



DOI: 10.18721/JEST.230418

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, Россия

3 — ОАО «Технолог-С», Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ ИНВЕРТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ МАШИНЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

В работе рассматриваются инверторные источники питания повышенной частоты с выпрямителем со средней точкой, которые находят широкое применение при точечной контактной сварке в приборостроении, электронной промышленности, атомной энергетике и автомобилестроении. Особенностью этих источников является существенное влияние электромагнитных параметров входящего в них трехобмоточного трансформатора на сварочный ток и электропотребление. Показано, что сварочный ток и электропотребление источника зависят как от модуля, так и от знака коэффициента связи по потокам рассеяния двухобмоточных трансформаторов, входящих в трехобмоточный трансформатор. Дается физическое объяснение влияния знака коэффициента связи на сварочный ток. В работе представлены зависимости сварочного тока от коэффициента связи, которые могут быть использованы для создания экономичных трансформаторов. Показано, что для уменьшения электропотребления инверторных источников питания контактной сварки по сравнению с имеющимися необходимо уменьшать не только индуктивности рассеяния двухобмоточных трансформаторов, но и положительный коэффициент связи по потокам рассеяния или увеличивать модуль отрицательного коэффициента.

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. 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. DOI: 10.18721/JEST.230418.

L.I. Sakhno¹, O.I. Sakhno², P.D. Fedorov³, Y.Y. Radomsky⁴

1, 2, 4 — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. St. Petersburg, Russia

3 — CJSC «Technolog-C». St. Petersburg, Russia

THE INFLUENCE OF THE TRANSFORMER ON THE POWER CONSUMPTION OF HIGH-FREQUENCY RESISTANCE SPOT WELDING SYSTEMS

High-frequency resistance spot welding systems are considered. They have full-wave center-tapped output rectifiers. They find wide application in resistance spot welding, instrument making, electronic industry, nuclear energy and automotive industries. A feature of these systems is a significant influence of electromagnetic parameters of the three-winding transformer included in the system on welding current and power consumption. This three-winding transformer is replaced by two two-winding ones. It is shown that welding current and power consumption depend both on the modulus and the sign of the coupling coefficient of the magnetic leakage fields of these two-winding transformers. For reducing the

power consumption of high frequency resistance spot welding systems, it is necessary not only to reduce the leakage inductance of two-winding transformers, which replace the three-winding transformer, but also to reduce the positive coupling coefficient of the magnetic leakage fields or increase the modulus of the negative coefficient

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, Y.Y. Radomsky, The influence of the transformer on the power consumption of high frequency resistance spot welding systems, *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23(04)(2017) 181–190, DOI: 10.18721/JEST.230418.

Введение

Инверторные источники питания повышенной частоты с выпрямителем со средней точкой имеют широкое применение при точечной контактной сварке в приборостроении, электронной промышленности, атомной энергетике и автомобилестроении благодаря широким технологическим возможностям [1, 2]. Инверторный источник питания состоит из трехфазного выпрямителя, фильтра выпрямителя, инвертора, трехобмоточного трансформатора и выпрямителя со средней точкой [3–7]*. В [8] показано, что электропотребление источника зависит от электромагнитных параметров трансформатора. Для исследования этого влияния в [8] разработана схема замещения источника, в которой трехобмоточный трансформатор заменяется двумя двухобмоточными трансформаторами, причем в этой схеме учтено, что их магнитные поля рассеяния взаимно влияют на электромагнитные процессы в каждом из них. Для характеристики этого влияния в [9, 10] введены электромагнитные параметры — взаимная индукция по потокам рассеяния и коэффициент связи по потокам рассеяния. В этой схеме замещения, в отличие от классической трехлучевой схемы [11–13], обмотки трансформатора электрически не связаны и все электромагнитные параметры имеют физический смысл. В литературе отсутствует информация о роли взаимного влияния полей рассеяния двухобмоточных трансформаторов, входящих в трехобмоточный, на электропотребление инверторного источника питания машины контактной сварки. Поэто-

му целью нашей работы было исследовать это влияние с использованием схемы замещения источника, разработанной в [8], и дать рекомендации по разработке конструкций экономичных трансформаторов для инверторных источников машин контактной сварки. В статье рассматриваются инверторные источники с частотами от 1000 Гц до 10 кГц, которые требуются для сварки деталей из циркония, титана, радиационно-стойких сталей.

Методика проведения исследования

В качестве объектов исследования выбраны конструкции трансформаторов, сечения которых показаны на рис. 1 [7]. Первичная обмотка трансформатора ВТ-2 состоит из трех, а ВТ-3 — из двух последовательно соединенных катушек, выполненных проводом прямоугольного сечения. Вторичные обмотки выполнены из медных трубок, по которым протекает охлаждающая вода. Количество витков первичной обмотки каждого трансформатора — 36.

Для исследования влияния электромагнитных параметров трансформатора на электропотребление инверторного источника используется схема замещения, показанная на рис. 2.

В этой схеме источник питания e замещает инвертор. ЭДС источника имеет прямоугольную форму на каждом полупериоде. В схему входят индуктивности рассеяния L_{12} , L_{13} и активные сопротивления R_{12} , R_{13} двухобмоточных трансформаторов 1–2 (1 — первичная обмотка, 2 — одна из вторичных обмоток трехобмоточного трансформатора) и 1–3 (3 — другая обмотка трехобмоточного трансформатора). Эти параметры приведены к вторичным обмоткам.

Зависимый источник ЭДС $HI(e_{H1} = \frac{r_1}{k_{12}k_{13}}i_3$,

r_1 — активное сопротивление первичной об-

* См. также: European Patent office, No CN103811156. Transformer and method of setting winding coils / Petrun M., Dolinar D., Klopčič B., Štumberger G. Ap- plic № CN2031313394, 15 pages, 2014.

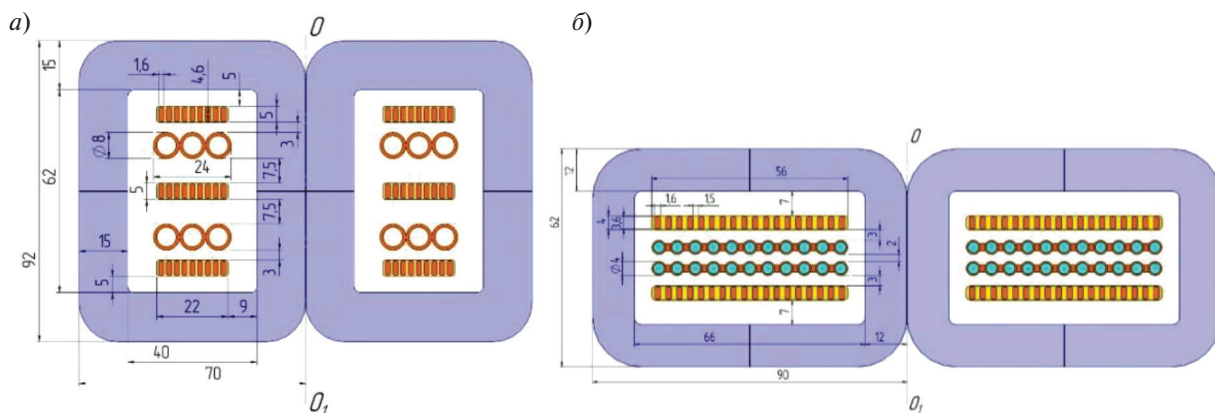


Рис. 1. Сечения трансформаторов ВТ-2 (а) и ВТ-3 (б)
Fig. 1. Cross-sections of transformers VT-2 (a) and VT-3 (б)

мотки; $k_{12} = k_{13} = 36$ — коэффициенты трансформации; i_3 — ток во вторичной обмотке трансформатора 1–3) учитывает изменение напряжения на зажимах обмотки 2 за счет падения напряжения на первичной обмотке двухобмоточного трансформатора 1–3, а зависимый источник $H2 \left(e_{H2} = \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} i_2 \right)$ учитывает изме-

нение напряжения на зажимах обмотки 3 за счет падения напряжения на первичной обмотке двухобмоточного трансформатора 1–2. Нагрузка трансформатора представляет собой последовательно соединенную индуктивность $L_L = 780$ нГн и активное сопротивление $R_L = 400$ мкОм сварочного контура, который образован шинами, подводящими ток к месту сварки. Эти параметры определены экспериментально для исследуемого источника питания. В сопротивление R_L входит активное сопротивление материала в месте сварки, которое принято равным 100 мкОм.

Для исследуемых трансформаторов рассчитаны электромагнитные параметры, входящие в схему замещения источника. Эти параметры существенно зависят от частоты вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. Частотные зависимости индуктивностей рассеяния $L_{12} = L_{13}$ и активных сопротивлений $R_{12} = R_{13}$ рассчитаны с использованием пакета ELCUT [14, 15] по методике изложенной в [8]. Результаты расчета даны на рис. 3. Уменьшение индуктивности рассеяния и активных сопротивлений обмоток трансформатора ВТ-3 по

сравнению с ВТ-2 достигнуто за счет уменьшения количества катушек первичной обмотки и расстояний между катушками.

Взаимная индуктивность трансформаторов 1–2 и 1–3 по потокам рассеяния и коэффициент связи этих трансформаторов по потокам рассеяния для каждой частоты исследуемого диапазона рассчитываются по формулам

$$M = \frac{L_{12} + L_{13} - L_{23}}{2}, \quad (1)$$

где L_{23} — индуктивность рассеяния двухобмоточного трансформатора с обмотками 2 и 3, и

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{12}L_{13}}}. \quad (2)$$

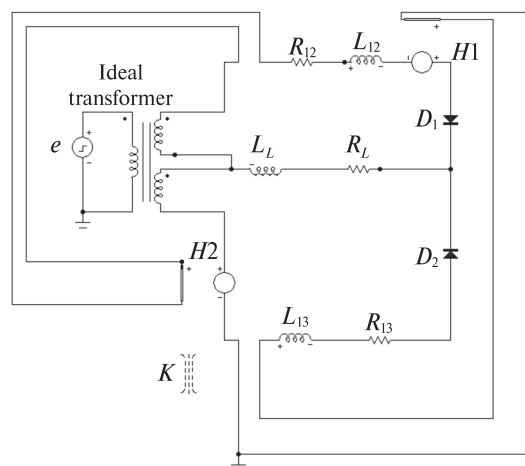


Рис. 2. Схема замещения источника
Fig. 2. Source replacement scheme

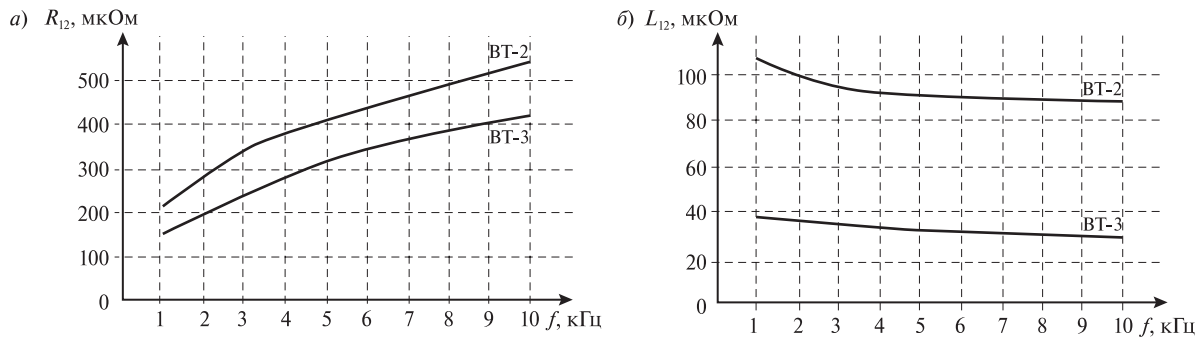


Рис. 3. Частотные зависимости индуктивностей рассеяния (а) и активных сопротивлений короткого замыкания (б) двухобмоточных трансформаторов
 Fig. 3. Frequency dependences of the scattering inductances (a) and the short-circuit reactance (b) of double-winding transformers

Из (1) следует, что взаимная индуктивность трансформаторов 1–2 и 1–3 может быть положительной, если $(L_{12} + L_{13}) > L_{23}$, и отрицательной, если $(L_{12} + L_{13}) < L_{23}$. Для примера в табл. 1 приведены значения индуктивностей рассеяния, взаимной индукции и коэффициентов связи трансформатора ВТ-2, а в табл. 2 — те же параметры трансформатора ВТ-3 для двух граничных частот исследуемого диапазона.

Из таблиц видно, что для трансформатора ВТ-2 выполняется условие $(L_{12} + L_{13}) < L_{23}$, а для трансформатора ВТ-3 условие $(L_{12} + L_{13}) > L_{23}$. Поэтому взаимные индуктивности по потокам рассеяния для этих трансформаторов имеют

разные знаки. Физический смысл такого результата состоит в том, что магнитный поток рассеяния одного двухобмоточного трансформатора, сцепляющийся с вторичной обмоткой другого, направлен согласно с основным магнитным потоком трансформатора ВТ-2 и встречно — у трансформатора ВТ-3. Для иллюстрации этого результата на рис. 4 показаны картины магнитостатических полей рассеяния трансформаторов 1–2 (режим противовключения обмоток 1 и 2) для ВТ-2 и ВТ-3, полученные с использованием ELCUT для правой половины сечения трансформаторов на рис. 1. Пренебрегая потерями в обмотках и сердечнике, можно считать, что фазы первичного тока и тока намагничивания совпадают. Линии основного магнитного потока Φ_0 в стержне магнитопровода параллельны линии OO_1 и при заданных в данном случае направлениях первичного тока в обоих трансформаторах направлены сверху вниз. Из этих рисунков видно, что основная часть линий потока рассеяния трансформатора 1–2, сцепляющихся с обмоткой 3, у трансформатора ВТ-2 направлена вниз, то есть согласно с основным потоком, а у трансформатора ВТ-3 — вверх, то есть встречно с основным потоком. Этот результат полностью соответствует физическому смыслу разных знаков взаимной индуктивности по потокам рассеяния в [9, 10].

Следует отметить, что коэффициенты связи по потокам рассеяния, в отличие от индуктивностей рассеяния, слабо зависят от частоты. Результаты расчета коэффициента связи для трансформаторов ВТ-2 и ВТ-3 позволили определить для этого параметра диапазон его изменения

Таблица 1

Электромагнитные параметры трансформатора ВТ-2

Table 1

Electromagnetic parameters of the transformer VT-2

f , Гц	$L_{12} = L_{13}$, нГн	L_{23} , нГн	M , нГн	k
1000	107,2	318	-51,8	-0,48
10000	88,6	264	-43,4	-0,49

Таблица 2

Электромагнитные параметры трансформатора ВТ-3

Table 2

Electromagnetic parameters of the transformer VT-3

f , Гц	$L_{12} = L_{13}$, нГн	L_{23} , нГн	M , нГн	k
1000	38,9	45,1	16,3	0,42
10000	29,3	31,7	13,5	0,46

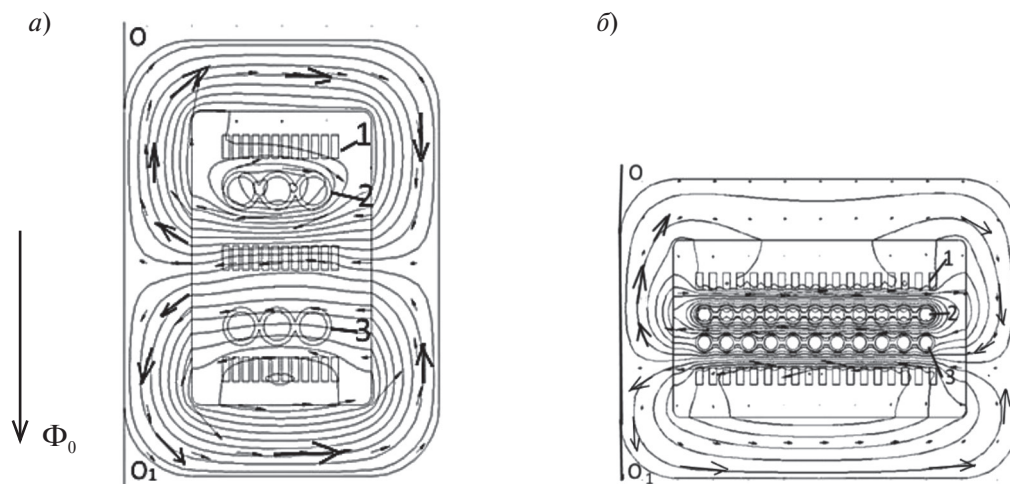


Рис. 4. Картины магнитных полей рассеяния для трансформаторов VT2 (а) и VT3 (б)
 Fig. 4. Pictures of magnetic scattering fields for transformers VT2 (a) and VT3 (b)

в котором целесообразно провести исследование. Этот диапазон можно определить как $-0,5 < k < 0,5$. Для других перспективных конструкций модули этих коэффициентов могут увеличиться, поэтому в дальнейшем исследовании диапазон изменения коэффициента связи был несколько расширен и составил от $-0,6$ до $0,6$.

Расчетное исследование

Электромагнитные процессы в схеме замещения источника на рис. 4 рассчитаны для исследуемых конструкций трансформаторов на рис. 1 в диапазоне от 1000 Гц до 10 кГц. Для всех вариантов расчета неизменным оставались напряжение на первичной обмотке трансформатора — $e = 540$ В. Поскольку коэффициент трансформации для обоих трансформаторов одинаков, напряжение холостого хода трансформаторов также одинаково. В этом случае электропотребление источника пропорционально сварочному току (ток нагрузки источника), поэтому результаты исследования представлены в виде зависимостей сварочного тока от коэффициента связи по потокам рассеяния.

Проведенное исследование показало, что независимо от абсолютных значений индуктивностей рассеяния зависимость сварочного тока от коэффициента связи приблизительно одинакова. Для удобства анализа использовалось относительное значение сварочного тока $\frac{I_K}{I_{K=0}}$ (I_K — действующее значение сварочного тока при определен-

ном коэффициенте связи; $I_{K=0}$ — действующее значение сварочного тока при коэффициенте связи, равном нулю). Результаты расчетов представлены на рис. 5. Эти зависимости позволяют оценить, как влияет коэффициент связи на электропотребление при одинаковых индуктивностях рассеяния разных трансформаторов.

Зависимости на рис. 5 позволяют сделать два важных вывода. Первый вывод: при отрицательном коэффициенте связи сварочный ток больше, чем при положительном при любой частоте инвертора. Это можно объяснить следующим образом. Когда коэффициент связи отрицательный, эквивалентная индуктивность в контуре коммутации меньше, чем при отсутствии магнитной связи этих обмоток, что ускоряет процесс изменения тока в обмотках и уменьшает время коммутации диодов. При положительном коэффициенте связи эквивалентная индуктивность в контуре коммутации больше, чем при отсутствии магнитной связи этих обмоток, что замедляет изменение тока и увеличивает время коммутации. Например, при $K = -0,6$ и частоте 10 кГц сварочный ток увеличивается по сравнению с током при $K = 0$ почти в два раза. Следовательно, отрицательный коэффициент связи обмоток обеспечивает увеличение сварочного тока по сравнению с $K \geq 0$ без увеличения первичного напряжения. Реализация этого эффекта в конструкции трансформатора может привести к экономии электроэнергии, потребляемой инверторным источником.

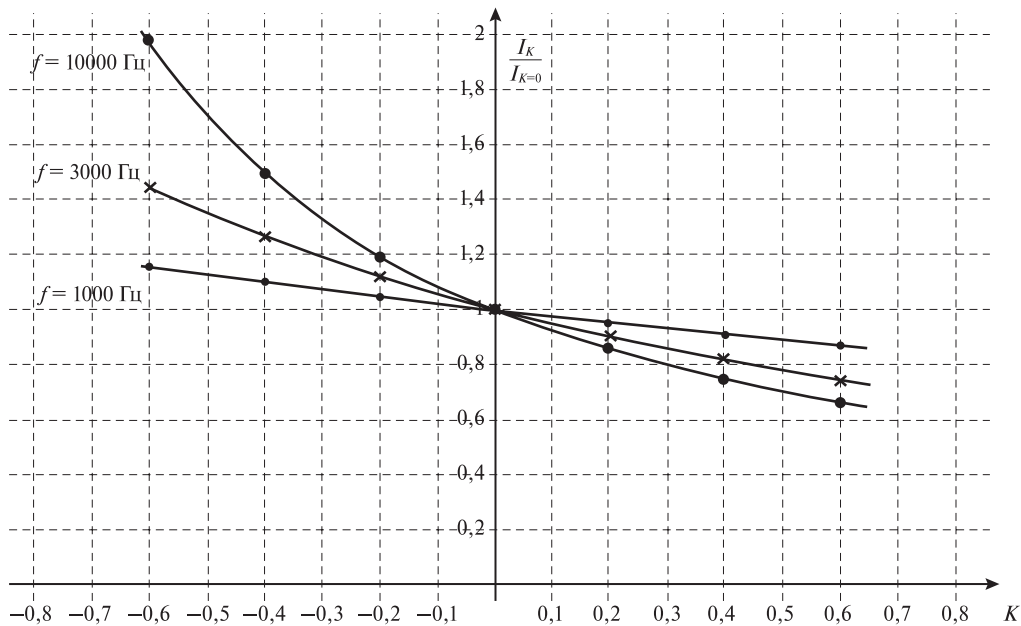


Рис. 5. Влияние коэффициента связи на сварочный ток
 Fig. 5. Influence of the coupling coefficient on the welding current

Второй вывод состоит в том, что влияние коэффициента связи на ток нагрузки растет при увеличении частоты. Этот эффект можно объяснить следующим образом. Коэффициент связи влияет на электромагнитные процессы в источнике только во время коммутации диодов, так как только в это время ток проходит по обеим вторичным обмоткам трансформатора. Следовательно, чем больше отношение времени коммутации к полупериоду инвертора, тем больше влияние коэффициента связи на сварочный ток. Это отношение увеличивается при увеличении частоты инвертора. Для иллюстра-

ции на рис. 6 приведены осциллограммы установившихся токов во вторичных обмотках при одинаковых параметрах схемы, но при разных частотах инвертора: 1000 Гц (рис. 6, а) и 10 кГц (рис. 6, б).

Из этого рисунка видно, что для частоты 1000 Гц отношение времени коммутации к половине периода инвертора составляет приблизительно 0,3, а для 10 кГц это отношение увеличивается до 0,9, то есть коммутация занимает почти весь полупериод инвертора. Получено, что время коммутации зависит от индуктивностей рассеяния и коэффициента связи (рис. 7). При

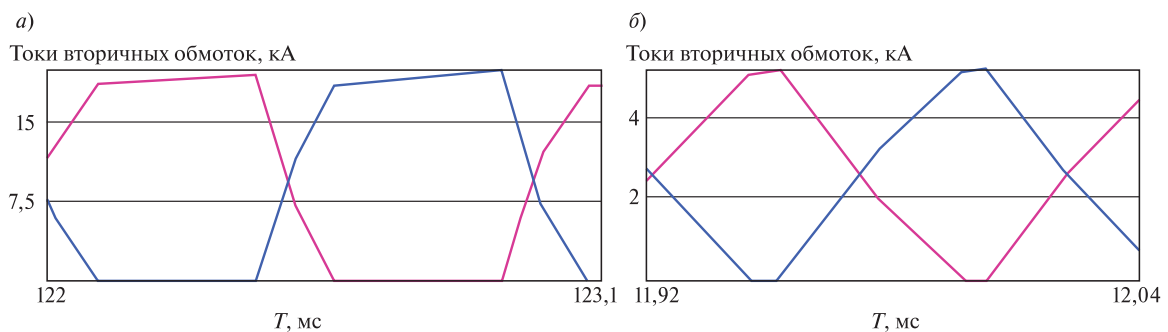


Рис. 6. Установившиеся токи во вторичных обмотках при частоте 1000 Гц (а) и 10 кГц (б) (красный — ток в обмотке 2, синий — ток в обмотке 3)
 Fig. 6. Steady currents in the secondary windings at a frequency of 1000 Hz (a) and 10 kHz (б) (red — current in winding 2, blue — current in winding 3)

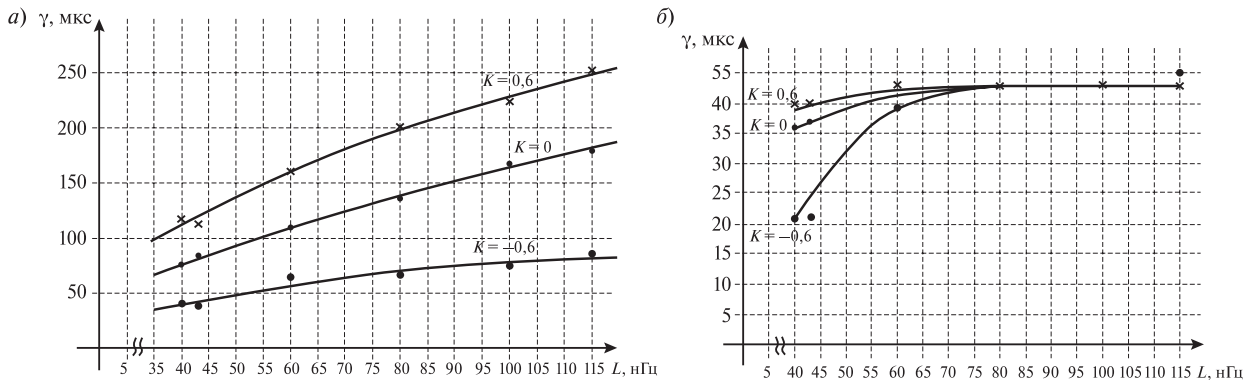


Рис. 7. Зависимость времени коммутации γ от индуктивности рассеяния и коэффициента связи при частоте 1кГц (а) и 10 кГц (б)
 Fig. 7. Dependence of the switching time γ on the scattering inductance and the coupling coefficient at a frequency of 1 kHz (a) and 10 kHz (b)

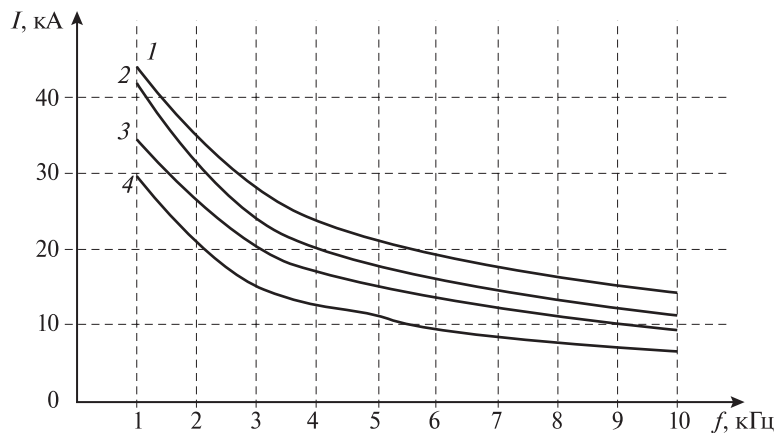


Рис. 8. Зависимости сварочного тока от частоты для трансформатора ВТ-3 (кривые 1 и 2) и для трансформатора ВТ-2 (кривые 3 и 4)
 Fig. 8. Welding current versus frequency for the transformer VT-3 (curves 1 and 2) and for the transformer VT-2 (curves 3 and 4)

частоте 1000 Гц (рис. 7, а) коэффициент связи существенно влияет на время коммутации, а при частоте 10 кГц (рис. 7, б) его влияние велико только при индуктивности рассеяния меньше 70 нГн. При увеличении индуктивности более 70 нГн время коммутации диодов при частоте инвертора 10 кГц практически равно полупериоду инвертора при любом значении коэффициента связи.

Рассмотрим результаты расчета сварочных токов для инверторных источников с трансформаторами ВТ-2 и ВТ-3 (рис. 8). Для каждого из этих источников получены зависимости тока нагрузки от частоты для двух случаев: при отсутствии взаимного влияния полей рассеяния

(кривая 1 для ВТ-3; кривая 4 для ВТ2) и с учетом этого влияния, то есть при k , рассчитанном по (2) (кривая 2 для ВТ-3; кривая 3 для ВТ-2). При их получении учтены зависимости индуктивностей рассеяния, активных сопротивлений, представленные на рис. 3, и зависимости коэффициента связи от частоты. Из сравнения кривых 1 и 4 видно, что при $k = 0$ сварочный ток источника с трансформатором ВТ-3 существенно больше, чем у источника с трансформатором ВТ-2. Разница между этими токами существенно зависит от частоты и определяется в основном разницей между значениями индуктивностей рассеяния двухобмоточных трансформаторов. Например, для источника

с ВТ-3 при частоте 1000 Гц ток нагрузки в 1,47 раз, а при частоте 10000 Гц в 2,2 раза больше, чем для источника с ВТ-2.

Однако взаимное влияние полей рассеяния трансформаторов действует на токи нагрузки этих источников противоположно: для источника с ВТ-2 взаимное влияние полей рассеяния увеличивает, а для источника с ВТ-3 уменьшает ток нагрузки по сравнению с отсутствием этого влияния. Это связано с разными знаками взаимной индукции по потокам рассеяния ($M > 0$ для ВТ-3 и $M < 0$ для ВТ-2). В результате ток в источнике с ВТ-3 уменьшается, а с ВТ-2 — увеличивается по сравнению со случаем $M = 0$. Для частоты 1000 Гц уменьшение тока в источнике с ВТ-3 составляет 15 %, а для частоты 10000 Гц это уменьшение составляет уже 45 %. С другой стороны, благодаря отрицательной взаимной индуктивности по потокам рассеяния ток в источнике с ВТ-2 увеличивается на 5 % при частоте 1000 Гц и на 25 % при частоте 10000 Гц, что приводит к сближению зависимостей токов в этих источниках от частоты (кривые 2 и 3). На основании проведенных расчетов установлено, что использование трансформатора ВТ-3 позволяет уменьшить потребление электроэнергии источника питания машины контактной сварки приблизительно на 20 % по сравнению с использованием трансформатора ВТ-2 во всем исследуемом частотном диапазоне. Эта разница достигнута только за счет изменения конструкции трансформатора.

Выполненное исследование позволило наметить пути дальнейшего совершенствования трансформаторов инверторных источников питания: уменьшение индуктивностей рассеяния трансформаторов, уменьшение положительного коэффициента связи по потокам рассеяния и увеличение модуля отрицательного коэффициента.

Выводы

Коэффициент связи по потокам рассеяния двухобмоточных трансформаторов, входящих в трехобмоточный трансформатор инверторного источника питания машины контактной сварки, влияет на электропотребление этого источника, причем это влияние растет при увеличении частоты инвертора. При отрицательном коэффициенте связи заданный сварочный ток обеспечивается при меньшем электропотреблении источника, чем при положительном коэффициенте связи.

Для уменьшения электропотребления инверторных источников питания контактной сварки по сравнению с имеющимися необходимо не только уменьшать индуктивности рассеяния двухобмоточных трансформаторов, входящих в трехобмоточный трансформатор, но и уменьшать положительный коэффициент связи по потокам рассеяния этих трансформаторов или увеличивать модуль отрицательного коэффициента связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие / Под ред. Смирнова В.В.—СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 848 с
2. **Суслов А.А.** 15-я юбилейная Международная научно-техническая конференция «Сварка и родственные технологии» // Сварочное производство. 2016. № 10. С. 41–52.
3. **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
4. **Cukovic J.M., Petrun 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. P. 1633–1636.
5. **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. Vol. 46. № 3. P. 1064–1071.
6. **Исаев А.П., Милованов А.В.** Инверторный источник сварочного тока для контактной сварки // Сварочное производство. 2005. № 3. С. 34–38.
7. **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. DOI: 10.18721/JEST.230209.
8. **Сахно Л.И., Лихачев Д.И.** Оптимизация конструкции трансформатора для инверторного источника питания машины контактной сварки // Электричество. 2013. № 5. С. 28–36.

9. Сахно Л.И. К вопросу о схеме замещения трехобмоточного трансформатора // Электричество. 2003. № 8. С. 25–33.

10. 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.

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

12. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2007. 320 с.

13. 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.

14. ELCUT 6.3 Руководство пользователя / Е.Э. Мазин, С.Д. Дубицкий, В.Г. Поднос, А.С. Любимцев. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2017. С. 296

15. Комплекс программ для численного моделирования электромагнитных и электромеханических устройств ELCUT. [Электронный ресурс] www.elcut.ru

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

САХНО Людмила Ивановна — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: lsahno2010@yandex.ru

САХНО Ольга Ивановна — доктор технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: Olasahno@mail.ru

ФЕДОРОВ Павел Дмитриевич — инженер ОАО «Технолог-С».

E-mail: fedopad@mail.ru

РАДОМСКИЙ Юрий Викторович — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: uraradomsky@gmail.ru

REFERENCES

[1] Oborudovaniye dlya kontaktной svarki: Spravochnoye posobiye / Pod red. Smirnova V.V. SPb.: Energoatomizdat, 2000. 848 s. (rus.)

[2] Suslov A.A. 15-a yubileynaya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Svarka i rodstvennyye tekhnologii». Svarochnoye proizvodstvo. 2016. № 10. S. 41–52. (rus.)

[3] 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

[4] 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. P. 1633–1636

[5] 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. Vol. 46. № 3. P. 1064–1071.

[6] Isayev A.P., Milovanov A.V. Invertornyy istochnik svarochnogo toka dlya kontaktной svarki. Svarochnoye proizvodstvo. 2005. № 3. S. 34–38. (rus.)

[7] Sakhno L.I., Sakhno O.I., Fedorov P.D., Radomskiy Yu.V. Razrabotka skhemy zameshcheniya invertornogo istochnika pitaniya mashiny kontaktной svarki. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti CPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 23(02)(2017) 91–100, DOI: 10.18721/JEST.230209. (rus.)

[8] Sakhno L.I., Likhachev D.I. Optimizatsiya konstruktсии transformatora dlya invertornogo istochnika pitaniya mashiny kontaktной svarki. Elektrichestvo. 2013. № 5. S. 28–36. (rus.)

[9] Sakhno L.I. K voprosu o skheme zameshcheniya trekhobmotochnogo transformatora. Elektrichestvo. 2003. № 8. S. 25–33. (rus.)

[10] 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.

[11] Vasyutinskiy S.B. Voprosy teorii i rascheta transformatorov. L.: Energiya, 1970. 432 s. (rus.)

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

[13] De Leon F., Martinez J.A. Dual three-winding transformer equivalent circuit matching leakage measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. 2009. 24(1). 160–168.

[14] ELCUT 6.3 Rukovodstvo polzovatelya / Ye.E.Mazin, S.D. Dubitskiy, V.G. Podnos, A.S. Lyubimtsev. — CreateSpace Independent Publishing Platform. — 2017, s. 296. (rus.)

[15] Kompleks programm dlya chislennogo modelirovaniya elektromagnitnykh i elektromekhanicheskikh ustroystv ELCUT. [Elektron. resurs] www.elcut.ru (rus.)

AUTHORS

SAKHNO Ludmila I. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: lsahno2010@yandex.ru

SAKHNO Olga I. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: Olasahno@mail.ru

FEDOROV Pavel D. — *Closed joint-stock company "Technolog-S".*

E-mail: fedopad@mail.ru

RADOMSKY Yurii Y. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: uraradomsky@gmail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 30 октября 2017 г.