DOI 10.5862/JEST.238.6 УДК 812.35.17.11

Л.И. Сахно, О.И. Сахно, Ю.В. Варламов, Д.И. Лихачев

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИМПЕДАНСА ТРАНСФОРМАТОРА МАШИНЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

L.I. Sakhno, O.I. Sahno, Yu.V. Varlamov, D.I. Likhachev

ANALYTICAL CALCULATION OF THE IMPEDANCE OF THE RESISTANCE OF A SPOT WELDING MACHINE TRANSFORMER

В статье рассматриваются трансформаторы машин контактной сварки с инверторными источниками питания. Сварочные трансформаторы имеют существенные отличия от трансформаторов промышленной частоты, поскольку ток при сварке протекает поочередно в каждой вторичной обмотке в течение полупериода работы инвертора. Такой режим работы трансформатора требует разработки специальных методов расчета его импеданса, активная составляющая которого определяет тепловой режим трансформатора, а реактивная влияет на его полную мощность. В статье представлены формулы для расчета импеданса таких трансформаторов. Они необходимы для оптимизации конструкции трансформатора. При получении этих формул сделаны некоторые допущения, позволяющие свести задачу расчета поля рассеяния трансформатора к одномерной. В формулы входят функции, зависящие от относительных величин, характеризующих поверхностный эффект и эффект близости в обмотках трансформаторов. Для удобства представлены графики этих функций. Дан пример расчета импеданса трансформатора инверторного источника питания в диапазоне изменении частоты от нуля до 10 кГц. Показано, что использование традиционной конструкции трансформатора в инверторном источнике питания приводит к существенному увеличению активного сопротивления из-за проявления поверхностного эффекта и эффекта близости. Индуктивное сопротивление превышает активное сопротивление в несколько раз при частоте более 1000 Гц, несмотря на уменьшение индуктивности рассеяния за счет поверхностного эффекта. Для уменьшения импеданса трансформатора необходимо обеспечить чередование катушек первичной и вторичной обмоток.

ТРАНСФОРМАТОР; ДИСКОВЫЕ ОБМОТКИ; МАШИНА КОНТАКТНОЙ СВАРКИ; ИНВЕРТОР; ПОВЕРХ-НОСТНЫЙ ЭФФЕКТ И ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ.

This paper presents an analysis of the impedance in a medium-frequency resistance spot welding transformer. The medium frequency system consists of an input H-bridge inverter, a welding transformer and a full-wave center-tapped output rectifier that consists of two diodes. The welding transformer consists of a primary winding and two secondary disk windings. The resistive impedance determines the thermal conditions of the transformer and the reactance affects the medium frequency of the system's power consumption. It is necessary to consider that due to the center-tapped rectifier, the current can flow in only one of the secondary windings at a time, which causes an unbalanced magnetic field strength distribution. Unbalanced distribution can cause high leakage fluxes which increase transformer impedance. The article presents the formulas for calculation of the impedance transformers. They are necessary in order to reduce copper losses and design a device with minimum power consumption. Some assumptions were made to reduce the problem of calculating the leakage field of the transformer to a one-dimensional field. The formulas are functions that depend on the relative values characterizing skin and proximity effects in the transformer windings. The graphs of these functions are given for convenience of use. An example of the calculation of the impedance is presented. It is shown that the typical design of the transformer is not effective due to the proximity and skin effects. The reactance exceeds the resistive impedance by several times when the frequency is more than 1000 Hz, despite the reduction of the leakage inductance. To reduce the impedance of the transformer it is necessary to provide the interleaving of primary and secondary windings.

TRANSFORMER; DISK WINDINGS; SPOT WELDING MACHINES; INVERTER; PROXIMITY SKIN EFFECTS.

Введение

В настоящее время разрабатываются машины контактной сварки (МКС) с инверторными источниками питания, рабочая частота которых может составлять от нескольких сотен герц до десятков килогерц [1-3]. Ведущие мировые производители сварочного оборудования уже имеют подобные машины в номенклатуре своих изделий. Источник питания таких машин состоит из трехфазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром, инвертора и сварочного трансформатора с двумя вторичными обмотками. Две вторичные обмотки сварочного трансформатора через однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой подключены к свариваемым деталям. Применение инверторных источников питания в МКС с выпрямлением на стороне вторичной обмотки позволяет уменьшить массу и габариты сварочного трансформатора, что особенно актуально в автомобилестроении (подвесные клещи для контактной сварки с применением сварочных роботов), в строительстве (сварка арматуры железобетонных конструкций). В трансформаторах таких МКС сильно проявляется поверхностный эффект, который влияет на их импеданс. Известно, что активная составляющая импеданса трансформатора определяет его тепловой режим, а реактивная составляющая влияет на его полную мощность. Известны методы расчета импеданса в силовых трансформаторах с учетом поверхностного эффекта, справедливые только для многослойных цилиндрических обмоток [4, 5]. Трансформаторы инверторных источников с двухполупериодным выпрямителем имеют дисковые обмотки со сложным чередованием дисков первичной и вторичной обмоток, поэтому указанные методы в данном случае не применимы. В [6, 7] дан численный расчет потерь и некоторые рекомендации по улучшению конструкции таких трансформаторов. Аналитический расчет позволяет достаточно быстро и эффективно оценить влияние конструктивных параметров трансформатора на его импеданс и найти пути оптимизации конструкции. В нашей статье приводятся формулы для расчета импеданса и результаты расчета для типичной конструкции трансформатора машины контактной сварки в широком диапазоне изменения частоты.

Методика проведения исследования

Трансформаторы машин контактной сварки обычно имеют дисковые чередующиеся обмотки. Первичные обмотки выполняются из медного провода прямоугольного сечения, а вторичные — из сплошных медных дисков или из тонкостенных медных трубок, спаянных между собой. Режим работы трансформатора — повторно-кратковременный. На рис. 1 показано сечение сварочного трансформатора с броневым магнитопроводом, четырьмя дисками (1, 3, 4, 6) первичной обмотки, выполненной из провода прямоугольного сечения, и двумя дисками (2, 5) вторичной обмотки, выполненной из медного листа. Расчет необходимо выполнить для режима противовключения, когда

$$I_1 w_1 = -I_2 w_2, \tag{1}$$

где I_1 , I_2 — действующие значения токов соответственно в первичной и вторичной обмотках; w_1, w_2 — количество витков первичной и вторичной обмоток.

Как в первичной, так и во вторичной обмотках протекают синусоидальные токи, поэтому для расчета используется символический метод. Несмотря на то, что во вторичной обмотке ток протекает поочередно в течение полупериода по каждому из двух дисков, расчет импеданса трансформатора с использованием символического метода дает достоверные результаты, подтвержденные экспериментальными исследованиями, и является важным этапом при оптимизации конструкции трансформатора. При аналитическом расчете импеданса сделаем некоторые допущения. Для обоснования этих допущений на



Рис. 1. Конструкция трансформатора



Рис. 2. Картина реального (а) и идеализированного (б) магнитного поля рассеяния трансформатора

рис. 2, *а* представлена полученная методом конечных элементов [8] картина магнитного поля рассеяния в окне *ABCD* трансформатора, показанного на рис. 1.

Поскольку линии поля на рис. 2, a близки к прямым, эта картина поля заменяется идеализированной, показанной на рис. 2, δ , которая обычно принимается при расчете потерь в дисковых обмотках трансформаторов. Кроме того, принимая во внимание, что медь занимает не все пространство дисков первичной обмотки, удельную электрическую проводимость дисков этой обмотки на рис. 2, δ следует находить по формуле

$$\gamma = \gamma_{\rm M} \frac{c}{c+d},\tag{2}$$

где $\gamma_{_{\rm M}}$ — удельная электрическая проводимость меди; *с* — размер провода на рис. 1; *d* — толщина изоляции между проводами.

Таким образом, расчет потерь в любом диске обмотки трансформатора (например, в диске A' B' C' D' на рис. 2, a, δ) сводится к решению одномерной задачи расчета электромагнитного поля в рассматриваемом диске A'B'C'D' на рис. 3.

Этот диск принимается бесконечно протяженным в направлении оси *Y*. Напряженность магнитного поля \dot{H} в таком диске имеет только одну составляющую, направленную по оси *X*, а напряженность электрического поля – одну составляющую, направленную по оси *Y*. На границах каждого *j*-го диска (*j* изменяется от 1 до 6 для трансформатора на рис. 1) должны быть заданы комплексные значения \dot{H}_{1i} и \dot{H}_{2i} напряженностей магнитного поля (см. рис. 2, δ и 3). Действующие значения напряженности магнитного поля на верхней границе *j*-го диска обозначим H_{ij} , на нижней границе – H_{2j} . При выводе формул для импеданса отдельного диска опустим индекс *j*. Тогда для расчета активного и внутреннего индуктивного сопротивления диска (однородный плоский лист A'B'C'D') необходимо решить уравнение [9]

$$\frac{d^2\dot{H}}{dz^2} = k^2\dot{H},\tag{3}$$

где $k = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$; $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f -$ угловая частота; f -частота синусоидального напряжения трансформатора; $\mu -$ магнитная проницаемость обмоток; $\gamma -$ удельная электрическая проводимость листа; b -ширина листа. Заданные граничные условия: $\dot{H} = \dot{H}_1$ при z = 0 и $\dot{H} = \dot{H}_2$ при z = b.

Решение уравнения (3):

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_1 e^{kb} - \dot{H}_2}{e^{kb} - e^{-kb}} e^{-kz} + \frac{\dot{H}_2 - \dot{H}_1 e^{-kb}}{e^{kb} - e^{-kb}} e^{kz} .$$
(4)



Рис. 3. Расчетная модель диска

Напряженность электрического поля $\dot{E} = -\frac{1}{\gamma} \frac{d\dot{H}}{dz}$ получается в виде

$$\dot{E} = -\frac{k}{\gamma} \frac{\dot{H}_2 - \dot{H}_1 e^{kb}}{e^{kb} - e^{-kb}} e^{-kz} - \frac{k}{\gamma} \frac{\dot{H}_2 - \dot{H}_1 e^{-kb}}{e^{kb} - e^{-kb}} e^{kz}.$$
 (5)

Для получения импеданса рассматриваемого диска обмотки воспользуемся теоремой Умова— Пойнтинга в комплексной форме [3]. Согласно этой теореме активное сопротивление листа равно

$$R = \frac{\operatorname{Re}(S)}{I^2},\tag{6}$$

где \vec{S} — поток комплексного вектора Пойнтинга через боковые поверхности листа; $\text{Re}(\vec{S})$ — действительная часть \vec{S} ; I — действующее значение тока в проводах рассматриваемого диска обмотки.

Внутреннее индуктивное сопротивление диска равно

$$x = \frac{\mathrm{Im}(\dot{S})}{I^2},\tag{7}$$

где Im (\dot{S}) – мнимая часть \dot{S} .

Поток вектора Пойнтинга сквозь боковые поверхности листа (см. рис. 3)

$$\dot{S} = \left(\dot{S}_1 - \dot{S}_2\right)hl,\tag{8}$$

где \dot{S}_1 и \dot{S}_2 — значения вектора Пойнтинга на границах листа при z = 0 и при z = b; hl — площадь боковой поверхности листа; l — длина листа в направлении оси Y.

Учитывая связь вектора Пойнтинга с напряженностями электрического и магнитного полей, получаем

$$\dot{S} = \left(\dot{E}_1 \widehat{H}_1 - \dot{E}_2 \widehat{H}_2\right) hl, \qquad (9)$$

где \dot{E}_1 , \dot{E}_2 – комплексные значения напряженности электрического поля на границах листа; \hat{H}_1 , \hat{H}_2 – величины, комплексно сопряженные с напряженностями магнитного поля \dot{H}_1 , \dot{H}_2 на границах листа.

Найдем значения комплексного вектора Пойнтинга \dot{S}_1 и \dot{S}_2 на границах листа. Для напряженности электрического поля на границах листа при z = 0 и z = b имеем

$$\dot{E}_1 = -\frac{k}{\gamma} \frac{2\dot{H}_2 - \dot{H}_1 \left(e^{-kb} + e^{kb} \right)}{e^{kb} - e^{-kb}};$$
(10)

$$\dot{E}_2 = -\frac{k}{\gamma} \frac{\dot{H}_2 \left(e^{-kb} + e^{kb} \right) - 2\dot{H}_1}{e^{kb} - e^{-kb}}.$$
 (11)

Поток вектора Пойнтинга сквозь боковые поверхности листа:

$$\dot{S} = -\frac{k}{\gamma} \frac{4\widehat{H}_{1}\dot{H}_{2} - (\widehat{H}_{1}\dot{H}_{1} + \widehat{H}_{2}\dot{H}_{2})(e^{-kb} + e^{-kb})}{e^{kb} - e^{-kb}}hl.$$
(12)

Поскольку напряженности поля на границах плоских листов, заменяющих обмотки, пропорциональны магнитодвижущим силам обмоток, которые определяются равенством (1), получаем

$$\hat{H}_1 \hat{H}_2 = H_1 H_2$$
 либо $\hat{H}_1 \hat{H}_2 = -H_1 H_2$, (13)
где H_1 , H_2 – действующие значения напряжен-
ности магнитного поля на границах листа.

С учетом (13) формула для потока вектора Пойнтинга принимает вид

$$\dot{S} = -\frac{k}{\gamma} \left(\frac{4H_1H_2}{e^{kb} - e^{-kb}} - \left(H_1^2 + H_2^2\right) \operatorname{cth}(kb) \right) hl. \quad (14)$$

Для получения активного и индуктивного сопротивлений из (6) и (7) воспользуемся законом полного тока:

$$I = (H_2 - H_1)h/w,$$

где *w* — количество витков в рассматриваемом диске обмотки.

Для дальнейших преобразований целесообразно представить произведение *kb* в (14) в виде

$$kb = \beta(1+j), \tag{15}$$

где
$$\beta = b \sqrt{\frac{\omega \mu \gamma}{2}}.$$

Активное сопротивление диска, состоящего из *w* витков, получаем из (6) и (14):

$$R = \frac{lw^2}{\gamma bh} \frac{\left(H_1^2 + H_2^2\right)\phi - H_1 H_2 \psi}{\left(H_2 - H_1\right)^2},$$
 (16)

где
$$\varphi = \beta \frac{\sin 2\beta + \sin 2\beta}{\cosh 2\beta - \cos 2\beta}; \quad \psi = 2\beta \frac{\sinh \beta \cos \beta + \sin \beta \cosh \beta}{\cosh^2 \beta - \cos^2 \beta}$$

Внутреннее индуктивное сопротивление диска находим из (7) и (15):

$$x = \frac{lw^2}{\gamma bh} \frac{\left(H_1^2 + H_2^2\right)\varphi_1 - H_1 H_2 \psi_2}{\left(H_2 - H_1\right)^2},$$
 (17)

где
$$\varphi_1 = \beta \frac{\text{sh} 2\beta - \sin 2\beta}{\text{ch} 2\beta - \cos 2\beta}; \quad \psi_1 = 2\beta \frac{\text{sh} \beta \cos \beta - \sin \beta \text{ch} \beta}{\text{ch}^2 \beta - \cos^2 \beta}.$$

Графики зависимостей φ , φ_1 , ψ , ψ_1 от параметра β приведены на рис. 4. При $\beta < 1$: $\varphi \approx 1 + \frac{4}{45}\beta^4$; $\psi \rightarrow 2$; $\varphi_1 \approx \frac{2\beta^2}{3}$; $\psi_1 \approx -\frac{2\beta^2}{3}$. При $\beta \rightarrow \infty$: $\varphi \rightarrow \beta$; $\psi \rightarrow 0$; $\varphi_1 \rightarrow \beta$; $\psi_1 \rightarrow 0$.



Рис. 4. Функции ϕ , ϕ_1 , ψ , ψ_1 для расчета импеданса диска

Упростим выражения (16) и (17). Для этого введем безразмерный параметр $n = \frac{H_2}{H_1}$, характеризующий напряженность магнитного поля на границах дисков обмоток.

Из (16) получаем

$$R = \frac{lw^2}{\gamma bh} \frac{(n^2 + 1)\phi - n\psi}{(n-1)^2}.$$
 (18)

Из (17) имеем

$$L = \frac{x}{2\pi f} = \frac{lw^2}{\gamma bh 2\pi f} \frac{(n^2 + 1)\varphi_1 - n\psi_1}{(n-1)^2}.$$
 (19)

Из (19) и значений функций ϕ_1 и ψ_1 при $\beta \rightarrow 0$ получим выражение для индуктивности диска при постоянном токе, которое будет необходимо для дальнейшего анализа:

$$L_0 = \frac{\mu_0 b l w^2}{3h} \frac{(n^2 + 1) + n}{(n-1)^2}.$$
 (20)

Параметр *n* в (18)–(20) для каждого диска с номером *j* имеет своё значение ($n = n_j$). Из закона полного тока и картины поля на рис. 2, *б* следует, что в режиме противовключения напряженность магнитного поля на границах крайних дисков равна нулю. Если количество дисков равно *m*, а нумерация дисков проводится сверху вниз (как на рис.1), то $H_{11} = 0$ и $H_{2m} = 0$. Следовательно, на верхней границе диска 1 (рис. 2, *б*) и нижней границе диска m = 6 напряженность магнитного поля равна нулю. Это условие дает возможность рассчитать напряженность магнитного поля на границах любого *j*-го диска. Для верхней границы любого *j*-го диска, кроме первого, имеем

$$H_{1j} = \frac{I_1}{h} \sum_{i=1}^{j-1} k w_i,$$
 (21)

где k = 1, если диск принадлежит первичной обмотке, и $k = -k_{\rm rp}$, если диск принадлежит вторичной обмотке; $k_{\rm rp} = \frac{w_1}{w_2}$ коэффициент трансформации (k = 0, если ток в диске отсутствует).

Для нижней границы любого*j*-го диска, кроме последнего, имеем

$$H_{2i} = H_{1i+1} \tag{22}$$

Будем рассчитывать параметр *n* следующим образом. Если $|H_{1i}| \leq |H_{2i}|$, то

$$n_j = \frac{H_{1j}}{H_{2j}};$$
 (23)

если $\left|H_{2j}\right| \leq \left|H_{1j}\right|$, то

$$n_j = \frac{H_{2j}}{H_{1j}}.$$
 (24)

Тогда для любого диска трансформатора параметр *n* будет находиться в интервале $-1 \le n \le 1$.

Индуктивность рассеяния всего трансформатора определяется полной энергией $W_{_{\rm M}}$ магнитного поля в окне трансформатора:

$$L_{12}' = \frac{2W_{\rm M}}{I_1^2}.$$
 (25)

Энергия магнитного поля в окне трансформатора равна

$$W_{\rm M} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m} L_j I_1^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m-1} \mu H_{2j}^2 hls, \qquad (26)$$

где *s* – расстояние между дисками обмоток.

В (26) первое слагаемое соответствует дискам обмоток, а второе — промежуткам между дисками. Если количество дисков равно m = 6, то количество промежутков между ними составит m - 1 = 5.

Тогда индуктивность рассеяния

$$L_{12}' = \sum_{j=1}^{m} L_j + \sum_{j=1}^{m-1} \frac{\mu H_{2j}^2}{I_1^2} hls.$$
 (27)

Для проверки представленных в данной статье формул проведено сравнение результатов расчета по этим формулам и расчета в ELCUT [8] для некоторых конструкций сварочных трансформаторов. Расчет в ELCUT подтверждает правильность полученных формул.

Результаты исследования

Исследование активных сопротивлений трансформаторов машин контактной сварки с использованием (18) выполнено в [10]. В настоящей статье основное внимание уделено результатам расчета индуктивного сопротивления трансформатора инверторного источника питания, в котором используется выходной выпрямитель со средней точкой. Первичная обмотка имеет четыре диска, в каждом из которых девять витков, выполненных из провода прямоугольного сечения 2 × 5 мм (1,61 × 4,73 мм – без изоляции); толщина диска -b = 4,73 мм. Расстояния между дисками – 3 мм. Вторичная обмотка имеет два диска, выполненных из сплошных медных шин толщиной 6 мм. Расстояния между дисками – 3 мм. Каждый диск вторичной обмотки проводит ток в течение половины периода работы инвертора, поэтому расчет потерь необходимо выполнить при условии, что ток протекает только в одном диске вторичной обмотки, например в диске 2 на рис. 1. Все промежуточные результаты расчета *п* при использовании формул (21)-(24) приведены в таблице.

Н о м е р диска <i>ј</i>	w _j k	$\frac{h}{I_1}H_{1j}$	$\frac{h}{I_1}H_{2j}$	п
1	9	0	9	0
2	-36	9	-27	-0,333
3	9	-27	-18	0,67
4	9	-18	-9	0,5
5	0	-9	-9	1
6	9	-9	0	0

На рис. 5 показаны зависимости относительной индуктивности $\frac{L_j}{L_{0j}}$ для дисков трансформатора, рассчитанные по (19), (20) при изменении частоты до 10 кГц (L_{0j} – индуктивность *j*-го диска при постоянном токе).

Это рисунок показывает, что внутренняя индуктивность диска существенно уменьшается при увеличении частоты. Уменьшение внутренней индуктивности объясняется ослаблением магнитного потока внутри дисков за счет действия вихревых токов. Поэтому максимальное уменьшение индуктивности почти на 80 % по сравнению с индуктивностью при постоянном токе наблюдается в дисках 3 и 4 (кривые 4 и 5), которые находятся в максимальных полях рассеяния трансформатора. Однако индуктивность рассеяния всего трансформатора уменьшается приблизительно только на 40 % (кривая 1), поскольку в промежутках между дисками напряженность магнитного поля не зависит от частоты. На рис. 6 приведены зависимости активного и индуктивного сопротивлений трансформатора. Несмотря на уменьшение индуктивности рассеяния при увеличении частоты, индуктивное сопротивление существенно увеличивается и превышает активное сопротивление. Сильное проявление поверхностного эффекта приводит к увеличению активного сопротивления почти в 5 раз по сравнению с сопротивлением при равномерном распределении тока по сечениям проводов обмоток. Максимальное увеличение активного сопротивления наблюдается в дисках 3, 4 первичной обмотки, что объясняется нахождением этих дисков в сильном внешнем магнитном поле, сформированном другими дисками. Для устранения этого недостатка необходимо обеспечить чередование дисков первичной и вторичной обмоток. Кроме того, необходимо уменьшить параметр В дисков первичной обмотки.



Рис. 5. Зависимость от частоты относительной индуктивность рассеяния трансформатора (1) и относительных индуктивностей дисков (2, 3, 4, 5 соответствуют дискам 1, 2, 3, 4 на рис. 1)

Выводы

Получены формулы для расчета импеданса трансформатора машины контактной сварки в широком диапазоне изменения частоты.

Расчеты показали, что использование типичной конструкции трансформатора машин контактной сварки приводит к существенному увеличению активного сопротивления из-за проявления поверхностного эффекта. Индуктивное сопротивление превышает активное сопротивление в несколько раз уже при частоте более 1000 Гц, несмотря на уменьшение индуктивности рассеяния за счет поверхностного эффекта.

Для уменьшения импеданса трансформатора необходимо в конструкции трансформатора обеспечить чередование катушек первичной и вторичной обмоток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие // Под ред. В.В. Смирнова. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 848 с.

2. Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. Сварочное производство и рынок сварочной техники в современной экономике // Сварочное производство. 2007. №2. С. 43–47.

3. Суслов А.А. 10-я юбилейная международная специализированная выставка Weldex/Россварка-2010 // Сварочное производство. 2010. №12. С. 52–54.

4. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. 432 с.: ил.

5. **С.Д. Лизунов [и др.]** Силовые трансформаторы: Справочное пособие / Под ред. Лизунова С.Д., Лоханина А.К. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.

6. European Patent Office CN103811156. Transformer and method of setting winding coils. / Petrun

1. **Smirnov V.V.** Oborudovanie dlya kontaktnoi svarki: Spravochnoie posobiie [Equipment for contact welding: Guidebook]. St.Petersburg: Energoatomizdat, 2000. 848 s. (rus)

2. Bernadskii V.N., Makovezckaia O.K. Svarochnoie proizvodstvo i ry'nok svarochnoi tekhniki v sovremennoi ekonomike. [Production and sale of welding equipment in modern economy]. *Svarochnoie proizvodstvo*. Moscow: Publishing center "Mechanical engineering", 2007. № 2. S. 43–47. (rus)

3. Suslov A.A. 10-ya yubilei'naia mezhdunarodnaia specializirovannaia vy'stavka Weldex/Rossvarka-2010. [10th anniversary international specialized exhibition Weldex/Rossvarka-2010]. Svarochnoie proizvodstvo. Moscow: Publishing center "Mechanical engineering". 2010. № 12. S. 52–54. (rus)

4. **Vasyutinskii S.B.** Voprosy teorii i rascheta transformatorov/ [Questions of the theory and analysis of transformers]. Leningrad: Energiia, 1970. 432 p. (rus)

5. Lizunova S.D., Lokhanina A.K. Silovy'ie transformatory: spravochnoye posobiye. [Power

M., Dolinar D., Klopčič B., Štumberger G. Applic № CN2031313394, 15 pages, 2014

7. Černelič J., Brezovnik R., Petrun M., Dolinar D. 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.

8. Комплекс программ для численного моделирования электромагнитных и электромеханических устройств ELCUT // www/tor/ru/elcut/.

9. Ламмеранер И., Шафль М. Вихревые токи. М.-Л.: Энергия, 1967. 207 с.

10. Сахно Л.И., Сахно О.И., Лихачев Д.И. Инженерный метод расчета критической толщины дисков обмоток трансформаторов машин контактной сварки // Сварочное производство. 2010. №1. С. 17–18.

REFERENCES

transformer: Guidebook]. Moscow: Energoizdat, 2004. 616 s. (rus)

6. 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.

7. Černelič J., Brezovnik R., Petrun M., Dolinar D. 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.

8. ELCUT Kompleks programm dlya chislennogo modelirovaniia elektromagnitny'kh i elektromekhanicheskikh ustroistv [ELCUT. Complex of programs for numerical modeling of electromagnetic and electromechanical mashine]. *Available: http://www.tor. ru; http://www.elcut.ru.*

9. Lammeraner J., Shtafl M. Vikhrevy'ie toki/ [Whirling current]. Moscow: Energiia, 1967. 207 s. (rus) 10. Sakhno L.I., Sakhno O.I., Likhachev D.I. Inzhenerny'i metod rascheta kriticheskoi tolshhiny' diskov obmotok transformatorov mashin kontaktnoi svarki. [Engineering method of calculation of critical thickness of disks of windings of transformers for contact welding]. *Svarochnoie proizvodstvo*. Moscow: Publishing center "Mechanical engineering". 2010. № 1. S. 17–18. (rus).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

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

SAKHNO Ludmila I. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: lsahno2010@yandex.ru

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

SAKHNO Olga I. – St. Petersburg State Polytechnic University. 29, Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 190251, RUSSIA,. E-mail: Olasahno@mail.ru

ВАРЛАМОВ Юрий Владимирович — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251 Санкт-Петербург Политехническая, 29. E-mail: vyv2@rabler.ru

VARLAMOV Yurii V. – St. Petersburg State Polytechnic University. 29, Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 190251, Russia. E-mail: vyv2@rambler.ru

ЛИХАЧЕВ Денис Игоревич – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: design@yandex.ru

LIKHACHEV Denis I. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: design@yandex.ru