

Расчёт параметров трансформаторов

КРИВОНОСОВ Г.А.

Открытое более 150 лет назад явление электромагнитной индукции трудами ученых и инженеров многих поколений воплотилось в широко известное устройство – трансформатор. К настоящему времени изобретено много типов трансформаторов как односердечевой (антенны в радиоприемниках), так и многосердечевой пространственной формы [1]. Однако расчет конструкции трансформаторов проводится с использованием эмпирических данных, накопленных за многие годы, поскольку отсутствует методика их расчета на основе строгих физических обоснований. В статье делается попытка, опираясь на физические законы, теоретически обосновать расчет основных конструктивных размеров трансформаторов разных типов при их проектировании. Приводятся примеры расчета на основе разработанной методики.

Ключевые слова: электромагнитная индукция, трансформатор, многосердечевой сердечник, методика и примеры расчета параметров

Наука о трансформаторе и технологии его производства развивалась и совершенствовались с момента открытия явления электромагнитной индукции Фарадеем. Однако строгой теории работы трансформаторов, а также инженерных расчетов его параметров нет, поэтому конструктивные размеры трансформаторов рассчитываются на основе экспериментальных и эмпирических данных [2]. Современная наука о физических процессах в магнитопроводах для расчёта конструктивных размеров трансформатора уравнениями Максвелла, описывающими физические процессы в магнитопроводах, пользоваться достаточно затруднительно, поскольку для каждого типа трансформатора конструкторы используют комплекты с большим набором физических величин и граничных условий.

В последние несколько десятилетий делались попытки сконструировать магнитопровод пространственной формы. В работах [1, 3–5] рассматриваются многоярмовые и многосердечевые конструкции магнитопровода, но ни одна из них не нашла технического воплощения. Как правило, подобные разработки не сопровождаются теоретическим обоснованием взаимосвязи между протекающими токами в проводниках, охватывающих магнитопровод, и магнитными потоками в магнитопроводе, формой магнитопровода и конструктивными размерами. Так, в [3, 4] приводится описание устройства, в котором «магнитная система выполнена в виде многосердечевого сердечника с замкнутыми ярмами многоугольной или петлевой формы при кратном трем либо четырем или при нечетном числе стержней с многогранными или круглыми катушками». Такое устройство имеет ряд недостатков. В [3] предполагается применение объемного магнитопровода в многофазной сети. Многофазные системы (более трех) применяются в специальных устройствах, в которых экономические и

массогабаритные показатели отодвигаются на второй план. Кроме того, применение трансформаторов в многофазных системах предполагает наличие как источника, так и потребителя многофазного тока, поэтому реализация подобных систем требует особых разработок, а главное – значительных материальных затрат.

Таким образом, если и возможно как-то уменьшить массогабаритные показатели трансформаторов «при нечетном (более трех) числе стержней с многогранными или круглыми катушками» [3], то массогабаритные показатели источника и потребителя переменного тока значительно перекроют достигнутый эффект. Помимо этого, устройства, выполненные в виде многосердечевого сердечника с замкнутыми ярмами, предельно ненадежны в работе (в случае практического исполнения). При нарушении внешней изоляции, по крайней мере, в одной из расщепленных частей обмотки магнитный поток замыкается в стержне с поврежденной обмоткой. Возникает аварийная ситуация, приводящая в конечном итоге к выжиганию всех обмоток (подобная картина наблюдается в традиционно исполненных трехфазных трансформаторах при замыкании одной из фаз).

Как известно, электромагнитное устройство [6] в качестве трансформатора малой мощности работает с нагрузкой, близкой к номинальной, поэтому безразлично, какие потери преобладают в стали или меди. В лабораторной аппаратуре, особенно предназначенной для разъездной работы (испытания и наладки), основным требованием при конструировании трансформатора является уменьшение объема и снижение массы. При этом уменьшение объема более существенно, так как в ряде случаев позволяет снизить размеры и массу всего электротехнического устройства; КПД для этих устройств, как правило, значения не имеет. Также известно,

что в качестве магнитопровода в трансформаторах малой мощности применяются штампованные пластины Ш-образной формы из электротехнической стали различных марок. (Следует заметить, что сечение ярм в трансформаторе Ш-образной формы по сравнению с сечением стержней на десятки процентов больше.) В таких трансформаторах катушки расположены на среднем стержне магнитопровода, однако по экономическим соображениям размеры магнитопроводов ограничиваются до размеров Ш25–Ш32. Громоздкость и высокая стоимость штампа для изготовления пластин больших размеров Ш-образной формы экономически невыгодны для производства. Кроме того, по некоторым свойствам трансформаторы на Ш-образных магнитопроводах уступают трансформаторам с магнитопроводами из пластин типа П-образных в тех случаях, когда для уменьшения рассеяния магнитного потока необходимо расположить первичную и вторичную обмотки на двух стержнях. Следует также отметить, что применение трехфазного тока целесообразно, если мощность потребителя составляет более 3 кВт. При меньших значениях мощности с целью уменьшения массогабаритных показателей трансформатора используют инверторные преобразователи, которые в настоящее время широко применяются в радио- и телеэлектронной аппаратуре.

Рассмотрим устройство [7], в котором устранены перечисленные недостатки предыдущих устройств, а также решены задачи по повышению надежности и расширению функциональной возможности электромагнитного устройства. Это достигается тем, что пространственная электромагнитная система выполнена из «элементарных магнитоизолированных и составленных между собой элементов, имеющих ярма и стержни». На стержнях расположены катушки с первичными и вторичными обмотками. При этом одна из обмоток охватывает, по крайней мере, два стержня, магнитоизолированных между собой. Обмотки секционированы. Такая пространственная конфигурация из магнитопроводов и обмоток дает возможность изготовить ряд оригинальных устройств: регулируемый [8] и разделительный [9] трансформаторы, четырех- [10, 11] и шестикатушечные [12] сварочные трансформаторы, сглаживающий дроссель на 2,5 МВА [13]. При их конструировании был использован нижеописанный метод расчета.

Опишем работу трансформатора¹ как потребителя участка цепи. Для этого запишем закон Ома:

$$I = U / R, \quad (1)$$

где I – действующее значение номинального тока трансформатора; U – действующее значение номинального напряжения, подаваемого на вход первичной обмотки; R – омическое сопротивление трансформатора при номинальной нагрузке (в первом приближении потери на электромагнитное рассеяние в окружающую среду считаем незначительными). Выразим ток I через плотность i и поперечное сечение проводника $S_{\text{пр}}$:

$$I = i S_{\text{пр}}, \quad (2)$$

а сопротивление как

$$R = r l / S_{\text{пр}}, \quad (3)$$

где r – удельное сопротивление проводника; l – его длина.

Подставляя (2) и (3) в (1), получаем:

$$i = U / r l. \quad (4)$$

Как показала практика, выбор значения плотности тока в большой степени влияет на тепловые характеристики трансформатора, а для плотности тока в табличных значениях i не отражены конструктивные особенности трансформатора: качество и толщина изоляции (для достаточной вентиляции обмотки); конструктивные особенности обмотки и др. В (4) в косвенной форме входят основные конструктивные размеры трансформатора [см. (5)]. Поэтому принятые значения плотности тока, вычисленные по (4), в значительной степени положительно отражаются на тепловых показателях трансформатора при его работе.

На рис. 1 в упрощённой форме приведено поперечное сечение стержня с обмоткой² трансформатора. Обозначим $r_2 - r_1 = D_1$ – зазор (из изолятора) между магнитопроводом и первым слоем витков; $r_4 - r_3 = D_2$ – зазор (из изолятора) между последним слоем первичной обмотки и первым слоем вторичной обмотки; $r_6 - r_5 = D_3$ – зазор (из изолятора) между последним слоем вторичной обмотки и внешними предметами.

Выразим длину l намоточного провода первичной обмотки в катушке через средний радиус $r_{\text{ср}}$ и число N витков в первичной обмотке:

$$l = 2\pi r_{\text{ср}} N = \pi(r_3 + r_2)N, \quad (5)$$

подставив (5) в (4), получим:

$$U / N = \pi i r (r_3 + r_2) = \pi i r (r_3 + r_1 + D_1). \quad (6)$$

¹ Следует отметить, что в данном рассмотрении не затрагиваются вопросы нагрева и излучения тепла с внешней поверхности устройства. Вопросы теплового режима трансформаторов хорошо описаны в [2].

² В действительности поперечные сечения магнитопровода и катушек не идеально круглые, поэтому рассчитанные параметры принимают приближенные значения.

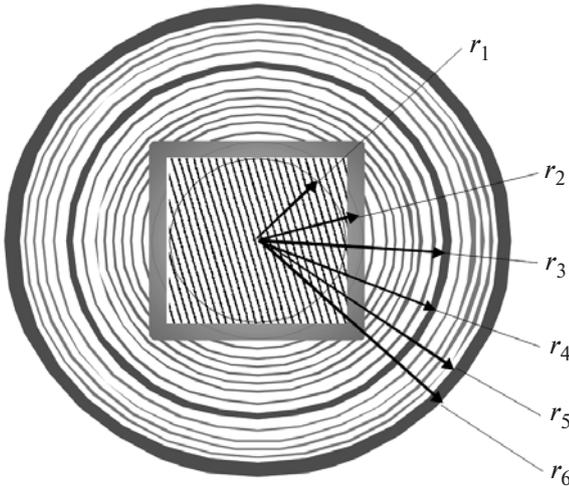


Рис. 1. Поперечное сечение стержня с обмоткой: r_1 – радиус магнитопровода; r_2, r_3 – радиус первого и последнего слоев первичной обмотки; r_4, r_5 – радиус первого и последнего слоев вторичной обмотки; r_6 – радиус изоляции между последним слоем вторичной обмотки и внешними предметами

Из (6) следует ожидать увеличения отношения «вольт на виток» при увеличении радиуса последнего слоя первичной обмотки, что косвенно подтвердилось в конструкциях трансформаторов, рассмотренных в [8–15].

Магнитный поток, пронизывающий стержень магнитопровода сечением $S_{\text{маг}}$,

$$F_{\text{маг}} = BS_{\text{маг}}, \tag{7}$$

где $B = \mu_0 \mu H$ – индукция; H – напряженность внешнего магнитного поля.

Напряжение U , возбуждающее этот поток с частотой f , входит в выражение

$$F_{\text{маг}} = U / kf, \tag{8}$$

где k – коэффициент формы кривой напряжения (для синусоидальной кривой $k = 1,11$).

Из (7) и (8) находим выражение для поперечного сечения стержня:

$$S_{\text{маг}} = U / Bkf = U / (\mu_0 \mu Hkf). \tag{9}$$

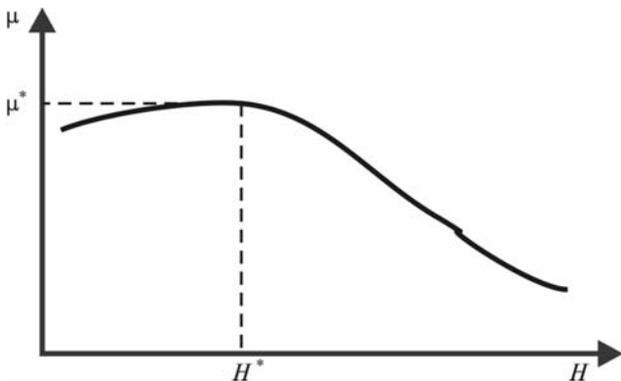


Рис. 2. График зависимости изменения магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

При выборе параметров μ и H следует руководствоваться оптимальными значениями для применяемого типа ферромагнитной стали. Согласно характеристике намагничивания трансформаторной стали (рис. 2) рекомендуется выбирать значение H^* при максимальном значении μ^* . Однако H является не только функцией тока I , но и отношения радиуса a катушки к ее высоте b , т.е. $H^* = H(I^*, a, b)$. Следует заметить, что наиболее эффективная работа трансформатора (повышенное КПД) наблюдается при малых отклонениях номинального тока I от значения I^* . Отсюда рекомендация: применять стали с малым изменением значения μ в широком диапазоне изменения магнитного поля (см. рис. 2), а также оптимизировать соотношение a/b , тогда

$$S_{\text{маг}} = U / (\mu_0 \mu^* H^* kf). \tag{10}$$

С другой стороны, в соответствии с рис. 1 поперечное сечение стержня магнитопровода

$$S_{\text{маг}} = \pi r_1^2. \tag{11}$$

Из (10) и (11) определяется значение r_1 .

Пусть дано u_1 – допустимое пробивное напряжение (d_1 – толщина) изоляции между слоями в первичной обмотке, тогда число слоев в ней $n_1 = U_1 / u_1$ и толщина слоя равна $d_{1c} = d_{1пр} + d_1$, где $d_{1пр} = \sqrt{I_1 / (\rho i)}$ – диаметр провода первичной обмотки. Толщина первичной обмотки $d_{1обм} = d_{1c} n_1 + D_1$, где D_1 – толщина изоляции (наперед заданной) между магнитопроводом и первым слоем первичной обмотки, тогда $r_3 = d_{1обм} + r_1$. Подобным образом определим и толщину вторичной обмотки. Число слоев во вторичной обмотке $n_2 = U_2 / u_2$, толщина слоя $d_{2c} = d_{2пр} + d_2$, где $d_{2пр} = \sqrt{I_2 / (\rho i_2)}$ – диаметр провода вторичной обмотки. Толщина вторичной обмотки $d_{2обм} = d_{2c} n_2 + D_2 + D_3$, где D_2 – толщина изоляции (наперед заданной) между последним слоем первичной обмотки и первым слоем вторичной обмотки; D_3 – толщина изоляции (наперед заданной) между последним слоем вторичной обмотки и внешними предметами (рядом расположенной обмотки, ярмом, конструктивными элементами). Знание этой величины необходимо при определении расстояний между стержнями, т.е. для определения длины ярма $L_{\text{я}} = 2(d_{1обм} + d_{2обм}) + D_4$, где D_4 – наперед заданный зазор между катушками.

При известных значениях r_3 и r_1 из (6) определим число витков:

$$N = U / (\rho i \pi (r_3 + r_1 + D_1)); \tag{12}$$

число витков в слое первичной обмотки $w = N / n_1$.

Магнитный поток выразим как

$$F_{\text{маг}} = F / R_{\text{маг}}, \quad (13)$$

где $F = IN$ – МДС; $R_{\text{маг}}$ – магнитное сопротивление:

$$R_{\text{маг}} = L / (\mu_0 m S_{\text{маг}}), \quad (14)$$

где L – длина магнитопровода.

С учетом (7)

$$L = IN \mu_0 m^* / B = IN / H^*, \quad (15)$$

тогда минимальная длина стержня для П-образной формы магнитопровода

$$L_c^3 (L - 2L_y) / 2. \quad (16)$$

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать сопротивление нагрузки. Если к источнику переменного тока подключить нагрузку с сопротивлением R_H через трансформатор с коэффициентом трансформации n , то для цепи источника нагрузочное сопротивление R_H при допустимости $P_1 \gg P_2$, где $P_1 = U_1^2 / R_H$ – мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного напряжения; $P_2 = U_2^2 / R_H$ – мощность, потребляемая нагрузкой, определится как

$$U_1^2 / R_H \gg U_2^2 / R_H;$$

$$R_H \gg R_H U_1^2 / U_2^2 \gg n^2 R_H.$$

Таким образом, трансформатор изменяет значение сопротивления нагрузки R_H в n^2 раз. Это свойство широко используется при разработке электрических схем для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

Итак, получены все параметры однофазного трансформатора для его расчета и конструирования. Рассмотрим примеры и работу некоторых устройств, рассчитанных по нижеприведенной методике расчета конструктивных размеров трансформатора.

Регулируемый трансформатор [8]. Для регулирования напряжения во вторичной цепи, как правило, используют автотрансформатор (для низких напряжений) или трансформатор с секционированными обмотками (ступенчатое изменение напряжения). Следует отметить, что при переключении с одной обмотки на другую даже во время прохождения тока через нулевое значение всегда имеется «мертвое» время срабатывания ключей, при кото-

ром магнитный поток в катушках прерывается. И, как следствие, в момент срабатывания ключей генерируются гармоники высших порядков.

Предлагаемое устройство (регулируемый трансформатор) имеет магнитную систему, состоящую из n ($n = 2, 3, 4, \dots$) элементарных магнитопроводов, содержащих два стержня и два ярма. Первые стержни каждого из n магнитопроводов охвачены общей катушкой, имеющей первичную обмотку и $1/n$ часть вторичной. Стержни магнитно изолированы друг от друга. Каждый второй стержень n -х магнитопроводов охвачен катушкой, содержащий равные части вторичной обмотки. Такой трансформатор работает следующим образом. При последовательном подключении к нагрузке каждой части вторичных обмоток, расположенных на вторых частях магнитопроводов, напряжение на ней увеличивается пропорционально числу подключенных частей вторичной обмотки. (Это не противоречит закону Био-Савара-Лапласа.)

В таком трансформаторе выходное напряжение на вторичной обмотке можно регулировать ступенчато, кратно n , при этом ключи срабатывают в момент прохождения тока через нуль. При каждом переключении напряжение на вторичной обмотке не падает до нуля, магнитный поток не прерывается – он шунтируется другими включенными катушками. Таким образом, исключается генерация гармоник высших порядков. При необходимости плавного регулирования напряжения в пределах ступени следует питать одну из катушек через автотрансформатор. Причем мощность дополнительного автотрансформатора можно ограничить значением, равным $1/n$ мощности всего трансформатора. Во вторичной обмотке форма сигнала повторяет форму сигнала, подаваемого на первичную обмотку. Такую конструкцию можно использовать в качестве стабилизатора напряжения при условии наличия обратной связи для управления ключами во вторичной цепи.

Разделительный трансформатор [9]. Магнитопровод состоит из n ($n = 2, 3, 4, \dots$) элементарных магнитопроводов, из которых первый охвачен первичной обмоткой, а n -й – вторичной высоковольтной. Промежуточные обмотки, которые охватывают магнитопроводы последовательно (первый и второй, второй и третий и т.д. до n -го), короткозамкнутые. (Следует заметить, что пробивное напряжение по поверхности диэлектрика на единицу длины в несколько раз меньше пробивного напряжения на единицу длины самого диэлектрика.) Благодаря такой конструкции устройства отпадает необходимость в межвитковой изоляции от электрических пробоев по поверхности. Действительно, первичная и вторичная обмотки расположены на

различных магнитопроводах. Пробивное напряжение определяется межвитковой изоляцией в промежуточных обмотках. Принцип такого устройства нашел воплощение [1, 10, 11].

Высоковольтная трансформаторная ускоряющая установка [10, 11] состоит из $n^3 \cdot 2$ элементарных магнитопроводов, каждый из которых выполнен в виде тороида. Первый магнитопровод охвачен первичной, высоковольтной, и промежуточной обмотками. Последующие магнитопроводы охвачены высоковольтной и двумя промежуточными обмотками. Причем промежуточные и высоковольтные обмотки секционированы для уменьшения рассеяния магнитного потока. Вход промежуточной обмотки первого магнитопровода соединен со входом промежуточной обмотки второго магнитопровода, а выход промежуточной обмотки первого магнитопровода соединен с выходом промежуточной обмоткой второго магнитопровода, вторая промежуточная обмотка второго магнитопровода соединена с промежуточной обмоткой третьего магнитопровода подобным образом и т.д. Вторая промежуточная обмотка последнего магнитопровода трансформирует электрическую энергию для питания приборов, расположенных под высоким потенциалом. Высоковольтные обмотки на каждом магнитопроводе питают выпрямительные блоки со сглаживающими фильтрами, а выходы блоков соединены между собой последовательно сополюсно. Механическую нагрузку несут изоляторы, равномерно расположенные друг против друга между магнитопроводами. По оси устройства расположена ускорительная трубка вместе с делителем напряжения. На первичную обмотку подается переменное электрическое напряжение от преобразователя (возможно, высокочастотное, вплоть до 40 кГц, что значительно уменьшает массогабаритные параметры устройства).

Высоковольтный многофазный трансформаторный ускоритель заряженных частиц [1] содержит многофазный трансформатор, число фаз которого равно числу колонн, состоящих из $n^3 \cdot 2$ элементарных магнитопроводов, выполненных в виде тороида. Электрическая схема каждой колонны собрана аналогично высоковольтной трансформаторной ускоряющей установке [10]. Выводы высоковольтных блоков каждой колонны соединены сополюсно. Выводы вторых промежуточных обмоток последних магнитопроводов каждой колонны питают многофазный трансформатор собственных нужд. По оси устройства устанавливается ускорительная трубка заряженных частиц. На первичные обмотки подается переменное многофазное напряжение от преобразователя.

Универсальный аппарат для дуговой сварки (УТДС) [12, 13]. Электромагнитное устройство [7] нашло применение в бытовой технике. Был выполнен аппарат с широкими функциональными возможностями: при массогабаритных показателях $0,875 \text{ кг/дм}^3$ его применяют для дуговой сварки на постоянном токе электродами диаметром 2–4 мм, запускают в зимний период двигатель внутреннего сгорания при разряженном аккумуляторе, заряжают аккумуляторные батареи всех типов и используют как понижающий трансформатор-выпрямитель напряжения от 6 до 42 В с интервалом 6 В и током 80 А в постоянном режиме. Магнитопровод трансформатора состоит из четырех (возможно больше) элементарных магнитопроводов, изолированных друг от друга. Каждая катушка охватывает два стержня двух элементарных магнитопроводов. Вторичная обмотка секционирована для коммутации выходного напряжения, которое в силовой цепи устанавливается от 30 до 42 В для работы устройства в режиме сварки, а напряжение в цепи поджига равно 65 В. Значение тока в цепи поджига ограничивается емкостью, включенной последовательно с выпрямительным мостом. При этом емкость выполняет функцию смещения напряжения по фазе относительно фазы силового тока. После выпрямительных мостов обе цепи соединяются параллельно сополюсно. При таком исполнении питания током на электроде при сварке в каждый момент времени имеется потенциал, обеспечивающий стабильность поджига дугового разряда. По аналогичной конструкции был изготовлен трехфазный сварочный трансформатор [14].

Бытовой сварочный трансформатор УТДС-3 [14]. Его параметры: номинальное входное напряжение 220 В, сеть трехфазного тока (380/3 В); максимальный сварочный ток 200 А; продолжительность работы ПН равна 40%; напряжение холостого хода 65 В; ток холостого хода $\approx 0,7 \text{ А}$; КПД 80%; масса 35 кг; габаритные размеры 370/250/300 мм. Отличительная особенность устройства такова, что оно работает как в однофазной сети, так и в трехфазной с номинальным током нагрузки и номинальным КПД. Такую техническую возможность рассмотрим более подробно. На практике возникают определенные трудности при включении однофазного трансформатора средней мощности (5–20 кВт) в трехфазную сеть (в этом случае в сети одна из фаз перегружается), что крайне нежелательно. А при необходимости использования трехфазного трансформатора в однофазной сети снижается КПД, появляется необходимость в увеличении массогабаритных показателей трансформатора. В предлагаемом устройстве при n , кратном шести (возможно и больше) катушек, такая ситуация реа-

лизуется довольно просто. Магнитную систему следует составить так, как показано на рис. 3. Крайние катушки охватывают по два стержня, а средние по три. При включении трансформатора в трехфазную сеть первичные обмотки каждой фазы соединяют последовательно попарно (рис. 3,б) (или параллельно в зависимости от диаметра провода первичной обмотки), чтобы были согласованы магнитные потоки в магнитопроводе.

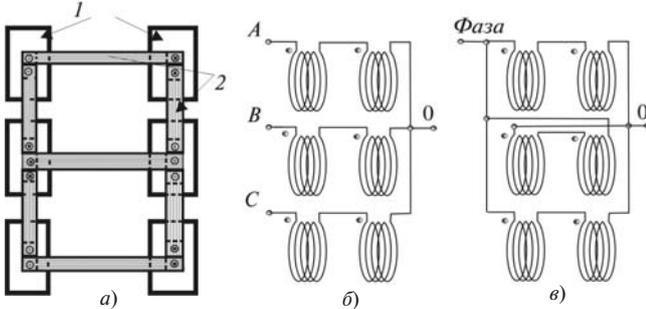


Рис. 3. Магнитная система: а – магнитопровод шестикатушечного трансформатора (1 – катушки с обмотками; 2 – «элементарные» магнитопроводы); б – схема включения первичной цепи в трехфазную сеть (вторичные обмотки не показаны); в – схема включения первичной цепи в однофазную сеть (вторичные обмотки не показаны)

Для включения трансформатора в однофазную сеть достаточно первичные обмотки перекоммутировать и включить согласно рис. 3,в. При этом значение мощности трансформатора остается номинальным. При расчете числа витков такого трансформатора следует учитывать, что у средних катушек число витков меньше, чем у крайних.

Рассматриваемый трансформатор можно использовать как преобразователь однофазного напряжения в трехфазное. Коммутация первичных обмоток и необходимые дополнительные элементы представлены на рис. 4.

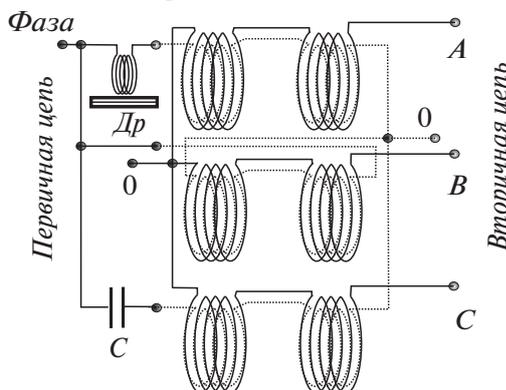


Рис. 4. Принципиальная схема преобразователя однофазного напряжения в трехфазное

Параметры дросселя и конденсатора рассчитываются с учетом значения мощности потребителя.

Сглаживающий дроссель на 2,5 МВА [15, 16]. Известен дроссель [3], имеющий \square -образный магнитопровод, состоящий из двух стержней с катушка-

ми и двух ярм. Его недостатком являются ограничения по току в катушках, вызванные перегревом его из-за небольшой площади отвода тепла. Этого недостатка можно избежать, увеличив массогабаритные показатели устройства. Кроме того, линейная зависимость индукции от ампер-витков в таком дросселе изменяется в малом диапазоне при номинальном значении постоянной составляющей тока, что ограничивает сглаживание пульсаций тока при большой амплитуде переменной составляющей.

Устройство, описанное в [7], можно использовать как дроссель [15], содержащий \square -образные магнитопроводы, каждый из которых состоит из двух стержней и двух ярм. Магнитопроводы образуют систему в виде призмы из $2n$ ($n = 2, 3, 4, \dots$) боковых граней, ребрами которой являются стержни, охваченные катушкой. В такой конструкции дросселя увеличена площадь отвода тепла с поверхности катушек. При этом за счет взаимной индукции между катушками уменьшается поперечное сечение магнитопровода или число витков, что обуславливает снижение удельных массогабаритных показателей.

Дроссель (рис. 5) содержит \square -образные магнитопроводы 1, каждый из которых состоит из двух стержней 2 с катушкой 3 и двух ярм 4, образующих систему в виде призмы из четырех боковых граней. Ребрами призмы являются стержни 2, а каждая из катушек 3 охватывает пару примыкающих друг к другу стержней, чередующихся магнитными 5 и немагнитными 6 промежутками. Работает предлагаемый дроссель так. Катушки 3 подключают к источнику питания через выпрямляющее устройство (на чертеже не показано). Ток в катушках направлен так, чтобы вызванные им магнитные потоки в маг-

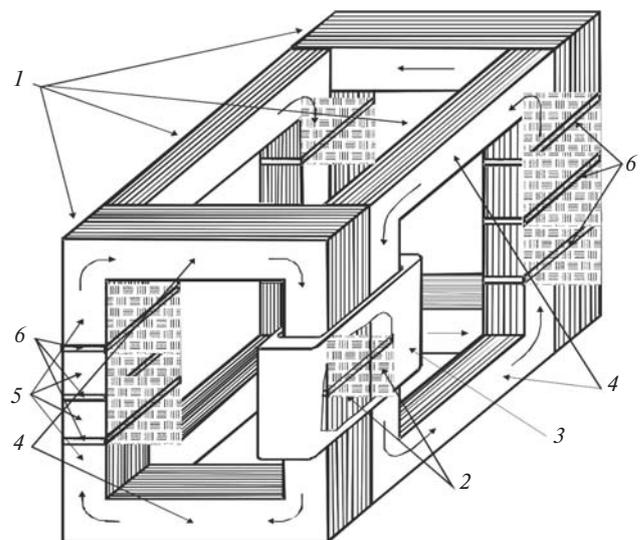


Рис. 5. Сглаживающий дроссель: 1 – элементарные магнитопроводы; 2 – стержни; 3 – катушки; 4 – ярма; 5 – секции стержней; 6 – немагнитные зазоры

нитопроводах 1 были согласованными. На рис. 5 направление магнитных потоков показано стрелками. Так как каждая катушка 3 охватывает два стержня 2 двух примыкающих друг к другу магнитопроводов 1, то через ярма 4 между рядом расположенных катушек 3 возникает магнитная связь.

Таким образом, осуществляется взаимная индукция каждой катушки 3 с двумя соседними, при этом суммарная индуктивность дросселя увеличивается на удвоенное значение взаимной индукции, что приводит к линейной зависимости изменения индукции при изменении постоянного тока в широком диапазоне. Наличие немагнитных участков б, имеющих линейную характеристику намагничивания, приближает кривую намагничивания к линейной, и насыщение магнитного потока в магнитопроводе наступает при большем значении постоянного тока, чем у дросселя при расположении немагнитного участка вне катушки [4]. Были изготовлены 10 дросселей с техническими показателями: постоянный ток 400 А, рабочее напряжение 6 кВ, испытательное напряжение 10 кВ, индуктивность 50 мГн, масса 3,5 т (рис. 6), воздушное охлаждение.

Задача теплового режима решалась путем расположения вентилятора над дросселем с изоляционным экраном и воздушными промежутками в обмотке между пятью слоями. Для изготовления подобных дросселей была разработана технологическая оснастка и технология сборки. В развитие практического применения подобных конструкций был спроектирован шестикатушечный дроссель с параметрами: рабочее напряжение 10 кВ, испытательное 15 кВ, индуктивность 75 мГн, масса около 6 т. Однако по экономическим соображениям осуществить такой проект не удалось.



Рис. 6. Общий вид сглаживающего (сухого) дросселя

Вывод. Методика расчета конструктивных размеров трансформатора, как показала практика, применима не только к вышерассмотренным устройствам, но и к трансформаторам с традиционной формой магнитопровода. Оптимальная работа трансформатора достигается тем, что выбор плотности тока по рекомендуемой формуле основывается на том, что в приведенное выражение косвенно входят конструктивные параметры трансформатора. Помимо этого при выборе технической стали для магнитопровода следует выбирать оптимальные значения магнитной проницаемости и напряженности магнитного поля в магнитопроводе. Примеры выполненных устройств показывают, что новые формы пространственного магнитопровода дают возможность уменьшить массогабаритные показатели электротехнических приборов, а также расширить их функциональные возможности и повысить надежность при эксплуатации. Применение приведенной методики расчета позволит проектировать трансформаторы с улучшенными массогабаритными и температурными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривонос Г.А., Мельников Д.С., Найденов Н.В., Хижняк Н.А. Проект высоковольтного многофазного трансформаторного ускорителя заряженных частиц. — Вісник Харківського університету, 2000, № 469, випуск 1(9), с. 89–91.
2. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1986, с. 527.
3. А.с. № 1089637 (СССР). Электромагнитный аппарат А.М. Репина. — БИ, 1986, № 16.
4. Манькин Э.А. Расчет реакторов со стальным магнитопроводом и зазором. — Электричество, 1959, № 7, с. 35–41.
5. Казаков В.В. Источники питания. Многофазные трансформаторы-преобразователи. Многофазные выпрямители. — Силовая электроника (Приложение к журналу «Компоненты и технологии»), 2006, № 4, с. 50–52.
6. Никитский В.З. Трансформаторы малой мощности. — М.: Энергия 1976, с. 96.
7. Патент РФ № 20411515. Электромагнитное устройство Кривоносова/Г.А.Кривоносов. — БИ, 1995, № 22.
8. Патент РФ, № 2046423. Регулируемый трансформатор/Г.А. Кривоносов. — БИ, 1995, № 29.
9. А.с. (СССР) № 1742872. Разделительный трансформатор/Г.А. Кривоносов, В.Н. Сокол. — БИ, 1992, № 23.
10. Патент на изобретение № 2077759, 1992. Высоковольтная трансформаторная ускоряющая установка/ В.Н. Сокол, Г.А. Кривоносов.
11. Кривонос Г.А., Найденов Н.В., Хижняк Н.А. Модель высоковольтной трансформаторной ускоряющей установки. — Вісник Харківського університету, 1999, № 463, випуск 4, с. 83–85.
12. Патент РФ № 2006087. Сварочный трансформатор / Г.А. Кривоносов. — БИ, 1995, № 29.
13. Бережной А.М., Крайнов В.Ф., Кривонос Г.А., Сокол В.Н. Универсальный аппарат для дуговой сварки (УТДС). — Сварочное производство, 1994, № 9, с. 37–40.
14. Бережной А.М., Крайнов В.Ф., Кривонос Г.А., Сокол В.Н. Бытовой сварочный аппарат (УТДС-3). — Сварочное производство, 1996, № 2, с. 35–36.

15. Патент Украины № 30021. Дроссель/Г.А. Кривоносов, Д.С. Мельников. – БИ, 2008, № 3.

[09.11.15]

Автор: **Кривоносов Геннадий** окончил физико-математический факультет Таджикского государственного университета в 1962 г. Ученую степень

кандидата физико-математических наук получил в 1977 г. после защиты диссертации «Электростатический ускоритель. Изучение механизма взаимодействия протонов низких энергии на ядрах среднего атомного веса». Старший научный сотрудник, АО фирма «ГЭК» (Харьков, Украина).

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 6, pp. 47–54.

Calculating the Transformer Parameters

KRIVONOSOV Gennadii (PLLC «GAK», Kharkiv, Ukraine) – Senior Scientific Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

The electromagnetic induction phenomenon, which was discovered more than 150 years ago, has been embodied, owing to efforts of many generations of scientists and engineers, into a wide known device called a transformer. A lot of transformer types have been invented, including those having single-leg (aerials in radio receivers) and spatial multileg shapes [1]. However, transformer designs are calculated using empirical data accumulated for many years, because their calculation procedure based on rigorous physical grounds is lacking. An attempt is made in the article to theoretically substantiate calculation of the main design sizes of different types of transformers in designing them based on physical laws. Examples of calculation based on the developed procedure are given.

Key words: *electromagnetic induction, transformer, multileg core, parameter calculation procedure and examples*

REFERENCES

1. **Krivososov G.A., Mel'nikov D.S., Naidenov N.V., Khizhnyak N.A.** *Visnik Kharkivskogo universitetu – in Ukrainian (Bulletin of Charkov University)*, 2000, iss. 1(9), No. 469, pp. 89–91.
2. **Tikhomirov P.M.** *Raschet transformatorov* (Calculation of transformers). Moscow, Energoatomizdat, 1986, 527 p.
3. **A.s. No. 1089637 (SSSR).** *Elektromagnitnyi apparat A.M. Repina* (A.M. Repin electromagnetic apparatus). Bulletin of inventions, 1986, No. 16.
4. **Man'kin E.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1959, No. 7, pp. 35–41.
5. **Kazakov V.V.** *Silovaya elektronika (Prilozheniye k zh. «Komponenty i tekhnologii»)* – in Russ. (Power electronics (Supplement to Journ. «Components and technologies»)), 2006, No. 4, pp. 50–52.
6. **Nikitskii V.Z.** *Transformatory maloi moshchnosti* (Low-power transformers). Moscow, Publ. «Energiya», 1976, 96 p.
7. **Patent RF No. 20411515.** *Elektromagnitnoye ustroystvo Krivososova* (Krivososov electromagnetic device)/G.A. Krivososov. Bulletin of inventions, 1995, No. 22.
8. **Patent RF No. 2046423.** *Reguliruyemyi transformator* (Adjustable transformer)/G.A. Krivososov. Bulletin of inventions, 1995, No. 29.
9. **A.s. No. 1742872 (SSSR).** *Razdelitel'nyi transformator* (Isolating transformer)/G.A. Krivososov, V.N. Sokol. Bulletin of inventions, 1992, No. 23.
10. **Patent na izobreteniyе No. 2077759, 1992.** *Vosokovol'naya transformatornaya uskoryayushchaya ustanovka* (High-voltage transformer accelerates installation)/V.N. Sokol, G.A. Krivososov.
11. **Krivososov G.A., Naidenov N.V., Khizhnyak N.A.** *Visnik Kharkivskogo universitetu, vip. 4 – in Ukrainian (Bulletin of Charkov University, iss. 4)*, 1999, No. 463, pp. 83–85.
12. **Patent RF No. 2006087.** *Svarochnyi transformator* (Welding transformer)/G.A. Krivososov. Bulletin of inventions, 1995, No. 29.
13. **Berezhnoi A.M., Krainov V.F., Krivososov G.A., Sokol V.N.** *Svarochnoye proizvodstvo – in Russ. (Transformer production)*, 1994, No. 9, pp. 37–40.
14. **Berezhnoi A.M., Krainov V.F., Krivososov G.A., Sokol V.N.** *Svarochnoye proizvodstvo – in Russ. (Transformer production)*, 1996, No. 2, pp. 35–36.
15. **Patent Ukraine No. 30021.** *Drossel' (Choke)*/G.A. Krivososov, D.S. Mel'nikov. Bulletin of inventions, 2008, No. 3.

