепловой расчет трансформатора. При этом определяется поверхность охлаждения обмоток и удельный тепловой поток с их поверхности.

Если удельный тепловой поток превышает допустимые значения, вводятся дополнительные каналы охлаждения в обмотки и выполняется перерасчет трансформатора с последующей проверкой.

На основании вышеизложенной методики разработана программа расчета на ЭВМ конструктивных параметров и технических характеристик трехфазного силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» на алгоритмическом языке программирования Pascal. Программа предназначена для расчета указанного трансформатора с воздушным охлаждением. При расчете возможно использование медных и алюминиевых проводов круглого и прямоугольного сечения с максимальным числом параллельных сечений, равным четырем. Для обеспечения требуемого теплового режима предусмотрено введение дополнительных каналов охлаждения в обмотки трансформатора. Максимально возможное количество каналов охлаждения на единицу меньше количества слоев в обмотках.

При разработке новой серии необходимо получить наиболее экономичные трансформаторы. 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 определяются заданной величиной магнитной индукции  $B$  в элементах магнитной системы, а параметры короткого замыкания – заданной величиной плотности тока в обмотках  $j$ . Соотношение основных

размеров (диаметра и высоты обмотки)  $\beta$  оказывает значительное влияние не только на конструктивные параметры трансформатора, но и определяет его технические эксплуатационные характеристики.

Для определения влияния соотношения основных размеров  $\beta$  на расход активных материалов и некоторые другие параметры проведены расчеты параметров трансформаторов различных мощностей и различных вторичных напряжений. Расчеты выполнены на ЭВМ с использованием разработанной программы расчета в диапазоне изменения  $\beta$  от 1,0 до 4,0, так как выбор варьируемых величин следует производить с таким расчетом, чтобы они охватывали более широкую зону,

чем зона реальных решений. Проведены по два варианта расчета для трансформаторов с обмотками из медного провода круглого сечения: первый – при неизменном значении магнитной индукции в стержнях магнитопровода  $B_c=1,4$  Тл и различных значениях плотности тока в обмотках; второй – при неизменном значении плотности тока в обмотках  $j=2,5$  А/мм<sup>2</sup> и различных значениях магнитной индукции в стержнях магнитопровода. Результаты расчетов представлены в виде графиков для трех различных трансформаторов: мощностью 10 кВ·А и напряжением 380/220 В; мощностью 6,3 кВ·А и напряжением 380/380 В; мощностью 4,0 кВ·А и напряжением 380/36 В. На рис. 1 - 4 в качестве примера показана зависимость веса стали и

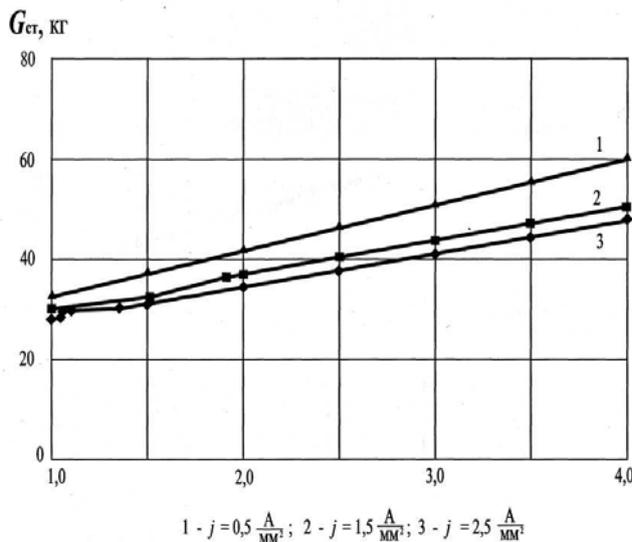


Рисунок 1. Зависимости веса стали магнитопровода  $G_{ст} = f(\beta)$  при  $B_c = 1,4 T_n$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками

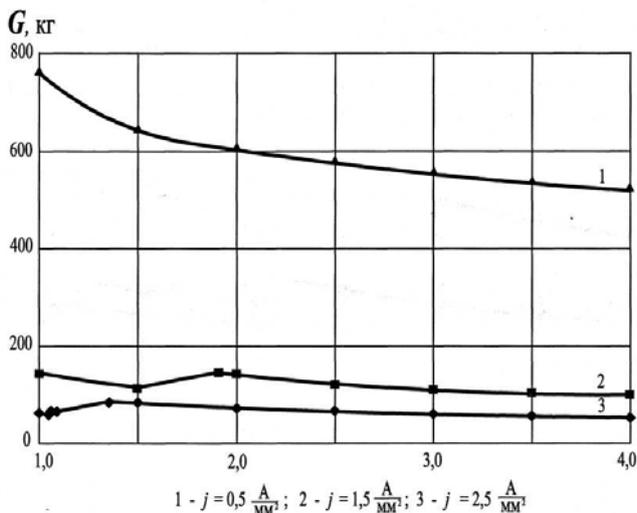


Рисунок 2. Зависимости веса меди обмоток  $G = f(\beta)$  при  $B_c = 1,4 T_n$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками

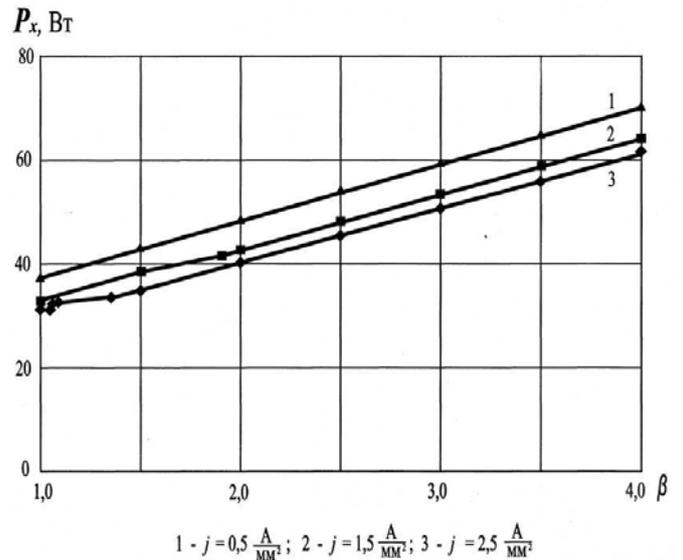


Рисунок 3. Зависимости  $P_x = f(\beta)$  при  $B_c = 1,4 T_n$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками

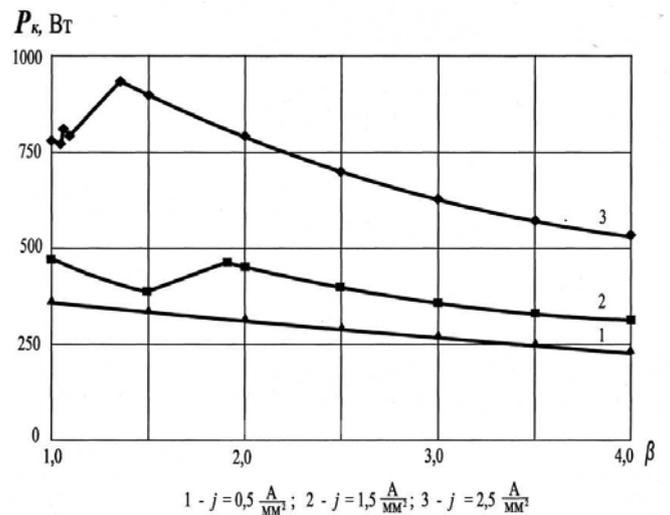


Рисунок 4. Зависимости  $P_k = f(\beta)$  при  $B_c = 1,4 T_n$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками

меди, а также потерь холостого хода и короткого замыкания от  $\beta$  для трансформатора типа ТС-10/0,38 с медными обмотками.

### Выводы

1. Результаты расчета показывают, что характер изменения параметров с изменением  $\beta$  одинаков для трансформаторов различной мощности, напряжения и практически не зависит от типа применяемого обмоточного провода.

2. С ростом  $\beta$  масса стали в стержнях снижается, а масса стали в ярмах и общая масса стали магнитопровода трансформатора увеличивается. Увеличение магнитной индукции при неизменных значениях  $\beta$  снижает массу стали в стержнях и ярмах, а также общую массу стали. Увеличение плотности токов в обмотках при неизменных значениях  $\beta$  снижает массу стали в ярмах и общую массу стали. Применение алюминиевого провода для изготовления обмоток незначительно увеличивает массу стали в ярмах и общую массу стали по сравнению с медным.

3. Масса металла обмоток снижается с ростом  $\beta$ . Увеличение плотности токов в обмотках при неизменных значениях  $\beta$  снижает массу обмоток, но при этом ухудшаются условия охлаждения обмоток, и возникает необходимость в дополнительных каналах охлаждения, которые, в свою очередь, увеличивают среднюю длину витка и массу обмоточного провода. Увеличение магнитной индукции при неизменных значениях  $\beta$  незначительно снижает массу металла обмоток за счет уменьшения диаметра стержней и соответственно средней длины витка. Но поверхность охлаждения обмоток при этом снижается, что требует дополнительных каналов охлаждения, которые, в свою очередь, увеличивают среднюю длину витка и массу обмоточного провода. Применение алюминиевого провода для изготовления обмоток увеличивает объем металла обмоток из-за уменьшения плотности тока, но масса провода значительно снижается по сравнению с медным проводом, плотность которого значительно выше, чем алюминиевого.

4. Поскольку с ростом  $\beta$  увеличивается масса стали, то возрастают потери и ток холостого хода. 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. Увеличение плотности токов в обмотках при неизменных значениях  $\beta$  незначительно снижает потери холостого хода за счет снижения массы стали и незначительно

увеличивает ток холостого хода. Применение алюминиевого провода для изготовления обмоток незначительно увеличивает потери и снижает ток холостого хода по сравнению с медным.

5. Потери короткого замыкания и напряжение короткого замыкания снижаются с ростом  $\beta$  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 и возникает необходимость в дополнительных каналах охлаждения, которые увеличивают среднюю длину витка, массу обмоточного провода, а, следовательно, – потери и напряжение короткого замыкания. 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, что требует дополнительных каналов охлаждения, которые, в свою очередь, увеличивают среднюю длину витка, массу обмоточного провода, а, следовательно, – потери и напряжение короткого замыкания. Применение алюминиевого провода для изготовления обмоток увеличивает потери и напряжение короткого замыкания по сравнению с медным проводом.

6. Значение  $\beta$  может варьироваться в широких пределах, зависит от заданных исходных параметров трансформатора и требуемых значений его технических характеристик.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий/ И.В. Жежеленко. – 5-е изд. – Москва: Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
2. Суднова, В.В. Качество электрической энергии/ В.В. Суднова. – Москва: Энергосервис, 2000. – 88 с.
3. Трёхфазный трансформатор: патент 2244 Респ. Беларусь, МКП 7 Н 01F 30/12 / А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Е.А. Сердешнов, Д.Г. Янукович; заявитель Белор. гос. аграрный технич. ун-т. – № 950299; заявл. 09. 06. 95; опубл. 30. 09. 98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – №3. – С. 216-217.
4. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособ./ П.М. Тихомиров. – 5-е изд. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
5. Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов/ С.Б. Васютинский. – Ленинград: Энергия, 1970. – 432 с.