
УДК 621.314.225

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ГАЗОПРОВОДОВ

© 2019 г. Л. И. Сахно¹, *, О. И. Сахно¹, М. С. Крылов¹

¹Санкт-Петербургский университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: lsahno2010@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.09.2019 г.

После доработки 21.10.2019 г.

Принята к публикации 23.10.2019 г.

Рассмотрены силовые тороидальные трансформаторы для стыковой сварки газопроводов. Первичные обмотки таких трансформаторов изготовлены из литцендрата и имеют несколько параллельно соединенных секций. Для расчета токов в секциях первичной обмотки используется новая эквивалентная схема многообмоточного трансформатора, основанная на классической теории трансформаторов. Она отличается от известных схем замещения более простой топологией. Все параметры схемы имеют ясный физический смысл. Предложенная схема замещения позволила использовать магнитостатическую формулировку МКЭ для расчета токов в секциях первичной обмотки трансформатора. Результаты расчета подтверждены результатами измерений.

Ключевые слова: стыковая сварка, многообмоточный силовой трансформатор, схема замещения трансформатора, опыт короткого замыкания, магнитное поле рассеяния

DOI: 10.1134/S000233101905011X

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в нашей стране и за рубежом интенсивно ведутся поиски новых механизированных способов сварки неповоротных стыков труб больших диаметров. Оригинальным отечественным решением этой проблемы является использование стыковой контактной сварки [1–3]. В России созданы стационарные установки для контактной сварки секций труб диаметром 114–530 мм. Трубопроводы длиной десятки тысяч километров, сваренные контактным способом, эксплуатируются в различных климатических условиях, в том числе в условиях Крайнего Севера. Многолетний опыт эксплуатации таких трубопроводов свидетельствует о высокой эффективности такого решения. Технично-экономические расчеты показывают, что с увеличением диаметра и площади поперечного сечения труб эффективность применения контактной сварки возрастает, так как время сварки, составляющее несколько минут, при этом увеличивается незначительно, в то время как при использовании электродуговых способов оно возрастает пропорционально диаметру и толщине стенки труб. В настоящее время создается и внедряется уникальный сварочный комплекс машин и механизмов для контактной сварки оплавлением труб диаметром 1420 мм.

Однако создание сварочных машин для контактной сварки труб больших диаметров связано со значительными трудностями. С увеличением диаметра и площади поперечного сечения труб резко возрастает вес и мощность машин. При этом сложнее обеспечить надежное функционирование сложных электрических и гидравлических

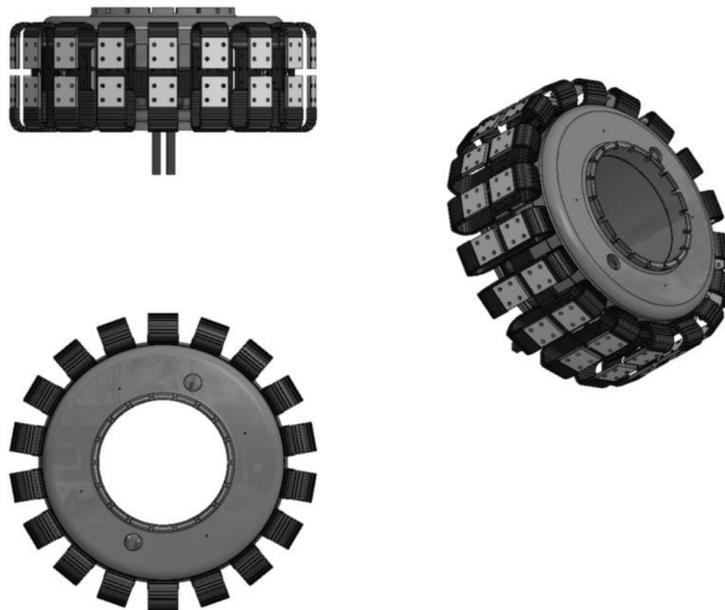


Рис. 1. Тороидальный сварочный трансформатор.

узлов машин в полевых условиях и особенно на Крайнем Севере. Одним из ответственных узлов таких сварочных машин, влияющих на вес и потребляемую мощность, является трансформатор. Трансформатор комплекса для контактной сварки труб диаметром 1420 мм имеет тороидальный магнитопровод, несколько параллельно соединенных секций первичной обмотки, выполненных из литцендрата, и один виток вторичной обмотки, выполненной в виде корпуса трансформатора с разрезом (рис. 1). Трансформатор устанавливается внутри свариваемых труб на специальную стальную трубу и не имеет принудительного охлаждения. Вторичная обмотка соединяется со свариваемыми трубами с помощью 18 медных гибких шин, показанных на рис. 1. Номинальный режим работы трансформатора близок к режиму короткого замыкания. Количество и схема соединения секций первичной обмотки существенно влияют на сопротивление короткого замыкания машины, ее электропотребление и тепловой режим работы трансформатора.

Целью статьи является разработка методики расчета токов в секциях первичной обмотки, которые необходимы для дальнейшего расчета электропотребления и теплового режима трансформатора. Эта методика должна позволить проводить научно обоснованный поиск рациональной схемы соединения секций первичной обмотки и сечений ее проводов, которые обеспечат допустимый нагрев трансформатора и минимальное потребление электроэнергии при сварке. Методика должна позволить проводить многовариантные расчеты без больших затрат компьютерного времени. Расчет трехмерного переменного магнитного поля трансформатора с учетом всех геометрических особенностей его конструкции и электрической схемы соединения обмоток требует огромных затрат компьютерного времени. Особую трудность представляет необходимость учета винтовой симметрии и транспозиции изолированных проводов литцендрата, применение которого устраняет поверхностный эффект в проводах первичной обмотки.

Для решения этой задачи используется новая схема замещения многообмоточного трансформатора, позволяющая выполнить расчет токов в обмотках трансформатора, используя двумерный расчет магнитного поля трансформатора в режиме противовключения. В исходных данных этого расчета заложена информация о выполнении первичной обмотки из литцендрата, вследствие чего ток равномерно распределен по сечению каждой секции первичной обмотки. Новая схема замещения отличается от известных схем [4–12] существенно более простой топологией, причем все параметры схемы имеют ясный физический смысл. Эта схема основана на классических уравнениях двухобмоточного трансформатора [4]. В ее основе лежит представление многообмоточного трансформатора в виде нескольких двухобмоточных трансформаторов. Взаимное влияние двухобмоточных трансформаторов учитывается введением дополнительных ЭДС на зажимах их обмоток, для моделирования которых в схему замещения введены новые элементы – индуктивно связанные катушки и зависимые ЭДС. При использовании этой схемы замещения секции первичной обмотки могут быть электрически не соединены между собой. Новая схема позволяет просто и наглядно объяснять влияние конструкции трансформатора на распределение первичного тока трансформатора между секциями первичной обмотки. Этот подход был использован для создания новых конструкций сварочных трансформаторов, установленных в двухмостовых сварочных выпрямителях для дуговой сварки и инверторных источниках питания машин контактной сварки [13–18]. В данной статье представлены результаты использования этой методики при расчете трансформатора комплекса для сварки труб диаметром 1420 мм, который разработан, изготовлен и испытан в ОАО “Псковэлектросвар” [19]. Результаты расчета токов в секциях первичной обмотки с использованием разработанной методики подтверждены результатами измерений и результатами расчета с использованием известной схемы замещения [4].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Рассмотрим трансформатор с n первичными обмотками и одной вторичной обмоткой, поскольку все трансформаторы для стыковой сварки газопроводов имеют одну вторичную обмотку, состоящую из одного витка. Пусть первичные обмотки не соединены между собой электрически (рис. 2). Номера первичных обмоток обозначим как 11, 12, ... 1 n , вторичная обмотка имеет номер 2, первичные обмотки подключены к своим источникам напряжения u_{11} , u_{12} , ... u_{1n} , вторичная обмотка подключена к нагрузке z_L (для синусоидального режима $z_L = r_L + j\omega L_L$, где r_L – активное сопротивление нагрузки L_L – индуктивность, $\omega = 2\pi f$, f – частота). Таким образом, трансформатор имеет $(n + 1)$ обмотку. Пренебрегая током намагничивания, можно записать:

$$i_2 = i_{21} + \dots + i_{2n} = -(i_{11}k_1 + \dots + i_{1n}k_n), \quad (1)$$

где i_{11} , i_{12} , ... i_{1n} – мгновенные токи в первичных обмотках, i_2 – мгновенный ток во вторичной обмотке, $k_1 = w_{11}/w_2$, ... $k_n = w_{1n}/w_2$ – коэффициенты трансформации, w_{11} , w_{12} , ... w_{1n} – число витков в каждой из первичных обмоток, w_2 – число витков во вторичной обмотке.

Формула (1) показывает, что вторичный ток в рассматриваемом многообмоточном трансформаторе представляет собой сумму нескольких составляющих, каждая из которых определяется током в первичной обмотке своего двухобмоточного трансформатора и коэффициентом трансформации этого трансформатора. Поскольку ток вторичной обмотки в многообмоточном трансформаторе может быть получен суммированием вторичных токов n двухобмоточных трансформаторов, заменим $(n + 1)$ – обмоточный трансформатор n – двухобмоточными трансформаторами. Каждый из этих двухобмоточных трансформаторов имеет общую вторичную обмотку – 2 и одну первичную обмотку. В результате имеем n – двухобмоточных трансформаторов с обмотками 11 и 2, 12 и 2, ... ,

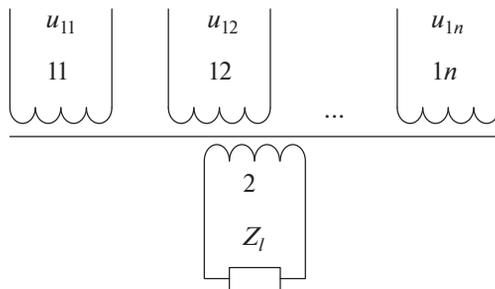


Рис. 2. Электрическая схема $(n + 1)$ – обмоточного трансформатора.

1*n* и 2 (далее будем обозначать эти трансформаторы как 11-2, 12-2, ... 1*n*-2). Преимуществом этого представления является возможность использовать классические уравнения двухобмоточного трансформатора, основанные на понятиях об основном магнитном потоке и магнитном потоке рассеяния. Запишем эти уравнения для двух произвольных двухобмоточных трансформаторов 1*p*-2 и 1*m*-2, входящих в состав исследуемого многообмоточного трансформатора, когда все первичные обмотки кроме одной разомкнуты. Уравнения двухобмоточного трансформатора 1*p*-2 (все остальные первичные обмотки разомкнуты) имеют вид [4]:

$$\begin{cases} u_{1p} = d\Psi_{1p}/dt + r_{1p}i_{1p} + w_{1p}d\Phi_0/dt \\ -w_2d\Phi_0/dt = (r_{2p} + r_L)i_{2p} + d\Psi_{2p}/dt + i_{2p}r_L + L_L di_{2p}/dt, \end{cases} \quad (2)$$

где u_{1p} – напряжение, приложенное к первичной обмотке 1*p*, $\Psi_{1p} = L_{1p}i_{1p}$ – потокосцепление потока рассеяния первичной обмотки 1*p*, L_{1p} , r_{1p} – индуктивность рассеяния и активное сопротивление первичной обмотки 1*p*, $\Psi_{2p} = L_2i_{2p}$ – потокосцепление потока рассеяния вторичной обмотки, L_2 , r_2 – индуктивность рассеяния и активное сопротивление вторичной обмотки 2, L_L – индуктивность нагрузки трансформатора, r_L – активное сопротивление нагрузки, Φ_0 – основной магнитный поток, возбуждаемый обмоткой 1*p*.

Уравнения двухобмоточного трансформатора 1*m*-2 (все остальные обмотки разомкнуты) имеют вид:

$$\begin{cases} u_{1m} = d\Psi_{1m}/dt + r_{1m}i_{1m} + w_{1m}d\Phi_0/dt \\ -w_2d\Phi_0/dt = (r_2 + r_L)i_{2m} + d\Psi_{2m}/dt + i_{2m}r_L + L_L di_{2m}/dt, \end{cases} \quad (3)$$

где u_{1m} – напряжение, приложенное к первичной обмотке 1*m*, $\Psi_{1m} = L_{1m}i_{1m}$ – потокосцепление потока рассеяния первичной обмотки 1*m*, L_{1m} , r_{1m} – индуктивность рассеяния и активное сопротивление первичной обмотки 1*m*, $\Psi_{2m} = L_2i_{2p}$ – потокосцепление потока рассеяния вторичной обмотки.

Для получения уравнений многообмоточного трансформатора рассмотрим сначала режим его работы, в котором первичная обмотка 1*p* подключена к источнику напряжения u_{1p} , другая первичная обмотка 1*m* подключена к источнику напряжения u_{1m} , вторичная обмотка подключена к нагрузке, а остальные первичные обмотки разомкнуты. В этом режиме исследуемый многообмоточный трансформатор представляет собой трехобмоточный трансформатор с обмотками 1*p*, 1*m*, 2, так как эти двухобмоточные трансформаторы имеют общую вторичную обмотку. В [13] получены уравнения и схема замещения трехобмоточного трансформатора, основным отличием которых от классической трехлучевой схемы [4] являются дополнительные ЭДС на зажимах обмоток трансформаторов. В [13] рассмотрен трансформатор, имеющий одну

первичную и две вторичные обмотки, поэтому уравнения приведены к вторичным обмоткам. Используем этот подход для записи уравнений, когда трансформатор имеет две первичные и одну вторичную обмотки. В этом случае аналогично [13] напряжение на первичных обмотках $1m$ и $1p$ можно представить в виде:

$$u_{1m} = \left(L_{1m-2} + L'_{Lm} \right) di_{1m}/dt + \left(r_{1m-2} + r'_{Lm} \right) i_m + (r_2 + r_L) k_m k_p i_{1p} + M_{1m,1p,2} di_{1p}/dt, \quad (4)$$

$$u_{1p} = \left(L_{1p-2} + L'_{Lp} \right) di_{1p}/dt + \left(r_{1p-2} + r'_{Lp} \right) i_p + (r_2 + r_L) k_m k_p i_m + M_{1m,1p,2} di_m/dt, \quad (5)$$

где $L_{1m-2} = L_{1m} + k_m^2 L_2$ – индуктивность короткого замыкания (рассеяния) трансформатора $1m-2$, $r_{1m-2} = r_{1m} + k_m^2 r_2$ – активное сопротивление короткого замыкания трансформатора $1m-2$, $L'_{Lm} = L_L k_m^2$, $r'_{Lm} = r_L k_m^2$ – индуктивность и активное сопротивление нагрузки, приведенные к первичной обмотке $1m$, $L_{1p-2} = L_{1p} + k_p^2 L_2$ – индуктивность короткого замыкания трансформатора $1p-2$, $r_{1p-2} = r_{1p} + k_p^2 r_2$ – активное сопротивление короткого замыкания трансформатора $1p-2$, $L'_{Lp} = L_L k_p^2$, $r'_{Lp} = r_L k_p^2$ – индуктивность и активное сопротивление нагрузки, приведенные к первичной обмотке $1p-2$, $M_{1m,1p,2}$ – коэффициент взаимной индукции по потокам рассеяния трансформаторов $1p-2$, $1m-2$.

Все параметры в (4), (5) приведены к своим первичным обмоткам. Из уравнений (4), (5) видно, что вследствие взаимного влияния двух двухобмоточных трансформаторов напряжения на зажимах первичных обмоток содержат дополнительные по сравнению с классическими уравнениями двухобмоточных трансформаторов слагаемые. Эти дополнительные слагаемые в (4) $(r_2 + r_L) k_m k_p i_{1p} + M_{1m,1p,2} di_{1p}/dt$ и в (5) $(r_2 + r_L) k_m k_p i_m + M_{1m,1p,2} di_m/dt$ определяются дополнительными ЭДС, которые являются результатом взаимного влияния двухобмоточных трансформаторов $1p-2$, $1m-2$. Первое слагаемое в этих выражениях обусловлено падением напряжения на общей вторичной обмотке трансформаторов. Второе слагаемое определяется дополнительной ЭДС на зажимах первичных обмоток, которое учитывает взаимное влияние магнитных полей рассеяния трансформаторов, что формально привело к связи между собой приведенных к первичным обмоткам индуктивностей короткого замыкания указанных трансформаторов путем взаимной индукции. В [7] получены две формулы для расчета и измерения коэффициента взаимной индукции по потокам рассеяния. Первая формула вытекает из физического смысла взаимной индуктивности:

$$M_{1m,1p,2} = \frac{L_{(1m+1p)-2} - L_{1m-2} - L_{1p-2}}{2}, \quad (6)$$

где $L_{(1m+1p)-2}$ – индуктивность рассеяния двухобмоточного трансформатора с последовательно соединенными первичными обмотками $1m$ и $1p$ и вторичной обмоткой 2 (трансформатор $(1m + 1p) - 2$). Другая формула основана на сопоставлении новой схемы замещения трехобмоточного трансформатора и классической трехлучевой схемы трехобмоточного трансформатора:

$$M_{1m,1p,2} = \frac{L_{1m-2} + L_{1p-2} - L_{1m-1p}}{2}, \quad (7)$$

где L_{1m-1p} – индуктивность рассеяния трансформатора $1m-1p$.

Уравнениям (4), (5) можно поставить в соответствие электрическую схему, в которой имеются два не связанных между собой замкнутых контура. В каждом контуре по-

следовательно соединены резистор, катушка, независимый и зависимый источники ЭДС. Катушки связаны между собой через магнитное поле рассеяния.

Воспользуемся уравнениями (4), (5) для получения уравнений n -обмоточного трансформатора, когда токи протекают во всех его обмотках. В этом случае мы имеем n – двухобмоточных трансформаторов с одной общей вторичной обмоткой, причем взаимодействие каждого из двух двухобмоточных трансформаторов будет определяться уравнениями трехобмоточного трансформатора. Согласно (4), (5) напряжение на каждой первичной обмотке будет зависеть от дополнительных ЭДС, вызванных полями рассеяния других трансформаторов и падением напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки и нагрузки трансформатора. Тогда система уравнений трансформатора будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 u_{11} &= \left(L_{11-2} + L'_{L1} \right) \frac{di_{11}}{dt} + \left(r_{11-2} + r'_{L1} \right) i_{11} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n M_{11,i,2} \frac{di_i}{dt} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n (r_2 + r_L) k_j k_i i_i, \\
 u_{12} &= \left(L_{12-2} + L'_{L2} \right) \frac{di_{12}}{dt} + \left(r_{12-2} + r'_{L2} \right) i_{12} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n M_{12,i,2} \frac{di_i}{dt} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n (r_2 + r_L) k_j k_i i_i, \\
 &\dots\dots\dots \\
 u_{1n} &= \left(L_{1n-2} + L'_{Ln} \right) \frac{di_{1n}}{dt} + \left(r_{1n-2} + r'_{Ln} \right) i_{1n} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n M_{1n,i,2} \frac{di_i}{dt} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n (r_2 + r_L) k_j k_i i_i,
 \end{aligned} \tag{8}$$

В комплексной форме систему уравнений (8) можно представить в виде:

$$\dot{U}_{1i} = j\omega \left(L_{1i-2} + L'_{Li} \right) \dot{I}_{1i} + \left(r_{1i-2} + r'_{Li} \right) \dot{I}_{1i} + j\omega \sum_{\substack{l=1 \\ i \neq l}}^n M_{1i,l,2} \dot{I}_{1l} + \sum_{\substack{l=1 \\ i \neq l}}^n (r_2 + r_L) k_l k_i \dot{I}_{1l}, \tag{9}$$

где i изменяется от 1 до n , \dot{U}_{1i} – напряжение на зажимах обмотки $1i$, L_{1i-2} – индуктивность короткого замыкания трансформатора $1i-2$, r_{1i-2} – активное сопротивление короткого замыкания трансформатора $1i-2$, L'_L – индуктивность нагрузки, приведенная к обмотке $1i$, r'_L – активное сопротивление нагрузки, приведенное к обмотке $1i$, $k_i = w_{1i}/w_2$, $k_l = w_{1l}/w_2$, w_{1i} и w_{1l} – коэффициенты трансформации обмоток $1i$, $1l$.

Эквивалентная схема, соответствующая системе уравнений (9), содержит столько не связанных между собой замкнутых контуров, сколько секций содержит первичная обмотка. В каждом контуре имеются последовательно соединенные независимый источник ЭДС, катушка индуктивности, резистор и $(n - 1)$ – зависимый источник напряжения. Все катушки индуктивно связаны между собой.

Все параметры схемы можно найти из опытов короткого замыкания двухобмоточных трансформаторов, входящих в исследуемый многообмоточный трансформатор. Для расчета этих параметров можно использовать аналитические или численные методы расчета режима противовключения двухобмоточного трансформатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИЗМЕРЕНИЯ

На рис. 3а показано поперечное сечение, проходящее через вертикальную ось трансформатора для сварки труб диаметром 1420 мм (без гибких шин). Первичная обмотка 1 имеет три параллельно соединенных секции, вторичную обмотку 3 и тороидальный магнитопровод 2. На рис. 3б показано поперечное сечение, проходящее через плоскость АА, расположение которой показано на рис. 3а. Обмотки и магнитопровод на рис. 3б имеют те же номера, что и на рис. 3а. Каждая секция первичной обмотки представляет

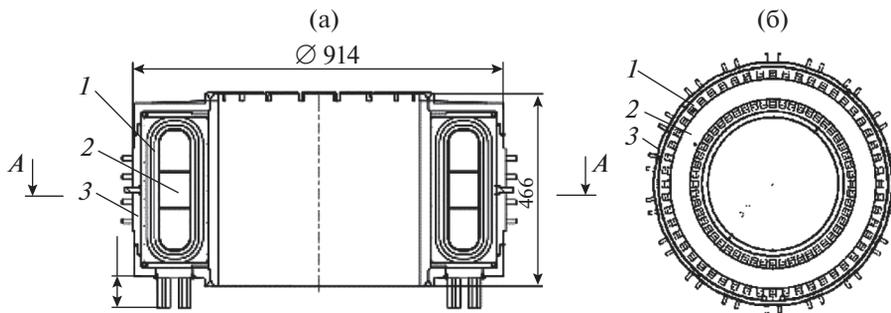


Рис. 3. Поперечное сечение трансформатора.

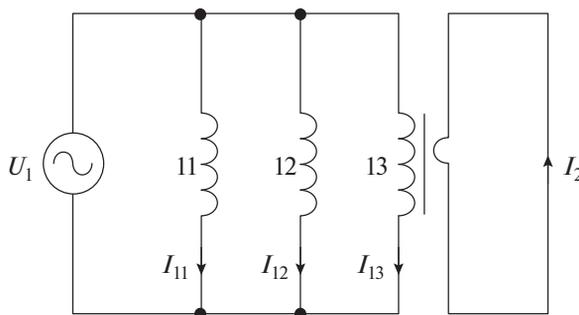


Рис. 4. Электрическая схема сварочного трансформатора.

собой катушку из литцендрата с прямоугольным сечением $20 \times 9 \text{ мм}^2$. Внешний диаметр первичной обмотки составляет 843 мм, внешний диаметр вторичной обмотки составляет 916 мм. Первичная обмотка имеет 52 витка, вторичная обмотка – один виток. На трансформатор подается синусоидальное напряжение $U_1 = 380 \text{ В}$, частота составляет $f = 50 \text{ Гц}$. В номинальном режиме длительный ток в первичной обмотке составляет 1442 А. Электрическая схема соединения секций первичной обмотки трансформатора при коротком замыкании показана на рис. 4.

Рассмотрим режим короткого замыкания трансформатора, поскольку он близок к режиму короткого замыкания исследуемого трансформатора. Все секции первичной обмотки трансформатора подключены к одному источнику напряжения U_1 и имеют одинаковое количество витков, следовательно, систему уравнений (9) можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= j\omega L_{1-2} \dot{I}_{11} + r_{1-2} \dot{I}_{11} + j\omega M_{11,12,2} \dot{I}_{12} + j\omega M_{11,13,2} \dot{I}_{13} + r_2 k^2 \dot{I}_{12} + r_2 k^2 \dot{I}_{13}, \\
 U_1 &= j\omega L_{1-2} \dot{I}_{11} + r_{1-2} \dot{I}_{12} + j\omega M_{11,12,2} \dot{I}_{11} + j\omega M_{12,13,2} \dot{I}_{13} + r_2 k^2 \dot{I}_{11} + r_2 k^2 \dot{I}_{13}, \\
 U_1 &= j\omega L_{1-2} \dot{I}_{13} + r_{1-2} \dot{I}_{13} + j\omega M_{11,13,2} \dot{I}_{11} + j\omega M_{12,13,2} \dot{I}_{12} + r_2 k^2 \dot{I}_{11} + r_2 k^2 \dot{I}_{12},
 \end{aligned} \quad (10)$$

где $k = k_{11} = k_{12} = k_{13}$.

Эквивалентная схема, соответствующая этим уравнениям, показана на рис. 5.

Все параметры двухобмоточных трансформаторов в системе (10) найдены путем расчета режима противовключения соответствующих двухобмоточных трансформато-

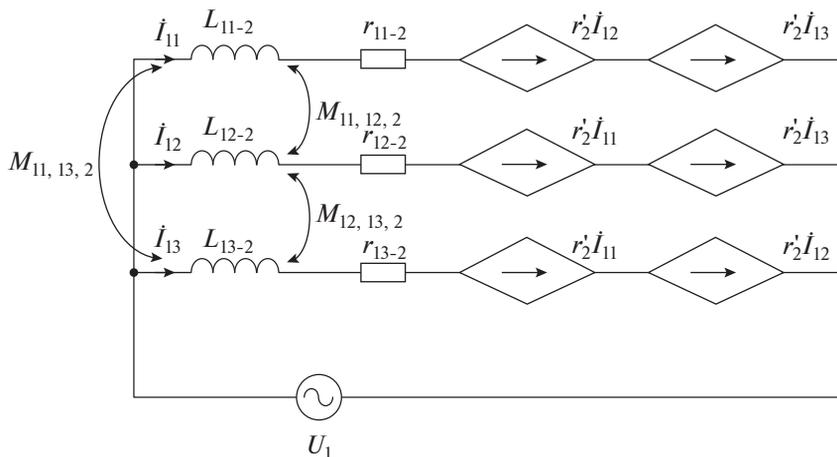


Рис. 5. Схема замещения трансформатора (r_2' – сопротивление вторичной обмотки, приведенное к одной секции первичной обмотки).

ров и измерений в опытах короткого замыкания этих трансформаторов. Опыты проводились при напряжении на первичной обмотке 24.8 В. Поскольку благодаря выполнению первичной обмотки трансформатора из литцендрата поверхностный эффект в ней отсутствует, все индуктивности и взаимные индуктивности в (10) найдены с помощью 2D моделирования магнитостатических полей двухобмоточных трансформаторов методом конечных элементов [20]. Магнитостатическое поле рассчитывалось в сечении на рис. 3б. Выбор этого сечения позволяет учитывать наиболее важные геометрические параметры трансформатора, влияющие на индуктивность рассеяния. В связи с тем, что геометрия конструкции не зависит от угловых координат, расчетная модель представляет собой сектор, который соответствует 1/52 поперечного сечения на рисунке 3б. Результаты расчета параметров системы (10) приведены в таблицах 1, 2 в Оммах.

Разница между результатами расчета и измерений параметров, входящих в систему (10) составляет до 20%. Эта разница объясняется допущением о двумерном характере магнитного поля трансформатора. Токи в секциях первичной обмотки измерялись токоизмерительными клещами АК ИП-2301. Сопоставление результатов расчета и измерения даны в табл. 3.

Разница между расчетными и измеренными значениями токов не превышает 20%. При подстановке в систему (10) параметров, найденных из опытов короткого замыка-

Таблица 1. Индуктивные сопротивления в схеме замещения

ωL_{12-2}	ωL_{12-2}	ωL_{13-2}	$\omega M_{11-2, 12-2}$	$\omega M_{13-2, 12-2}$	$\omega M_{11-2, 13-2}$
0.021	0.016	0.0086	0.0152	0.00952	0.0095

Таблица 2. Активные сопротивления в схеме замещения

r_{11-2}	r_{12-2}	r_{13-2}	r_2'
0.078	0.078	0.078	0.018

Таблица 3. Токи в секциях первичной обмотки

	I_{11} , А	I_{12} , А	I_{13} , А
Измерение	390	212	201
Расчет	448	244	221

ния двухобмоточных трансформаторов, погрешность расчета токов в секциях первичной обмотки с использованием системы уравнений (10) уменьшается до 5%. Кроме того, расчет токов в секциях первичной обмотки был выполнен с использованием известной схемы замещения четырехобмоточного трансформатора [4] (при расчете использовались измеренные параметры короткого замыкания двухобмоточных трансформаторов). Результаты расчета токов с использованием известной и новой схемы замещения совпадают, что подтверждает ее эффективность.

ВЫВОДЫ

1. Разработана новая схема замещения многообмоточного трансформатора, которая отличается от известных схем более простой топологией. Все параметры этой схемы имеют физический смысл, что упрощает поиск эффективных схем соединения обмоток трансформатора.

2. Использование новой схемы замещения позволило рассчитать токи в параллельно соединенных секциях первичной обмотки сварочного трансформатора, входящего в комплекс для контактной сварки труб большого диаметра. Эти токи являются исходными данными для дальнейшего расчета теплового режима трансформатора.

3. Достоверность результатов расчета токов в секциях первичной обмотки трансформатора с использованием новой схемы замещения многообмоточного трансформатора подтверждена результатами измерений и расчетами, выполненными с использованием известной схемы замещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоменко В.И., Теренин А.Н., Кучук-Яценко С.И., Швец Ю.И. Контактная стыковая сварка оплавлением современных трубопроводов большой мощности. Журнал нефтегазового строительства. 2014. № 3. С. 52–58.
2. Хоменко В.И., Вышемирский Е.М., Беспалов В.И., Артеменко Т.В., Хомиченко С.А., Близов Д.А., Кривцов Э.Р. Комплексный подход к созданию оборудования и разработке технологии контактной сварки оплавлением, формированию требований к свойствам сварных соединений высокопрочных толстостенных труб нового поколения. Наука и техника в газовой промышленности. 2012. № 4. С. 33–41.
3. Хоменко В.И., Кучук-Яценко С.И., Швец Ю.И., Загадарчук В.Ф., Швец В.И., Хоменко В.И., Журавлев С.И., Сударкин А.Я. Технология контактной сварки оплавлением толстостенных труб из высокопрочных сталей класса К56 и механические свойства сварных соединений. Журнал нефтегазового строительства. 2013. № 1. С. 17–21.
4. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. М: Энергия, 1974. 192 с.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
6. Margueron X., Besi A., Lembeye Y, Keradec J.P. Current sharing between parallel turns of a planar transformer: prediction and improvement using a circuit simulation software”, IEEE Trans. on Industry Application, 2010. V. 46. № 3. P. 1064–1071.
7. Margueron X., Keradec J-P. Design of equivalent circuits and characterization strategy for n-input coupled inductors, IEEE Trans. on Ind. and Applications. 2007. V. 43. № 1. P. 14–22.
8. Margueron X., Keradec J-P. Identifying the magnetic part of the equivalent circuit of n-winding transformers. IEEE Trans. on Ins. And measurement. 2007. V. 56. № 1. P. 146–152.
9. Margueron X., Keradec J.-P. Analytical calculation of leakage inductances of HF transformers using PEES formulas, IEEE Trans. on Ind. Applications. 1996. V. 43. № 4. P. 884–892.
10. Margueron X., Keradec J-P. “Design of equivalent circuits and characterization strategy for n-input coupled inductors”, IEEE Trans. on Ind. and Applications. 2007. V. 43. № 1. P. 14–22.

11. *Del Vecchio R.M., Poulin B., Feghali P.T., Shah D.M., Ahuja R.* (2010). Transformer design principles: with applications to core-form power transformers. CRC press.
12. *Шакиров М.А.* 2Т-образные схемы замещения трансформатора // Электричество. 2010. № 5. С. 19–36.
13. *Sakhno L.I.* An investigations of double-bridge rectifiers with steeply falling external characteristics for supplying an electric arc. Electrical Technology Russia. 2002. № 1. P. 96–104.
14. *Sakhno L.I.* Two-bridge welding rectifiers with single-phase transformers with a three-rod magnetic system. Welding International. 2003. V. 17(7). P. 565–569.
15. *Sakhno L., Dubitskiy S., Valkov V., Zaryvaev R.* Using the finite element method for calculating transformers for resistance welding machines Welding International. 2017. V. 31. № 1. P. 58–63.
16. *Сахно Л.И., Сахно О.И., Федоров П.Д., Радомский Ю.В.* Разработка схемы замещения инверторного источника питания машины контактной сварки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 91–100.
17. *Сахно Л.И., Сахно О.И., Федоров П.Д., Радомский Ю.В.* Влияние трансформатора на электропотребление инверторного источника питания машины контактной сварки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 181–190.
18. *Sakhno L., Sakhno O., Likhachev D., Fedorov P.* Field-Circuit Modelling of the Resistance Spot Welding Transformers // Electrical review (Przegląd Elektrotechniczny). 2017. № 8. P. 142–145.
19. ЗАО “Псковэлектросвар” info@pskovelectrosvar.ru
20. *Claycomb J.R.* Applied Electromagnetics Using QuickField and MATLAB. – Laxmi Publications, Ltd. 2010.

Calculation of Currents in Windings of Transformer for Butt Welding of Gas Pipelines

L. I. Sakhno^{a,*}, O. I. Sakhno^a, and M. S. Krylov^a

^a*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

**e-mail: lsahno2010@yandex.ru*

Power toroidal transformers for flash butt welding of gas pipelines are considered. The primary windings of such transformers are made of stranded copper wires and have several sections connected in parallel. To calculate the currents in the sections of the primary winding, a new equivalent multi-winding transformer circuit is used, based on the classical theory of transformers. It differs from the known equivalent circuits in a simpler topology. All circuit parameters have a clear physical meaning. The proposed equivalent circuit made it possible to use the magnetostatic formulation of the FEM for calculating currents in sections of the transformer primary winding. The calculation results are confirmed by the measurement results.

Keywords: butt welding, multi-winding power transformer, equivalent circuit, short-circuit test, magnetic leakage field