



DOI: 10.18721/JEST.230209

УДК 812.35.17.11

Л.И. Сахно¹, О.И. Сахно², П.Д. Федоров³, Ю.В. Радомский⁴

1, 2, 4 — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация
3 — ОАО «Технолог-С», Санкт-Петербург, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ИНВЕРТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ МАШИНЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

В работе рассматриваются инверторные источники питания машин контактной сварки, которые имеют выходной выпрямитель со средней точкой. Частота инвертора изменяется от 1000 Гц до 10 кГц. Дана схема замещения этого источника, которая позволяет исследовать влияние электромагнитных параметров трансформатора на полную мощность источника, потребляемую из сети, КПД, сварочный ток. Такая схема необходима для разработки экономичных источников питания для сварки деталей из циркония, титана, радиационно-стойких сталей. В схеме замещения источника используется схема замещения трехобмоточного трансформатора, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с классической трехлучевой. Трехобмоточный сварочный трансформатор замещается двумя двухобмоточными, но, в отличие от известных работ, в которых используется такой подход, учтено взаимное влияние магнитных полей рассеяния этих двухобмоточных трансформаторов на электромагнитные процессы в источнике. Разработана методика расчета частотных зависимостей электромагнитных параметров трехобмоточного сварочного трансформатора, входящих в схему замещения, и исследовано влияние частоты на них. Эффективность разработанной схемы замещения источника проверена экспериментально.

КОНТАКТНАЯ СВАРКА; ИНВЕРТОР; ТРЕХОБОМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР; СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ; МАГНИТНОЕ ПОЛЕ РАССЕЯНИЯ; КОЭФФИЦИЕНТ МАГНИТНОЙ СВЯЗИ ПО ПОТОКАМ РАССЕЯНИЯ.

Ссылка при цитировании:

Л.И. Сахно, О.И. Сахно, П.Д. Федоров, Ю.В. Радомский. Разработка схемы замещения инверторного источника питания машины контактной сварки. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 91–100. DOI: 10.18721/JEST.230209

L.I. Sakhno¹, O.I. Sakhno², P.D. Fedorov³, Yu.V. Radomsky⁴

1, 2, 4 — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation
3 — Closed joint-stock company «Technolog-S», Saint-Peterburg, Russian Federation

DEVELOPMENT OF EQUIVALENT CIRCUIT OF HIGH FREQUENCY RESISTANCE SPOT WELDING SYSTEMS

The paper considers high-frequency resistance spot welding systems. These systems have full-wave center-tapped output rectifiers. The frequency varies from 1000 Hz to 10 kHz. The paper presents an equivalent circuit for these systems, which allows to investigate the influence of electromagnetic parameters of the transformer on power consumption, on the efficiency, and on the welding current. This circuit is necessary to create low-cost power sources for welding the parts made of zirconium, titanium, or radiation-resistant steels. The equivalent circuit of three-winding transformers is used, which has a number of advantages compared to the classical equivalent circuit. The three-winding welding transformer is replaced by two two-winding ones. We take into account the mutual influence of the magnetic leakage fields of these two-winding transformers on electromagnetic processes in the resistance spot systems. The study of the transformer's parameters includes both 2D eddy-current FEA analysis for estimating the leakage impedance and the circuit simulation, which gives the output current power consumption. The effectiveness of the developed equivalent circuit of the source was tested experimentally.

SPOT WELDING; INVERTOR; THREE-WINDING TRANSFORMER; EQUIVALENT CIRCUIT; MAGNETIC LEAKAGE FIELD; MAGNETIC COUPLING FACTOR FOR THE LEAKAGE FLUXES.

Citation:

L.I. Sakhno, O.I. Sakhno, P.D. Fedorov, Yu.V. Radomsky, Development of equivalent circuit of high frequency resistance spot welding systems, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (02) (2017) 91–100, DOI: 10.18721/JEST.230209

Введение

Инверторные источники питания повышенной частоты на базе выпрямителя со средней точкой находят широкое применение в машинах контактной сварки, причем наибольшее распространение получили источники с частотой инвертора 1000 Гц [1]. По сравнению с источниками питания промышленной частоты они обеспечивают уменьшение массы и габаритов сварочного трансформатора, входящего в источник питания, и расширение технологических возможностей машины. Создание таких источников питания актуально для сварки в приборостроении, электронной промышленности, атомной энергетике, автомобилестроении.

Однако при увеличении частоты увеличивается полная мощность, потребляемая источником из сети, и уменьшается его КПД, так как увеличивается полное сопротивление сварочного трансформатора, которое превышает сопротивление нагрузки источника. Увеличение полной мощности, потребляемой из сети, приводит к увеличению платы за электроэнергию при проведении сварочных работ, что увеличивает стоимость изготавливаемых деталей. Для создания экономичных источников питания с частотой 1000–10000 Гц для сварки деталей из циркония, титана, радиационно-стойких сталей необходимо исследовать влияние электромагнитных параметров сварочных трансформаторов на электропотребление источника и разработать способы его снижения. Для решения этой задачи необходимо иметь схему замещения инверторного источника питания. Обычно в схеме замещения инверторного источника на базе выпрямителя со средней точкой трехобмоточный сварочный трансформатор замещается двумя двухобмоточными [1–7]. Однако взаимное влияние магнитных полей рассеяния этих двухобмоточных трансформаторов на электромагнитные процессы в источнике не учитывается. В публикациях отсутствует ин-

формация о роли этого влияния на электромагнитные процессы в инверторном источнике питания машины контактной сварки. В связи с этим нашей целью было предложить схему замещения инверторного источника питания, учитывающую взаимное влияние полей рассеяния двухобмоточных трансформаторов, которые входят в трехобмоточный сварочный трансформатор, и позволяющую исследовать полную мощность источника, потребляемую из сети, КПД, сварочный ток. Кроме того, необходимо было разработать методику расчета частотных зависимостей электромагнитных параметров трехобмоточного сварочного трансформатора, входящих в схему замещения, и исследовать влияние частоты на них. Эффективность разработанной схемы замещения источника должна быть проверена экспериментально.

Методика проведения исследования

Принципиальная схема источника питания включает: сетевой трехфазный выпрямитель, емкостной фильтр выпрямителя, инвертор, трехобмоточный трансформатор с первичной обмоткой 1 и двумя вторичными обмотками (2, 3), соединенными последовательно и согласно, однофазный выпрямитель со средней точкой и активно-индуктивную нагрузку.

При разработке схемы замещения не учитывались электромагнитные процессы в сетевом трехфазном выпрямителе и фильтре выпрямителя, поскольку они хорошо известны. Инвертор замещен источником знакопеременной ЭДС e , которая на каждом полупериоде имеет форму прямоугольника или трапеции с заданным значением отношения T_1/T (T_1 — время действия импульса ЭДС; T — период ЭДС). Период изменения этой ЭДС — $T = 1/f$, где f — частота инвертора. Нагрузка трансформатора представляет собой индуктивность, активное сопротивление контура, образованного шинами,

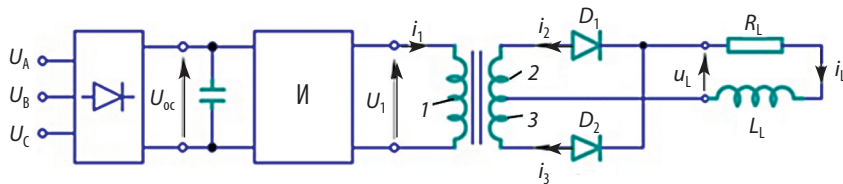


Рис. 1. Принципиальная схема инверторного источника питания

Fig. 1. Schematic diagram inverter power supply

подводящими ток к точке сварки, и активное сопротивление материала в месте сварки.

Особенность режима работы трехобмоточного трансформатора в инверторном источнике питания с выпрямителем со средней точкой состоит в том, что ток проходит по первичной обмотке и либо по одной вторичной обмотке, либо по обеим вторичным обмоткам, когда происходит коммутация диодов D_1 и D_2 (рис. 1). Обычно при расчете токов и напряжений в выпрямителе со средней точкой используется схема замещения, в которой последовательно с диодом D_1 включаются индуктивность рассеяния L_{12}'' и активное сопротивление R_{12}'' трансформатора с обмотками 1 и 2 (в дальнейшем трансформатор 1–2), приведенными к обмотке 2, а последовательно с диодом D_2 включаются индуктивность рассеяния L_{13}'' и активное сопротивление R_{13}'' трансформатора с обмотками 1 и 3 (в дальнейшем трансформатор 1–3). При этом не учитывается взаимное влияние полей рассеяния трансформаторов 1–2 и 1–3 на токи в их обмотках [1–7].

Для того чтобы схема замещения содержала стандартные элементы при компьютерном моделировании, используется схема замещения трехобмоточного трансформатора, предложенная в [8, 9]. Отличие этой схемы от классической трехлучевой [10–12] — в отсутствии электрической связи между первичной 1 и вторичными 2, 3 обмотками, а также в отсутствии возможности получения отрицательных активных сопротивлений. Наличие отрицательных активных сопротивлений делает невозможным применение классической схемы замещения в стандартных программах расчета электрических цепей. В то же время эта схема, как и классическая, учитывает взаимное влияние полей рассеяния двухобмоточных трансформаторов 1–2 и 1–3. Кроме того, достоинством используемой в данной работе схемы является ясный физический смысл ее параметров.

Приведем некоторые сведения, поясняющие электромагнитные параметры в выбранной схеме замещения трансформатора, необходимые для дальнейшего анализа электропотребления инверторного источника. На рис. 2, а показана электрическая схема трехобмоточного трансформатора с первичной обмоткой 1 и двумя вторичными обмотками 2 и 3. Первичная обмотка подключена к источнику ЭДС e_1 , вторичные обмотки имеют ЭДС холостого хода e_{20} и e_{30} . Вторичные обмотки этого трансформатора подключены к своим нагрузкам, напряжения на которых равны $u_{нагр1}$, $u_{нагр2}$. Схема замещения основана на замене этого трансформатора двумя двухобмоточными трансформаторами 1–2 и 1–3, которые имеют между собой связь через магнитное поле рассеяния, характеризуемая взаимной индуктивностью M по потокам рассеяния. Взаимное влияние потоков рассеяния этих трансформаторов учитывается путем изменения ЭДС на разомкнутых зажимах вторичной обмотки одного трансформатора из-за протекания тока по обмоткам другого. Например, протекание тока по обмоткам трансформатора 1–2 изменяет ЭДС на зажимах вторичной обмотки трансформатора 1–3 за счет магнитного поля рассеяния трансформатора 1–2, линии которого пересекают витки вторичной обмотки 3. Эта ЭДС представляется в виде

$$e_M = -M \frac{di_2}{dt}, \quad (1)$$

где i_2 — ток в обмотке 2; M — взаимная индуктивность по потокам рассеяния трансформаторов 1–2 и 1–3.

ЭДС на разомкнутых зажимах обмотки 3 изменяется и за счет падения напряжения на первичной обмотке, которая является общей для обоих трансформаторов.

Уравнения трансформатора, в которых учтено изменение ЭДС на разомкнутых зажимах вторичных обмоток, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} e_{02} &= r_{12}'' i_2 + L_{12}'' \frac{di_2}{dt} + \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} i_3 + M \frac{di_3}{dt} + u_{\text{нагр}1}; \\ e_{03} &= r_{13}'' i_3 + L_{13}'' \frac{di_3}{dt} + \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} i_2 + M \frac{di_2}{dt} + u_{\text{нагр}2}, \end{aligned} \right\} (2)$$

где i_2, i_3 — токи в обмотках 2 и 3; e_{02}, e_{03} — ЭДС холостого хода обмоток 2 и 3; L_{12}'', r_{12}'' — индуктивность рассеяния и активное сопротивление трансформатора 1–2; L_{13}'', r_{13}'' — индуктивность рассеяния и активное сопротивление трансформатора 1–3 (параметры трансформаторов 1–2 и 1–3 приведены к своим вторичным обмоткам); r_1 — активное сопротивление первичной обмотки; $k_{12} = \frac{w_1}{w_2}, k_{13} = \frac{w_1}{w_3}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов 1–2 и 1–3; w_1, w_2, w_3 — количество витков первичной и вторичных обмоток; $u_{\text{нагр}1}$ напряжение на нагрузке обмотки 2; $u_{\text{нагр}2}$ напряжение на нагрузке обмотки 3.

Схема замещения, соответствующая уравнениям (2), изображена на рис. 2, б. На этом рисунке показаны две электрически не связанные между собой схемы замещения двухобмоточных трансформаторов 1–2 и 1–3, параметры которых приведены к вторичным обмоткам. От известных схем замещения двухобмоточных трансформаторов схемы на рис. 2, б отличаются наличием зависимых источников напряжения e_2, e_3 . Кроме того, индуктивности рассеяния двухобмоточных трансформаторов индуктивно связаны между собой.

При выводе уравнений (1) принято, что если коэффициент взаимной индукции $M > 0$, то магнитный поток рассеяния трансформатора с обмотками 1–2, сцепляющийся с обмоткой 3, на-

правлен встречно основному магнитному потоку в этой обмотке. Это приводит к уменьшению результирующей ЭДС на разомкнутых зажимах обмотки 3 и уменьшению тока в ней при подключении ее к нагрузке. Формально это означает, что индуктивности рассеяния в схеме замещения трансформатора соединены согласно.

При $M < 0$ указанный поток рассеяния и основной поток направлены согласно, следовательно, результирующая ЭДС на зажимах разомкнутой обмотки 3 увеличивается, что приводит к увеличению результирующей ЭДС на зажимах разомкнутой обмотки 3 и увеличению тока в ней при подключении ее к нагрузке. Формально это означает, что индуктивности рассеяния в схеме замещения соединены встречно.

Аналогично при $M > 0$ магнитный поток рассеяния трансформатора с обмотками 1–3, сцепляющийся с обмоткой 2, направлен встречно с основным магнитным потоком в этой обмотке, а при $M < 0$ — согласно. Взаимная индуктивность по потокам рассеяния определяется формулой [9,10]

$$M = \frac{L_{12}'' + L_{13}'' - L_{23}''}{2}, \quad (3)$$

где L_{23}'' — индуктивность рассеяния трансформатора 2–3.

Взаимная индуктивность трансформаторов 1–2 и 1–3 по потокам рассеяния характеризуется в Мисгосар коэффициентом связи $k = \frac{M}{\sqrt{L_{12}'' L_{13}''}}$.

Зависимый источник ЭДС $e_3 = \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} i_2$ в схеме на рис. 2, б (и в уравнениях (2)) учитывает изменение ЭДС на зажимах обмотки 3 за счет падения напряжения на первичной обмотке

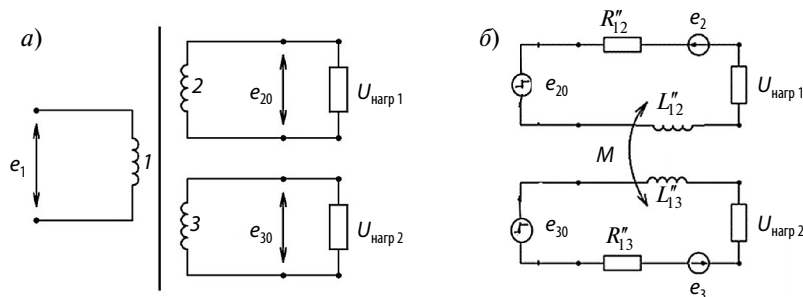


Рис. 2. Трехобмоточный трансформатор (а) и его схема замещения (б)

Fig. 2. Three-winding transformer (a) and replacement scheme (b)

двухобмоточного трансформатора 1–2. Аналогично зависимый источник $e_2 = \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} i_3$ учитывает изменение ЭДС на зажимах обмотки 2 за счет падения напряжения на первичной обмотке двухобмоточного трансформатора 1–3.

Уравнение (2) и соответствующая ему схема замещения на рис. 2, б, содержащая только источники ЭДС e_{02} , e_{03} , вполне достаточны для расчета сварочного тока. Однако в данной работе необходимо исследовать мощность, потребляемую источником:

$$S = U_1 I_1, \quad (4)$$

где U_1 , I_1 — действующие значения первичных напряжения и тока.

Поэтому для исследования электропотребления инверторного источника питания в схему замещения на рис. 2, б введен идеальный трехобмоточный трансформатор, который позволяет найти действующие значения первичных тока и напряжения. Он имеет коэффициенты трансформации $k_{12} = \frac{w_1}{w_2}$ и $k_{13} = \frac{w_1}{w_3}$, которые формируют напряжения холостого хода вторичных обмоток e_{02} и e_{03} .

Схема замещения трехобмоточного трансформатора с идеальным источником напряжения показана на рис. 3. Введение идеального трехобмоточного трансформатора отличает ее от схемы замещения на рис. 2, б, которая использовалась в [8, 9].

Схема замещения трансформаторно-выпрямительного блока инверторного источника питания машины контактной сварки с учетом рассмотренной схемы замещения трехобмоточного трансформатора показана на рис. 4. Параметры L_{12} , R_{12} , L_{13} , R_{13} на рис. 4 представляют собой индуктивности рассеяния и активные сопротивления короткого замыкания трансформаторов 1–2 и 1–3, приведенные к своим вторичным обмоткам. Параметр $K = \frac{M}{\sqrt{L_{12}L_{13}}}$ характеризует магнитную связь индуктивностей L_{12} и L_{13} .

Зависимый источник ЭДС Н1 учитывает изменение напряжения на зажимах обмотки 3 за счет падения напряжения на первичной обмотке двухобмоточного трансформатора 1–2, а зависимый источник Н2 — изменение напряжения на зажимах обмотки 2 за счет падения напряжения

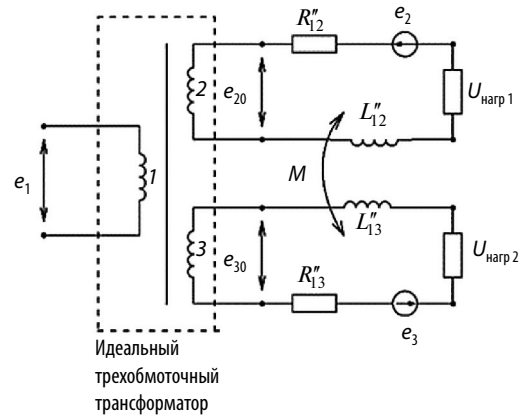


Рис. 3. Схема замещения трехобмоточного трансформатора для расчета энергопотребления инверторного источника

Fig. 3. Equivalent circuit of three-winding transformer for calculation of the power inverter source

на первичной обмотке двухобмоточного трансформатора 1–3. Нагрузка трансформатора представляет собой последовательно соединенную индуктивность L_L и активное сопротивление R_L сварочного контура, который образован шиной, подводящими ток к месту сварки. В сопротивление R_L входит активное сопротивление материала в месте сварки, которое составляет 100 мкОм.

Весьма важной проблемой при разработке схемы замещения трансформаторно-выпрямительного блока инверторного источника питания

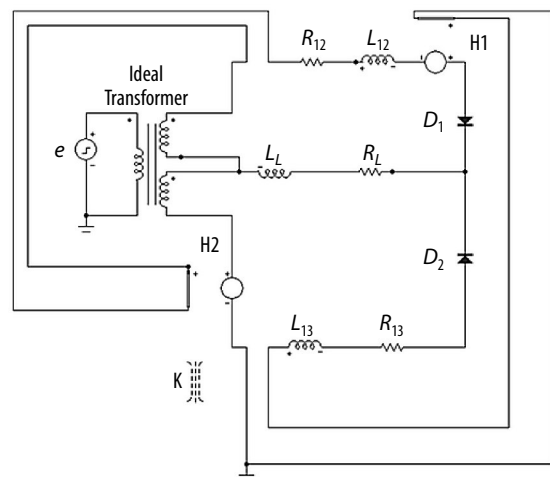


Рис. 4. Расчетная схема инверторного источника
Fig. 4. Design diagram of inverter source

машины контактной сварки является расчет электромагнитных параметров этой схемы. На рис. 5 показана конструкция трансформатора, типичная для машин контактной сварки. Она была создана для инверторного источника питания с частотой 1000 Гц и использовалась для разработки методики расчета электропотребления инверторного источника питания. Эти трансформаторы имеют витой разрезной броневой магнитопровод, первичную обмотку, состоящую из двух или нескольких последовательно соединенных дисковых катушек, и две вторичные дисковые обмотки. Конструкции трансформаторов могут отличаться количеством катушек первичной обмотки, формой трубок вторичной обмотки и чередованием катушек первичной и вторичной обмоток. Катушки первичной обмотки могут быть соединены параллельно между собой.

Трансформатор имеет четыре последовательно соединенные катушки первичной обмотки 1, 3, 4, 6, выполненные проводом прямоугольного сечения $1,5 \times 5 \text{ мм}^2$. Две вторичные обмотки 2, 5 соединены последовательно и согласно. Они изготовлены из медных трубок, через которые проходит охлаждающая вода. Первичная обмотка имеет 36 витков. Средняя длина витка составляет 0,317 м.

Для расчета активного и индуктивного сопротивлений сварочного контура и сопротивлений короткого замыкания трансформатора в данной работе используется комплекс программ ELCUT [13, 14], который позволяет рассчитывать двумерные квазистационарные электромагнит-

ные поля. При расчете учитывается первая гармоника частоты инвертора.

Рассчитывается двумерное, зависящее от координат X и Y , переменное магнитное поле рассеяния трансформатора (ось Y совпадает с линией OO_1 , ось X перпендикулярна оси Y) при заданной частоте. Расчетная модель трансформатора представляет собой половину сечения трансформатора на рис. 5. Это сечение с одной стороны ограничено линией OO_1 , с другой — полуокружностью с центром в середине линии OO_1 . Радиус этой окружности в 5 раз превышает половину линии OO_1 . На оси симметрии OO_1 и на искусственной границе (половине окружности) векторный потенциал равен нулю. Длина модели в направлении, перпендикулярном сечению трансформатора на рис. 5, равна средней длине витка обмоток. Источниками магнитного поля являются токи в обмотках в режиме противовключения. Например, для расчета сопротивления короткого замыкания трансформатора 1–2 рассматривается режим противовключения обмоток 1 и 2 [12]:

$$I_1 w_1 = -I_2 w_2. \quad (5)$$

Рассчитывается комплексный векторный магнитный потенциал \dot{A} , который имеет одну составляющую, перпендикулярную плоскости чертежа на рис. 5. Уравнение относительно векторного магнитного потенциала имеет вид [13]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \dot{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \dot{A}}{\partial y} \right) = \dot{I}_C + j\omega\gamma \dot{A} + j\omega\gamma \int_S \dot{A} ds, \quad (6)$$

где \dot{I}_C — сторонний ток в проводящей среде; μ — магнитная проницаемость; γ — удельная электрическая проводимость, $\omega = 2\pi f$.

При расчете импеданса трансформатора сторонний ток в первичной или вторичной обмотке является произвольным, но в другой обмотке должен удовлетворять уравнению (5). Для расчета активного сопротивления и индуктивности рассеяния, например трансформатора 1–2, приведенных к вторичной обмотке, необходимо знать суммарные потери в обмотках P и энергию магнитного поля W в расчетной области:

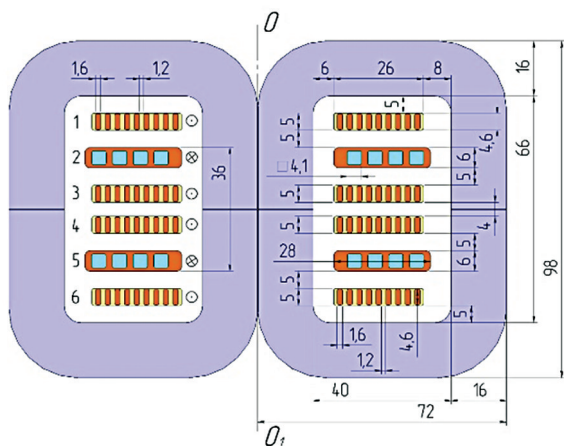


Рис. 5. Конструкция трансформатора

Fig. 5. Transformer design

Результаты расчета параметров трансформатора на рис. 5 для частот 1000 Гц и 10000 Гц

f , Гц	$L_{12}'' = L_{13}''$, нГн	L_{23} , нГн	M , нГн	K	$R_{12}'' = R_{13}''$, мкОм
1000	86,9	256	-41	-0,47	154
10000	65,1	187	-28,4	-0,43	547

$$R_{12}'' = \frac{P}{I_2^2}, \quad L_{12}'' = \frac{2W}{I_2^2}, \quad (7)$$

где I_2 — действующее значение тока во вторичной обмотке.

Определив индуктивности рассеяния трансформаторов $1-2$, $1-3$ и $2-3$, по формуле (3) находим взаимную индуктивность по потокам рассеяния и коэффициент связи магнитных полей рассеяния трансформаторов $1-2$ и $1-3$.

Из таблицы видно, что взаимная индуктивность по потокам рассеяния трансформаторов $1-2$ и $1-3$ отрицательна. Это значит, что магнитный поток рассеяния одного трансформатора, сцепляющийся с вторичной обмоткой другого, направлен согласно с основным магнитным потоком. Для иллюстрации на рис. 6, *а* показаны линии основного магнитного потока (режим холостого хода), а на рис. 6, *б* — линии магнитного потока рассеяния трансформатора $1-2$ (режим противовключения). Из этих рисунков видно, что основной поток и поток рассеяния трансформатора $1-2$, сцепляющиеся с обмоткой 3, направлены согласно (направления тока в первичной обмотке одинаковы для рис. 6, *а* и *б*).

Кроме того, расчеты показали, что трансформаторы $1-2$ и $1-3$ имеют достаточно высокую магнитную связь по потокам рассеяния. Следует отметить, что поверхностный эффект существенно влияет на параметры схемы замещения трансформатора. Результаты расчета сопротивлений короткого замыкания двухобмоточного трансформатора в диапазоне изменения частоты 1000–10000 Гц отличаются от результатов измерения измерителем иммитанса Е7–20 [16] не более чем на 10 %.

Схема замещения на рис. 4 использовалась для расчета токов, напряжений и электропотребления источника питания с трансформатором, показанном на рис. 4. Источник питания $e = 540$ В имеет прямоугольную форму на каждом полупериоде, время действия импульса ЭДС T_1 и период изменения ЭДС T совпадают. Индук-

тивности рассеяния трансформаторов $1-2$ и $1-3$ равны 80 нГн; активные сопротивления этих трансформаторов — 547 мкОм; активное сопротивление в цепи нагрузки — 100 мкОм, индуктивность в цепи нагрузки — 780 нГн, коэффициент связи равен -0,43. Для примера на рис. 7 приведены осциллограммы токов в обмотках трансформатора и в нагрузке, а на рис. 8 — осциллограмма тока в первичной обмотке при частоте 10 к Гц.

Измерения сварочного тока в этом источнике питания выполнены с помощью датчиков регистратора сварочных процессов РРС-4 производства фирмы «Электрик-Микс» [18]. Результаты расчета сварочного тока и полной мощности отличаются от результатов измерений не более, чем на 10 %.

Выводы

Разработана эффективная схема замещения инверторного источника питания машины контактной сварки, которая позволяет при расчете полной мощности источника, потребляемой

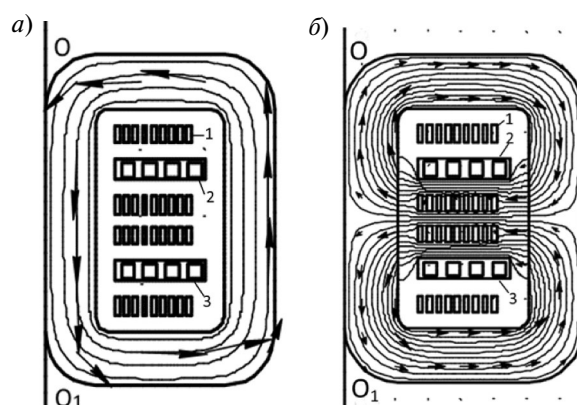


Рис. 6. Картины основного магнитного поля (*а*) и магнитного поля рассеяния трансформатора $1-2$ (*б*)

Fig. 6. Picture of the main magnetic field (*a*) and magnetic the stray field transformer $1-2$ (*b*)

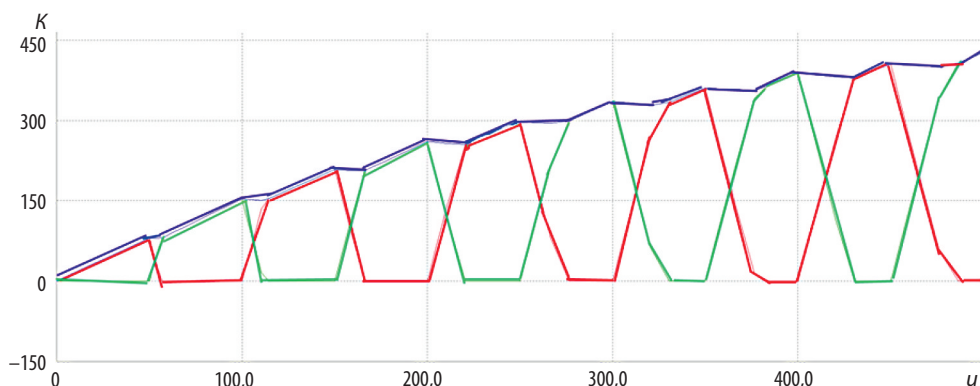


Рис. 7. Осциллограммы токов во вторичных обмотках трансформатора (красный, зеленый) и в нагрузке (синий)

Fig. 7. Wavetorms of currents in the secondary windings of the transformer (red, green) and stress (blue)

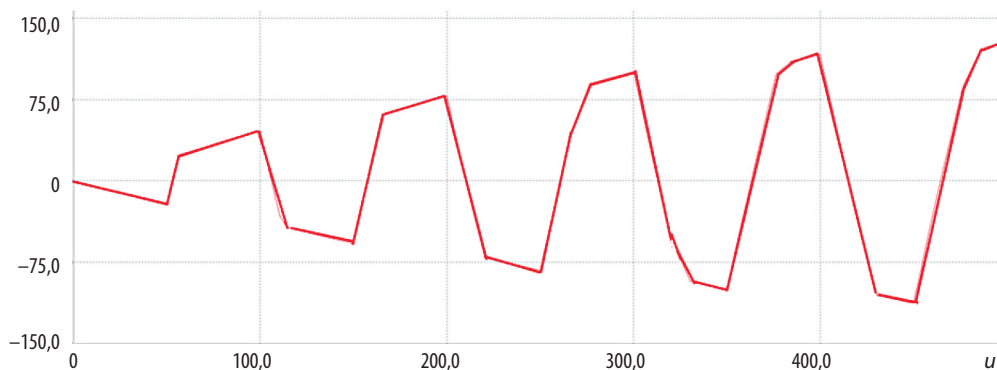


Рис. 8. Осциллограмма тока в первичной обмотке

Fig. 8. The oscillogram of the current in the primary winding

из сети, КПД, сварочного тока учесть взаимное влияния полей рассеяния двухобмоточных трансформаторов, входящих в трехобмоточный сварочный трансформатор, а также проводить анализ гармонического состава токов в обмотках трансформаторов. Результаты расчета сварочного тока и полной мощности, потребляемой из сети, подтверждены экспериментально.

Предложена методика расчета электромагнитных параметров, которые входят в разработанную схему замещения источника. Расчетные частотные зависимости этих параметров отличаются от измеренных не более, чем на 10 % в диапазоне частот от 1000 до 10000 Гц.

Показано, что сопротивления короткого замыкания двухобмоточных трансформаторов, входящих в схему замещения инверторного источника питания, существенно зависят от частоты, причем при ее увеличении от 1000 до 10000 Гц активное сопротивление короткого замыкания трансформатора увеличивается приблизительно в 4 раза, что снижает КПД трансформатора.

Коэффициент связи магнитных полей рассеяния двухобмоточных трансформаторов составляет около 0,5 и может оказать существенное влияние на формы токов в обмотках и электропотребление источника. Этот коэффициент незначительно зависит от частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие // Под ред. Смирнова В.В. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 848 с.
2. **Сулов А.А.** 15-я юбилейная Международная научно-техническая конференция «Сварка и родственные технологии» // Сварочное производство. 2016. № 10. С. 41–52.
3. **European Patent office, No.CN103811156.** Transformer and method of setting winding coils / Petrun M., Dolinar D., Klopčič B., Štumberger G. Applic № CN2031313394, 15 pages, 2014.
4. **Jernej Černelič, Robert Brezovnik, Martin Petrun, Drago Dolinar.** Analysis of power losses in the resistance spot welding transformer // ISEF 2015 — XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering. Valencia, Spain, September 10–12, 2015. (www.isef2015.upv.es2.)
5. **Cukovic J.M., Petrum M., Klopčic B, Polajzer B., Dolinar D.** Optimization of resistance spot welding transformer winding using analytical successive approximation and differential evolution // IEEE Trans. on Magn., 2014. Vol. 50.
6. **Petrum M/, Klopsis B/, Polajzer P., Dolinar D.** Evaluation of iron core quality for resistance spot welding transformers using current controlled supply // IEEE Trans. on Magn.. Vol. 48, № 4. P. 1633–1636.
7. **Исаев А.П., Милованов А.В.** Инверторный источник сварочного тока для контактной сварки // Сварочное производство. 2005. № 3. С. 34–38.
8. **Сахно Л.И.** Исследование двухмостовых выпрямителей с крутопадающими внешними характеристиками для питания электрической дуги // Электричество. 2002. № 2. С. 51–58.
9. **Sakhno L., Sakhno O., Dubitsky S.** Field-Circuit Modelling of an Advanced Welding Transformer with Two Parallel Rectifiers // Archives of electrical engineering. 2015. Vol. 64 (252). P. 249–257.
10. **Васютинский С.Б.** Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. 432 с.
11. **Вольдек А.И., Попов В.В.** Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2007. 320 с.
12. **De Leon, F., & Martinez, J.A.** Dual three-winding transformer equivalent circuit matching leakage measurements // IEEE Transactions on Power Delivery. 2009. 24(1). P. 160–168.
13. ELCUT 6.3/ Руководство пользователя / Е.Э. Мазин, С.Д. Дубицкий, В.Г. Поднос, А.С. Любимцев. — CreateSpace Independent Publishing Platform. — 2017. 296 с.
14. Комплекс программ для численного моделирования электромагнитных и электромеханических устройств ELCUT // www.elcut.ru
15. Измеритель иммитанса E7-20 // www/priborelectro.ru
16. Регистратор сварочных процессов // www/elmics.ru

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

САХНО Людмила Ивановна — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: lsahno2010@yandex.ru

САХНО Ольга Ивановна — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: Olasahno@mail.ru

ФЕДОРОВ Павел Дмитриевич — инженер ОАО «Технолог-С». 191014, Санкт-Петербург, ул. Жуковского, 4–2Н. E-mail: fedopad@mail.ru

РАДОМСКИЙ Юрий Викторович — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: uradomsky@gmail.ru

REFERENCES

1. Oborudovaniye dlya kontaktnoy svarki: Spravochnoye posobiye / Pod red. Smirnova V.V. SPb.: Energoatomizdat, 2000. 848 s. (rus.)
2. **Suslov A.A.** 15 yubileynaya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Svarka i rodstvennyye tekhnologii» // Svarochnoye proizvodstvo. 2016. № 10. S. 41–52. (rus.)
3. **European Patent office No.CN103811156.** Transformer and method of setting winding coils / Petrun M., Dolinar D., Klopčič B., Štumberger G. Applic № CN2031313394, 15 pages, 2014.
4. **Jernej Černelič, Robert Brezovnik, Martin Petrun,**

Drago Dolinar. Analysis of power losses in the resistance spot welding transformer // *ISEF 2015 — XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*. Valencia, Spain, September 10–12, 2015, www.isef2015.upv.es2.

5. **Cukovic J.M., Petrum M., Klopsis B., Polajzer B., Dolinar D.** Optimization of resistance spot welding transformer winding using analytical successive approximation and differential evolution. *IEEE Trans. on Magn.* 2014. Vol. 50.

6. **Petrum M, Klopsis B, Polajzer P., Dolinar D.** Evaluation of iron core quality for resistance spot welding transformers using current controlled supply. *IEEE Trans. on Magn.* Vol. 48, № 4. P. 1633–1636.

7. **Isayev A.P., Milovanov A.V.** Invertornyy istochnik svarochnogo toka dlya kontaktnoy svarki. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2005. № 3. S. 34–38.

8. **Sakhno L.I.** Issledovaniye dvukhmostovykh vypryamiteley s krutopadayushchimi vneshnimi kharakteristikami dlya pitaniya elektricheskoy dugi. *Elektrichestvo*. 2002. № 2. S. 51–58. (rus.)

9. **Sakhno L., Sakhno O., Dubitsky S.** Field-Circuit Modelling of an Advanced Welding Transformer with Two

Parallel Rectifiers. *Archives of electrical engineering*. 2015. Vol. 64 (252). P. 249–257.

10. **Vasyutinskiy S.B.** Voprosy teorii i rascheta transformatorov. L.: Energiya, 1970. 432 s.

11. **Voldek A.I., Popov V.V.** Elektricheskiye mashiny. Vvedeniye v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory SPb.: Piter, 2007. 320 s. (rus.)

12. **De Leon, F., & Martinez, J.A.** Dual three-winding transformer equivalent circuit matc hing leakage measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. 24(1). P. 160–168.

13. ELCUT 6.3 Rukovodstvo polzovatelya / Ye.E. Mazin, S.D. Dubitskiy, V.G. Podnos, A.S. Lyubimtsev. — CreateSpace Independent Publishing Platform. — 2017, s. 296

14. Kompleks programm dlya chislennoy modelirovaniya elektromagnitnykh i elektromekhanicheskikh ustroystv ELCUT. www.elcut.ru

15. Izmeritel immitansa Ye7-20. [www/priborelektro.ru](http://www.priborelektro.ru)

16. Registrator svarochnykh protsessov. [www/elmics.ru](http://www.elmics.ru)

AUTHORS

SAKHNO Ludmila I. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: Isahno2010@yandex.ru

SAKHNO Olga I. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: Olasahno@mail.ru

FEDOROV Pavel D. — *Closed joint-stock company «Technolog-S»*. 4–2H, Zhukovsky St, St. Petersburg, Russia, 191014. E-mail: fedopad@mail.ru

RADOMSKY Yurii Y. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*. Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: uraradomsky@gmail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 30.03.2017.