

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНО-ДВУХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Пентегов И.В., д.т.н., проф., Рымар С.В., к.т.н., Лавренюк А.В.
Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины
ул. Боженко, 11, Киев-150, 03680, Украина
тел. +38(044) 227-23-88, E-mail: penteg@i.com.ua

Предложены новые конструкции трехфазно-двухфазных трансформаторов с улучшенными технико-экономическими характеристиками, позволяющие преобразовывать трехфазное напряжение в два напряжения, сдвинутых по фазе друг относительно друга. Трансформаторы могут использоваться в преобразовательной, сварочной и электрометаллургической технике.

Запропоновано нові конструкції трифазно-двофазних трансформаторів з поліпшеними техніко-економічними характеристиками, які дозволяють перетворювати трифазну напругу в дві напруги, зсунуті по фазі одна відносно одної. Трансформатори можуть застосовуватися в перетворюючій, зварювальній і електрометалургійній техніці.

ВСТУПЛЕНИЕ

При проектировании электрических установок, в ряде случаев возникает необходимость преобразования трехфазного питающего напряжения в два напряжения, сдвинутых по фазе друг относительно друга. Для осуществления такого преобразования применяются трехфазно-двухфазные трансформаторы.

Потребность в трансформаторах такого типа возникает в различных устройствах преобразовательной техники, в сварочных источниках питания, в печах электрошлакового переплава, в дуговых сталеплавильных печах и др.

Существует ряд трехфазно-двухфазных трансформаторов, которые из трехфазного питающего напряжения позволяют получать два напряжения, сдвинутые по фазе друг относительно друга. Такие трансформаторы можно разделить на три типа: 1) групповой трансформатор, состоящий из двух одинаковых однофазных трансформаторов (схема Скотта) [1, 2]; групповой трансформатор, состоящий из двух одинаковых однофазных трансформаторов, первичные обмотки которых соединены по схеме «открытый треугольник» [3]; 2) трансформаторы с обычными первичными обмотками и с традиционным трехфазным магнитопроводом, но с разными вторичными обмотками (трансформатор Кюблера, трансформатор АЕГ, трансформатор Леблана, трансформатор с двумя совмещенными обмотками [2]); 3) трансформатор с несимметричными первичными обмотками и с трехстержневым магнитопроводом, у которого средний стержень имеет в $\sqrt{2}$ раза большую площадь поперечного сечения, по сравнению с каждым из его крайних стержней (трансформатор Зонса [2]).

В этих трансформаторах применяются шихтованные и навитые разрезные многостержневые магнитопроводы традиционных однофазных или трехфазных конструкций [4]. Навитые разрезные многостержневые магнитопроводы предпочтительнее, так как они обладают меньшими потерями и массогабаритными показателями.

Существующие конструкции трехфазно-двухфазных трансформаторов имеют ряд недостатков. Так, в групповых трехфазно-двухфазных транс-

форматорах, наличие двух магнитных систем ведет к увеличению активных потерь и массогабаритных показателей, по сравнению с одной трехфазной системой, а в традиционной схеме Скотта, в необходимости изготовления двух разных однофазных трансформатора, что не технологично. Недостатком трансформаторов второго типа является наличие вторичных обмоток с различными параметрами для разных фаз. У третьей группы трансформаторов недостатком является наличие первичных обмоток с различными параметрами для разных фаз, а также неравенство поперечных сечений стержней магнитопровода. Все эти обстоятельства ограничивают применение существующих трехфазно-двухфазных трансформаторов.

Применение трехфазно-двухфазных трансформаторов в ряде случаев позволяет значительно упростить силовые электрические схемы оборудования и, следовательно, сделать их более надежными и дешевыми. Поэтому становится актуальной задача совершенствования конструкций таких трансформаторов. Шагом к решению этой задачи и является настоящая статья.

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработаны новые конструкции трехфазно-двухфазных трансформаторов [5, 6]. В этих трансформаторах используются многостержневые навитые разрезные магнитопроводы оригинальных конструкций. Особенности конструкций магнитопроводов позволяют разным образом размещать и подключать обмотки трехфазно-двухфазных трансформаторов.

На рис. 1 представлены три проекции новой конструкции первого рассматриваемого трехфазно-двухфазного трансформатора [5]. Магнитопровод трансформатора состоит из ленточного стержневого навитого разрезного магнитопровода, имеющего две одинаковые подковообразные части 1, и центрального стержня 2. Центральный стержень 2 размещен между торцами стержней двух подковообразных частей ленточного магнитопровода 1. Толщина центрального стержня равна ширине ленты стержневого магнитопровода, а ширина равна толщине навивки стержневого магнитопровода или больше ее. Центральный

стержень изготавливается либо в виде пакета, который набирается из прямоугольных пластин электро-технической стали, см. рис. 2,а, либо из О-образного навитого стержневого неразрезного магнитопровода с последующим приданием ему сплюсненной формы, см. рис. 2,б.

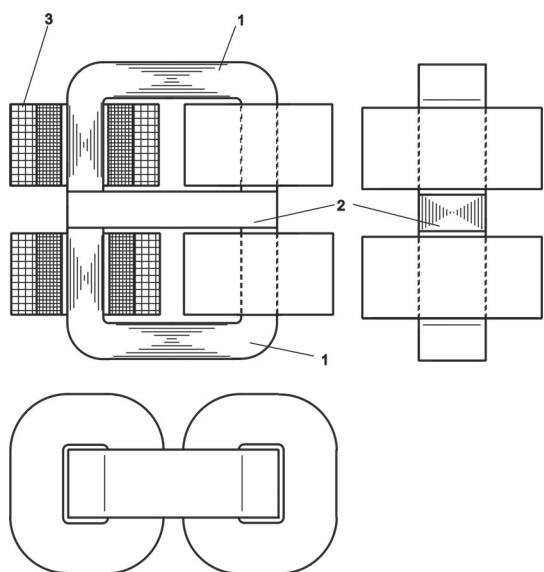


Рис. 1. Конструкция трехфазно-двухфазного трансформатора с четырьмя катушками

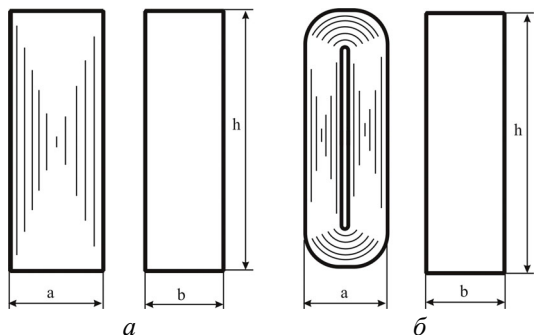


Рис. 2. Варианты изготовления центрального стержня

В области стыка, ленты стержней двух подково-образных частей ленточного стержневого магнитопровода перпендикулярны плоскостям прямоугольных пластин пакета магнитопровода либо лентам сплюсненного ленточного стержневого навитого неразрезного магнитопровода.

На рис. 3 – 5 представлены варианты схем соединений обмоток рассматриваемых трехфазно-двухфазных трансформаторов, на которых даны обозначения: $A, B, C, 0$ – соответственно клеммы к которым подключаются фазы и «ноль»; w_{11}, w_{12} – первичные обмотки трансформатора; w_{21}, w_{22} – вторичные обмотки трансформатора; $U_{\text{вых}1}, U_{\text{вых}2}$ – вторичные выходные напряжения.

Для рассмотренной конструкции трехфазно-двухфазного трансформатора [5], см. рис. 1, можно предложить три варианта соединения обмоток:

а) первичные обмотки соединены по схеме «открытый треугольник», а вторичные обмотки независимы. При этом на вторичной стороне получается два

напряжения, сдвинутых на 120 электрических градуса друг относительно друга, а ширина центрального стержня должна быть равна толщине навивки ленточного стержневого навитого разрезного магнитопровода, см. рис. 3;

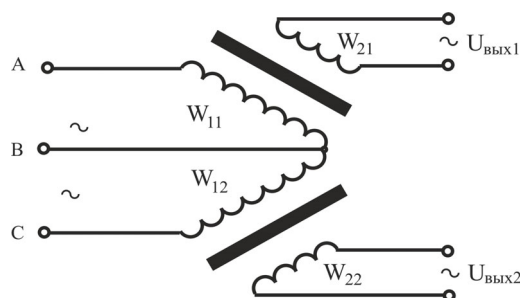


Рис. 3. Схема соединений обмоток трехфазно-двухфазного трансформатора

б) обмотки трансформатора соединены по схеме Скотта. В этом случае получаем два вторичных напряжения сдвинутых на 90 электрических градуса друг относительно друга, а центральный стержень должен быть в 1,15 или 1,25 раза больше толщины навивки ленточного стержневого навитого разрезного магнитопровода, соответственно см. рис. 4,а и 4,б. На рис. 4,б обмотка w_{12} подключена одним концом к середине обмотки w_{11} , а другим к фазе C . Необходимо отметить что, при равном количестве витков в первичных обмотках и таких подключениях вторичное напряжение $U_{\text{вых}1}$ будет больше $U_{\text{вых}2}$ соответственно в 1,15 и 1,25 раза;

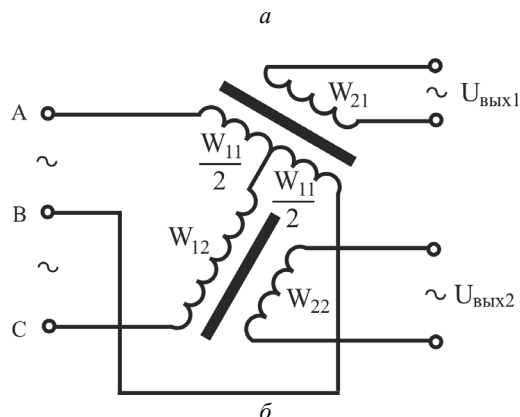
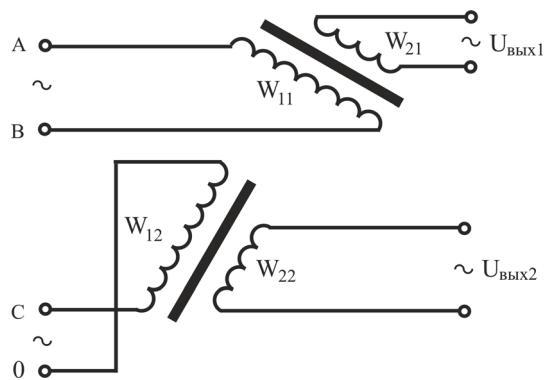


Рис. 4. Схемы соединений обмоток трехфазно-двухфазного трансформатора

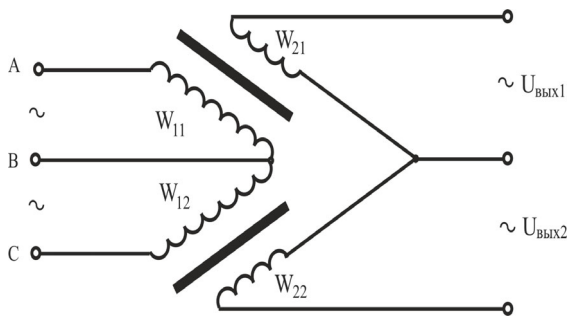


Рис. 5. Схема соединений обмоток трехфазно-двухфазного трансформатора

в) первичные и вторичные обмотки соединены по схеме «открытый треугольник». При этом на вторичной стороне получаем трехфазное напряжение, и трансформатор будет работать как обычный трехфазный, а ширина центрального стержня равна толщине навивки ленточного стержневого навитого разрезного магнитопровода, см. рис. 5.

Обмотки трехфазно-двухфазного трансформатора могут размещаться в четырех катушках 3, см. рис. 1, которые располагаются на стержнях ленточных стержневых навитых разрезных магнитопроводов, примыкающих к центральному стержню, либо в двух катушках 3, см. рис. 6, которые располагаются на участках ленточных стержневых навитых разрезных магнитопроводов, параллельных центральному стержню. Первый вариант размещения катушек с обмотками, см. рис. 1, более рационален, так как такое размещение обеспечивает улучшенные условия охлаждения, что дает возможность повысить плотность тока в проводниках обмоток и уменьшить поперечное сечение проводников, снизив массу обмоток трансформатора.

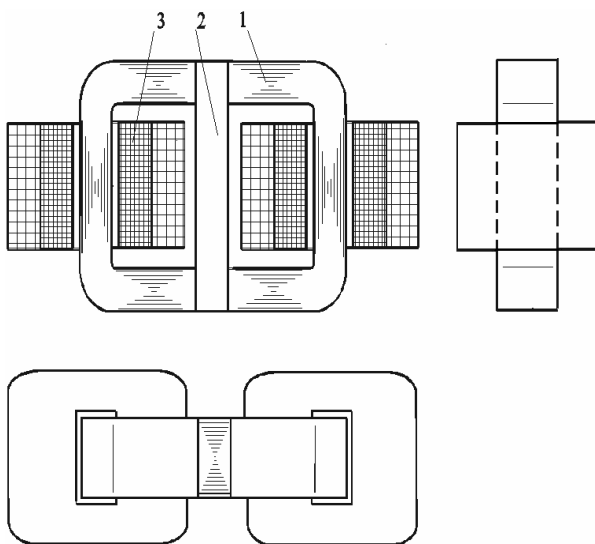


Рис. 6. Конструкция трехфазно-двухфазного трансформатора с двумя катушками

На рис. 7 представлены три проекции трехфазно-двухфазного трансформатора второй конструкции [6]. Магнитопровод такого трансформатора состоит из трех ленточных стержневых навитых разрезных маг-

нитопроводов, одного большого 1 и двух малых 2. Каждый из трех магнитопроводов состоит из двух одинаковых подковообразных частей. Большой стержневой магнитопровод 1 находится между двумя малыми магнитопроводами 2, которые имеют одинаковые геометрические размеры и наложены по контуру на большой магнитопровод с фронтальной и тыльной сторон. При этом крайние стержни большого и малых магнитопроводов совмещены и образуют крайние стержни многостержневого магнитопровода. Центральный стержень расщеплен.

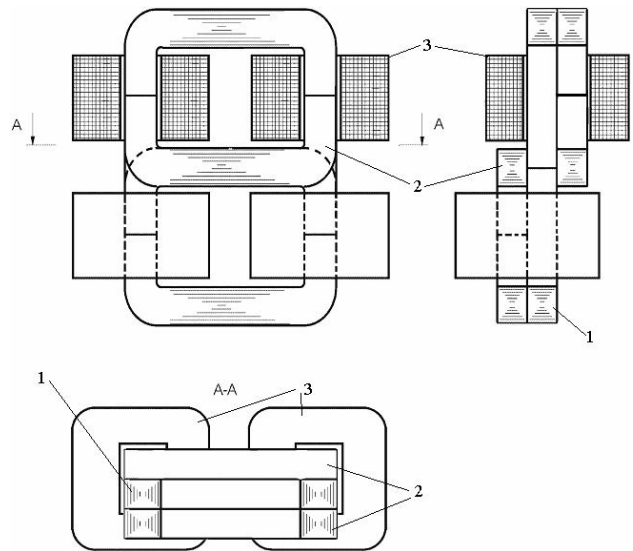


Рис. 7. Конструкция трехфазно-двухфазного трансформатора с четырьмя катушками

Существует два варианта соединения обмоток трехфазно-двухфазного трансформатора на рис. 7:

а) первичные обмотки соединены по схеме «открытый треугольник», а вторичные обмотки независимы. При этом на вторичной стороне получается два напряжения, сдвинутых на 120 электрических градуса друг относительно друга, см. рис. 3;

б) первичные и вторичные обмотки соединены по схеме «открытый треугольник». В этом случае на вторичной стороне получаем трехфазное напряжение, и трансформатор работает как обычный трехфазный трансформатор, см. рис. 5.

Обмотки трехфазно-двухфазного трансформатора могут размещаться в четырех катушках 3, см. рис. 7, которые располагаются на участках ленточных стержневых навитых разрезных магнитопроводов, перпендикулярных центральному стержню, или размещаться в двух катушках 3, расположенных на участках ленточных стержневых навитых разрезных магнитопроводов, параллельных центральному стержню [6], см. рис. 8. Для улучшения технологичности сборки и ремонта, в первом случае три магнитопровода разрезаются в плоскости параллельной центральному стержню, а во втором случае разрезают симметрично по середине стержней в плоскости перпендикулярной центральному стержню. Первый вариант размещения катушек с обмотками, см. рис. 7, более рационален, так как он обеспечивает улучшенные условия охлаж-

дения катушек, что дает возможность повысить плотности тока в проводниках обмоток и уменьшить их поперечное сечение, а соответственно и массу обмоток трансформатора.

Использование магнитоэлектрической пасты или компаунда [7] в зоне соприкосновения частей магнитопроводов позволяет улучшить условия перехода магнитного потока из одних частей магнитопровода в другие и уменьшить ток холостого хода трансформатора. Причем, чем больше площадь поверхности соприкосновения частей магнитопровода, тем будет меньше ток холостого хода. С этой точки зрения конструкции на рис. 7 и 8 имеют преимущество перед конструкциями на рис. 1 и 6 соответственно.

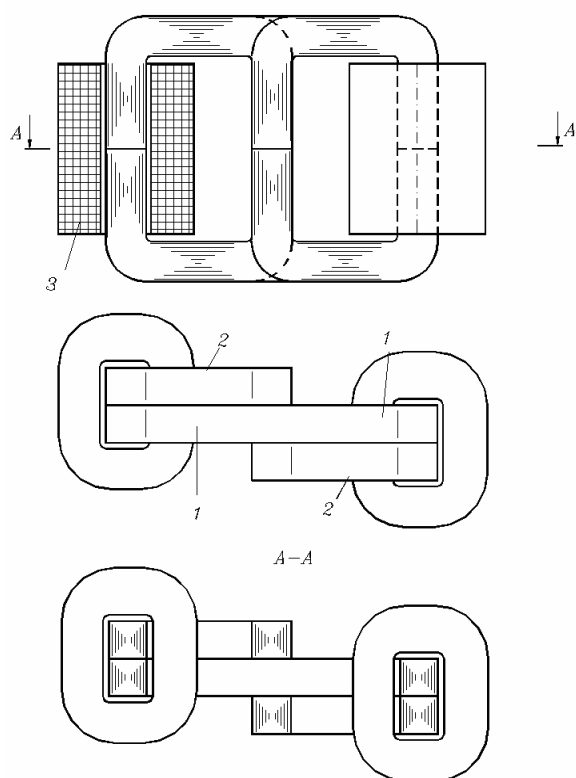


Рис. 8. Конструкция трехфазно-двухфазного трансформатора с двумя катушками

Использование рассмотренных конструкций магнитопроводов дает технологичность изготовления и простоту сборки трехфазно-двухфазных трансформаторов, а также возможность увеличения магнитной индукции в магнитопроводе до 1,65...1,75 Тл, что ведет к уменьшению поперечного сечения стержней и ярем многостержневого магнитопровода и к уменьшению его массы.

При сравнении массогабаритных и экономических показателей известных конструкций трехфазно-двухфазных трансформаторов и предлагаемых новых конструкций трансформаторов, можно установить, что новые конструкции превосходят известные конструкции. Это связано с тем, что в новых конструкциях трансформаторов можно выбирать повышенное значение магнитной индукции в магнитопроводе, а в конструкциях на рис. 1 и 7, можно брать повышенное

значение плотности тока в обмотках (за счет улучшенного условия охлаждения обмоток). Все это позволяет снизить массу трансформаторов. Так же новые конструкции трансформаторов более технологичны в изготовлении и сборке.

Однако надо отметить, что в предлагаемых трехфазно-двухфазных трансформаторах есть один недостаток, который нельзя не учитывать. В таких трансформаторах фазы нагружены неодинаково. Поэтому их применение рационально при малых мощностях нагрузок, когда влияние на сеть будет незначительным. При больших мощностях несимметричность потребления энергии из питающей сети должно выравниваться за счет симметричного распределения потребителей по фазам питающей сети.

Сравним основные параметры трехфазно-двухфазных трансформаторов новых конструкций на рис. 1 и 7 с самым распространенным традиционным трехфазным трансформатором, имеющим шихтованный магнитопровод, поскольку этот трансформатор имеет лучшие массогабаритные показатели по сравнению с известными конструкциями трехфазно-двухфазных трансформаторов. Для такого сравнения разработаны упрощенные оптимизационные математические модели трансформаторов, в которых произведено полное разделение зависимых и независимых переменных [8].

Рассматриваемые трансформаторы работают от промышленной сети с синусоидальным напряжением. Катушки с обмотками имеют близкие значения расчетных температур. Обмотки трансформаторов выполнены из медного проводника. Эффектом вытеснения тока к поверхности проводников обмоток пренебрежем. При оптимизации рассматриваются только активные материалы трансформаторов – электротехническая сталь магнитопровода и медь проводников его обмоток. Конструкционные элементы, а также кожух в оптимизационных математических моделях не учитываются.

Значение магнитной индукции в магнитопроводе трехфазного трансформатора с шихтованным магнитопроводом принимаем равным 1,63 Тл, в ленточных стержневых магнитопроводах трехфазно-двухфазных трансформаторов – 1,75 Тл. При этом потери в магнитопроводах трехфазно-двухфазных трансформаторов получались меньше, чем потери в шихтованном магнитопроводе трехфазного трансформатора традиционной конструкции. Но это не вносило существенной погрешности в результаты сравнения. Расчеты потерь в магнитопроводе проводились по методике из работы [9].

Исследования показали, что в трехфазно-двухфазных трансформаторах на рис. 1 и 7 можно увеличить плотность тока в проводниках обмоток в 1,17...1,28 раза, в зависимости от мощности трансформатора. Значения плотности тока в проводниках обмоток рассматриваемых трансформаторов были определены из условий равенства температур их обмоток. Для определения температур обмоток использовалась методика из работы [10].

На рис. 9 показана область значений отношения допустимой плотности тока в трансформаторах, в ко-

торых обмотки размещаются в четырех катушках, то есть у которых поверхность охлаждения увеличена вдвое, к плотности тока в трансформаторах с обычной поверхностью охлаждения обмоток, в зависимости от их мощности.

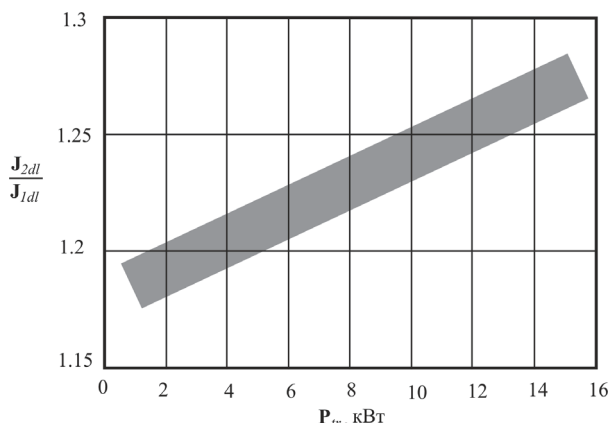


Рис. 9. Область значений отношения плотности тока J_{dl2} в трансформаторах с увеличенной поверхностью охлаждения катушек в два раза, к плотности тока J_{dl1} в трансформаторах с обычной поверхностью охлаждения обмоток, в зависимости от мощности трансформаторов P_{tr}

Рассмотрим оптимизационные математические модели трансформаторов. Будем использовать следующие обозначения: a , b – соответственно толщина и ширина стержня и ярма магнитопровода; $h_{ок}$, $l_{ок}$ – соответственно высота и ширина окна магнитопровода; l_k – расстояние между боковыми поверхностями катушек в окне магнитопровода; h_s – суммарная длина выступающих из катушек частей стержня магнитопровода для одной фазы.

Запишем уравнения для наиболее часто применяемых критериев оптимизации трансформаторов – массы и стоимости их активных материалов. В качестве базового уравнения будем использовать уравнение по определению массы активных материалов трансформатора.

Масса активных материалов трансформатора M определяется как сумма масс активных материалов магнитопровода M_c и обмоток M_o :

$$M = M_c + M_o. \quad (1)$$

Стоимость активных материалов трансформатора C равна сумме стоимостей активных материалов магнитопровода C_c и обмоток C_o :

$$C = C_c + C_o = c_c M_c + c_o M_o = c_c \left(M_c + \frac{c_o}{c_c} M_o \right), \quad (2)$$

где c_c , c_o – соответственно стоимости 1 кг активного материала магнитопровода и проводника обмоток, у.е./кг (здесь у.е. – условная денежная единица).

Если в уравнении (2) перенести в левую часть множитель перед скобками, получив в левой части уравнения выражение C/c_c , которое обозначить переменной F , а соотношение в правой части уравнения c_o/c_c обозначить коэффициентом k_g , то уравнения (1) и (2) могут быть записаны в виде обобщающего уравнения [11]:

$$F(k_g) = M_c + k_g M_o. \quad (3)$$

Уравнение (3) принимается в качестве оптимизационной функции трансформатора, у которой k_g – обобщенный весовой коэффициент, задающий соотношение между массами M_c и M_o . Данную функцию можно оптимизировать при различных значениях коэффициента k_g , получая различные расчетные варианты трансформаторов, удовлетворяющие в разной мере одному или другому критерию оптимизации [11].

Анализируя уравнения (1)-(3) можно заключить, что обобщенный весовой коэффициент k_g может принимать значения в интервале между $k_g = 1$ – при расчете трансформатора на минимум массы активных материалов и $k_g = c_o/c_c$ – при расчете трансформатора на минимум стоимости активных материалов. Можно показать [11], что при двухкритериальной оптимизации наилучший результат можно получить при коэффициенте k_g , равном среднегеометрическому значению от крайних значений: $k_g = \sqrt{1 \cdot c_o/c_c}$.

Для получения формул по определению соотношения параметров оптимизационных математических моделей рассматриваемых трансформаторов, воспользуемся методикой расчета трехфазного трансформатора, приведенной в работе [11].

Запишем уравнения, которые связывают электромагнитные и геометрические параметры трансформатора, относящиеся к одной фазе:

$$S_c = k_c ab = \frac{\sqrt{2} U_1}{\omega w_1 B_m}; \quad (4)$$

$$S_o = \frac{k_{ок} h_{ок} l_{ок}}{2} = w_1 \left(\frac{I_{1dl}}{J_{1dl}} + \frac{I_{2dl}}{k_{tr} J_{2dl}} \right), \quad (5)$$

где S_c – активное поперечное сечение стержня и ярма магнитопровода; k_c – коэффициент заполнения пакета магнитопровода пластинами электротехнической стали [4, 12]; U_1 – действующее значение фазного напряжения на первичной обмотке трансформатора; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота напряжения питающей сети; f – частота питающей сети; w_1 – количество витков первичной обмотки на фазу; B_m – расчетное амплитудное значение магнитной индукции в магнитопроводе [13]; S_o – активное поперечное сечение материала проводника обмоток фазы в половине окна магнитопровода; $k_{ок}$ – коэффициент заполнения окна магнитопровода проводниковым материалом [11]; I_{1dl} , I_{2dl} и J_{1dl} , J_{2dl} – соответственно длительные действующие фазные значения тока и плотности тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора; k_{tr} – коэффициент трансформации, $k_{tr} = U_1/U_2$; U_2 – действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Коэффициент заполнения окна магнитопровода проводниковым материалом можно определить из выражения:

$$k_{ок} = k_o k_k k_s. \quad (6)$$

Здесь k_o – усредненный коэффициент заполнения первичной и вторичной обмоток проводниковым материалом, учитывающий изоляцию и разбухание обмоток; k_k – коэффициент, учитывающий расстояние между боковыми поверхностями обмоток двух фаз в окне магнитопровода, $k_k = 1 - l_k/l_{ок}$; k_s – коэффициент,

учитывающий наличие выступающих из обмоток частей стержня магнитопровода, $k_s = 1 - h_g/h_{ок}$.

Продолжительность включения трансформатора составляет 100 %, поэтому длительные действующие значения фазных токов I_{1dl} и I_{2dl} равны соответственно действующим значениям фазных токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора I_1 и I_2 .

Действующее значение фазного тока в первичной обмотке трансформатора I_1 определяется с некоторым избытком из выражения: $I_1 = I_2/k_{tr} + I_0$, где I_0 – действующее значение тока холостого хода трансформатора, уточняющееся в процессе оптимизации. Значение тока I_0 может быть рассчитано по методике работы [13]. Действующее значение фазного тока во вторичной обмотке трансформатора I_2 равно $I_2 = P_2/(3U_2)$ – для трехфазного трансформатора; $I_2 = P_2/(2U_2)$ – для трехфазно-двухфазного трансформатора, где P_2 – расчетная мощность трансформатора на вторичной стороне.

Уравнения для расчета массы магнитопровода M_c и массы обмоток трансформатора M_o , с учетом выражений (4) и (5), будут иметь вид:

$$M_c = \gamma_c S_c l_c; \quad (7)$$

$$M_o = k_1 \gamma_o S_o l_o, \quad (8)$$

где k_1 – количество обмоток (для трехфазного трансформатора $k_1 = 3$; для трехфазно-двухфазных трансформатора $k_1 = 2$); γ_c, γ_o – соответственно удельные плотности электротехнической стали [13] и активного материала проводника обмоток [4, 12]; l_c, l_o – соответственно средние длины магнитной силовой линии магнитопровода и проводника обмотки одной фазы. Эти параметры зависят от особенностей конструкции трансформаторов и могут принимать следующие значения:

– для традиционной конструкции трансформатора с шихтованным магнитопроводом:

$$l_c = 3h_{st} + 4l_{ок} + 6b; \quad (9)$$

$$l_o = 2a + 2b + k_k \frac{\pi}{2} l_{ок}; \quad (10)$$

– для конструкции трехфазно-двухфазного трансформатора на рис. 1:

$$l_c = 4h_{st} + 3l_{ок} + (\pi + 2)b; \quad (11)$$

$$l_o = 2a + 2b + k_k \frac{\pi}{2} l_{ок}; \quad (12)$$

– для конструкции трехфазно-двухфазного трансформатора на рис. 7:

$$l_c = 4h_{st} + 3l_{ок} + \frac{(3\pi + 2)}{2} b; \quad (13)$$

$$l_o = 2a + 2b + k_k \frac{\pi}{2} l_{ок}. \quad (14)$$

Если проанализировать уравнения (4)-(14), то можно заключить, что независимыми переменными в оптимизационной функции (3), в которую входят соответствующие конструкциям трансформатора уравнения (4)-(14), являются переменные w_1, b и $l_{ок}$. Все остальные величины либо задаются, либо зависят.

Оптимальные (минимальные) значения оптимизационной функции (3) могут находиться при помощи численных методов оптимизации. Уравнение (3) лег-

ко оптимизируется при помощи метода Гаусса-Зейделя (метода покоординатного спуска) [8] при заданных начальных значениях переменных w_1, b и $l_{ок}$.

Массы активных материалов магнитопровода и обмоток трансформатора рассчитываются по формулам (7) и (8), причем массы, как и большинство параметров в оптимизационной модели трансформатора зависят от обобщенного весового коэффициента k_g . В связи с этим, перепишем уравнения (1) и (2) для определения массы и стоимости активных материалов трансформатора в виде функций, зависящих от коэффициента k_g , рассматривая данный коэффициент как непрерывно изменяющийся параметр:

$$M(k_g) = M_c(k_g) + M_o(k_g); \quad (15)$$

$$C(k_g) = C_c(k_g) + C_o(k_g) = c_c M_c(k_g) + c_o M_o(k_g). \quad (16)$$

Таким образом, для получения расчетного варианта трансформатора необходимо проводить оптимизацию функции $F(k_g)$ при конкретном значении обобщенного весового коэффициента k_g , после чего рассчитывать все параметры оптимизационной модели и определять значения выбранных критериев оптимизации по формулам (15) или (16) при том же конкретном значении коэффициента k_g .

Полученная оптимизационная математическая модель трансформатора позволяет однозначно находить оптимальное решение, как при однокритериальной, так и при многокритериальной оптимизации с помощью обобщенного весового коэффициента k_g . Проведенные исследования показали, что полученные оптимизационные математические модели трансформаторов имеет один экстремум для каждого критерия оптимизации и не имеет овражной структуры.

Введение обобщенного весового коэффициента k_g в разработанную оптимизационную математическую модель трансформаторов позволяет находить наиболее приемлемый расчетный вариант трансформатора при его многокритериальной оптимизации в случае равноправности выбранных критериев оптимизации [11].

Для выбора наиболее приемлемого варианта трансформатора при его многокритериальной оптимизации в полученной математической модели необходимо определить границы изменения значений обобщенного весового коэффициента k_g , ограничивающие область Парето (область значений критериев оптимизации в которой невозможно одновременное их улучшение). Границы области Парето однозначно определяются значениями коэффициента k_g , при которых критерии оптимизации принимают минимальные значения. Область Парето в рассматриваемом случае находится между наименьшим и наибольшим значением коэффициента k_g .

Оптимизируем трансформаторы по массе и стоимости их активных материалов. Значения обобщенного весового коэффициента k_g в этом случае изменяются непрерывно в диапазоне $1 \dots c_o/c_c$, ограничивающем область Парето. Стоимости 1 кг ЭТС и 1 кг меди проводника обмоток можно принять равными соответственно $c_c = 1,8$ у.е./кг и $c_o = 4,5$ у.е./кг, при этом отношение $c_o/c_c = 2,5$. Таким образом, область

Парето в рассматриваемом случае будет лежать в диапазоне $k_g = 1...2,5$.

В результате расчетов найдены оптимальные варианты исследуемых конструкций трехфазно-двухфазных трансформаторов, см. рис. 1 и 7, которые сравнивались с оптимальным вариантом трансформатора традиционной конструкции с шихтованным магнитопроводом.

Установлено, что отношение масс и стоимостей исследуемых трансформаторов к соответственно массе и стоимости традиционного трансформатора с шихтованным магнитопроводом практически не зависит от значения коэффициента k_g . То есть отношение масс трансформаторов при $k_g = 1$ почти не изменяется во всем диапазоне $k_g = 1...2,5$.

Для рассматриваемых вариантов трехфазно-двухфазных трансформаторов, отношение их масс к массе традиционного трансформатора с шихтованным магнитопроводом, при расчете трансформатора на минимум массы активных материалов ($k_g = 1$), составляет: для трансформатора на рис. 1 – 0,7144; для трансформатора на рис. 4 – 0,7125. Аналогичные значения получаются и при расчете трансформаторов на минимум стоимости ($k_g = 2,5$).

При одинаковых мощностях, трехфазно-двухфазные трансформаторы на рис. 1 и 7 легче и дешевле традиционного трансформатора с шихтованным магнитопроводом приблизительно на 28 %. Это говорит о возможности существенной экономии активных материалов при использовании таких трансформаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные новые конструкции трехфазно-двухфазных трансформаторов могут найти применение в устройствах преобразовательной, сварочной и электрометаллургической технике.

Новые конструкции трехфазно-двухфазных трансформаторов технологичны в изготовлении и сборке. Все катушки с обмотками имеют одинаковые параметры, а многостержневой магнитопровод собран из навитых разрезных магнитопроводов, что значительно упрощает сборку и ремонт трансформаторов.

Благодаря применению новых конструкций магнитопроводов, возможно повышение значения магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора до 1,65...1,75 Тл, а также повышение плотности тока в проводниках обмоток. В связи с этим новые конструкции трехфазно-двухфазных трансформаторов выгодно отличаются от существующих трехфазно-двухфазных трансформаторов по массогабаритным и стоимостным показателям.

При проведении сравнения массогабаритных и стоимостных показателей новых конструкций трехфазно-двухфазных трансформаторов с традиционным трехфазным трансформатором с шихтованным магнитопроводом установлено, что новые конструкции на 28 % легче и дешевле. Это позволяет существенно экономить активные материалы, применяя новые конструкции трансформаторов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вексклер Г.С., Тетельбаум Я.И. Электропитание радио-устройств.– К.: Техника, 1966.– 383 с.
- [2] Бамдас А.М., Кулинич В.А., Шапиро С.В. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз.– М-Л.: Госэнергоиздат, 1961.– 208 с.
- [3] Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов.– Л.: Энергия, 1970.– 432 с.
- [4] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов.– М.: Энергоатомиздат, 1986.– 528 с.
- [5] Заявка на Декл. України. Трифазно-двофазний трансформатор / І.В. Пенетгов, С.В. Рymar, А.В. Лавренюк (Україна (UA)); ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (UA).– № 2003098641; Заявл. 22.09.2003.
- [6] Заявка на Декл. Пат. України. Трифазно-двофазний трансформатор / І.В. Пенетгов, С.В. Рymar, А.В. Лавренюк (Україна (UA)); ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (UA).– № 2003098697; Заявл. 24.09.2003.
- [7] Троицкий В.А., Ролик А.И., Яковлев А.И. Магнитодиелектрики в силовой электротехнике.– К.: Техніка, 1983.– 207 с.
- [8] Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 400 с.
- [9] Пенетгов И.В., Рymar С.В. Метод определения потерь в стали трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Техническая электродинамика.– 1995.– № 6.– С.
- [10] Рymar С.В. Оптимизационные методы расчета однофазных сварочных трансформаторов: Дис... канд. техн. наук.: 05.09.01 / Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.– К., 1999.– 346 с.
- [11] Пенетгов И.В., Рymar С.В., Стемковский Е.П. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации // Технічна електродинаміка.– 2002.– № 1.– С. 22-28.
- [12] Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники.– М.: Сов. радио, 1971.– 720 с.
- [13] Холоднокатаные электротехнические стали. Справочник / Б.В. Молотилов, Л.В. Миронов, А.Г. Петренко и др. / Под ред. Б.В. Молотилова.– М.: Металлургия, 1989.– 168 с.

Поступила 09.02.2004