



## ВЛИЯНИЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ НА РАЗМЕРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена контактная сварочная машина, питаемая от электрической сети повышенной частоты. Исследовано как повышение рабочей частоты по сравнению с промышленной влияет на объем сердечника трансформатора машины. Показано, что повышение частоты не приводит к снижению габаритов и массы трансформатора и питание контактных машин переменного тока средней и большой мощности от инверторов повышенной частоты нецелесообразно.

*Ключевые слова:* контактная сварка, инвертор, сварочная машина, трансформатор, вторичный контур, объем магнитопровода

Как известно, эффективным путем уменьшения размеров и массы трансформаторов является повышение рабочей частоты [1]. Уменьшение массогабаритных показателей особенно целесообразно для встроенных трансформаторов сварочных клещей. В качестве основного источника питания раньше использовали утроители частоты, мотор-генераторы или индукторные генераторы [2], а в настоящее время — тиристорные или транзисторные инверторы [3]. К сожалению, с увеличением частоты возрастает индуктивное сопротивление вторичного контура машины. Для того чтобы при этом сварочный ток не уменьшился, приходится повышать вторичное напряжение трансформатора и, следовательно, его мощность. Таким образом, повышение частоты питания неоднозначно влияет на габаритный объем трансформаторов для контактной сварки на переменном токе. Поэтому представляет интерес исследовать, как рабочая частота влияет на габаритный объем и связанную с ней массу трансформатора для контактной сварки на переменном токе.

Для трансформаторов с минимальными массогабаритными показателями имеют место следующие соотношения [1]:

$$V_{\text{тр}} \approx 3V_{\text{м}}, \quad 0,13V_{\text{м}}^{4/3} = S_{\text{м}}S_{\text{ок}}, \quad S_{\text{ок}} = (2,5 - 1,3)S_{\text{м}},$$

где  $V_{\text{тр}}$  — объем трансформатора;  $V_{\text{м}}$  — объем магнитопровода;  $S_{\text{м}}$ ,  $S_{\text{ок}}$  — соответственно сечение магнитопровода и площадь его окна. Откуда

$$V_{\text{м}} = (9,2 - 5,5) \sqrt[3]{S_{\text{м}}},$$

т. е. объем трансформатора напрямую связан с сечением магнитопровода. Уменьшение активно-

го сечения материала магнитопровода  $S_{\text{м}}$  с увеличением частоты следует из известной формулы

$$S_{\text{м}} = \frac{E_1}{4,44f w_1 B}, \quad (1)$$

где  $E_1$  — ЭДС самоиндукции первичной обмотки;  $w_1$  — количество витков первичной обмотки;  $B$  — индукция. К сожалению, с увеличением частоты возрастает мощность потерь в магнитопроводе и дополнительных потерь в меди обмоток, что приводит к дополнительному повышению температуры трансформатора. Для диапазона частот до единиц килогерц дополнительными потерями в меди за счет скин-эффекта можно пренебречь. Зависимость удельных потерь в магнитопроводе от частоты имеет вид [1]

$$p = Af^{\alpha} B^2, \quad (2)$$

где  $A$  — потери в единице объема при  $f = 1$  Гц,  $B = 10^4$  Тл,  $\alpha = 1,5 \dots 2$ .

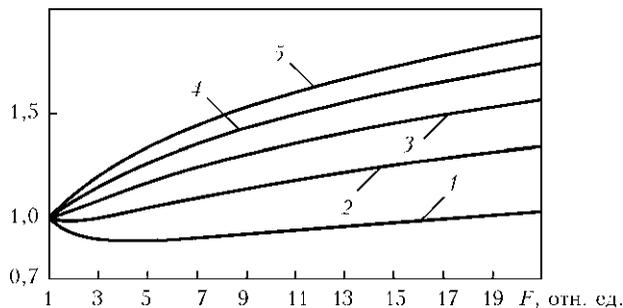
Чтобы мощность потерь в магнитопроводе и соответственно перегрев трансформатора остались на прежнем уровне необходимо одновременно с увеличением частоты снижать индукцию, как следует из формулы (2). Однако уменьшение индукции согласно зависимости (1) приводит к увеличению  $S_{\text{м}}$ . Таким образом, сечение магнитопровода трансформатора, а следовательно, и его объем с повышением частоты уменьшаются заметно медленнее, чем обратно пропорционально частоте. Кроме того, с уменьшением размеров трансформатора уменьшается поверхность охлаждения и индукцию приходится еще больше снижать.

В работе [1] с помощью теории подобия для объема магнитопровода трансформатора  $V_{\text{м}}$  получено следующее выражение:

$$V_{\text{м}}(f) = 1,5 \sqrt[3]{\frac{Ak_{\text{доб}}}{k_{\text{м}}}} \frac{P}{\sqrt[3]{f\Delta T}}, \quad (3)$$



$V$ , отн. ед.



Зависимость безразмерного объема магнитопровода трансформатора от безразмерной частоты при различных коэффициентах мощности машины на промышленной частоте: 1 —  $\cos \varphi = 0,9$ ; 2 —  $0,8$ ; 3 —  $0,7$ ; 4 —  $0,6$ ; 5 —  $0,5$

где  $P$  — мощность;  $k_{доб}$  — коэффициент добавочных потерь в меди;  $k_M$  — коэффициент заполнения окна магнитопровода медью;  $\Delta T$  — перегрев трансформатора. Выражение (3) получено для активной нагрузки и без учета влияния индуктивности рассеяния обмоток трансформатора. Особенностью машин для контактной сварки на переменном токе является индуктивно-активный характер нагрузки трансформатора

$$Z_2(f) = \sqrt{(R_k + r_d)^2 + (2\pi f L_k)^2}, \quad (4)$$

где  $R_k$  — активное сопротивление вторичного контура машины;  $r_d$  — сопротивление свариваемой детали;  $L_k$  — индуктивность вторичного контура машины. В этом случае выражение (3) примет вид

$$V_M(f) = 1,5 \sqrt{\frac{A k_{доб}}{k_M} \frac{Z_2(f) I_2^2}{\sqrt{f} \Delta T}}, \quad (5)$$

где  $I_2$  — вторичный ток контактной машины.

Для исследования влияния частоты на объем магнитопровода удобно перейти к безразмерным параметрам трансформатора, приняв за базовые параметры трансформатора на промышленной частоте 50 Гц:  $V = V_M(f)/V_M(50)$  — относительный объем трансформатора,  $F = f/50$  — относительная частота.

Условимся, что при изменении частоты  $R_k$ ,  $r_d$ ,  $L_k$ ,  $k_{доб}$ ,  $k_M$ ,  $A$ ,  $I_2$  и  $\Delta T$  остаются неизменными. Учитывая, что

$$\frac{2\pi 50 L_k}{R_k + r_d} = \operatorname{tg}(\varphi), \quad (6)$$

$$\frac{2\pi f L_k}{R_k + r_d} = \operatorname{tg}(\varphi) F, \quad (7)$$

где  $\varphi$  — угол сдвига между током и напряжением во вторичной цепи при рабочей частоте, равной 50 Гц, из уравнений (4)–(7), опустив промежуточные преобразования, получим зависимость относительного объема магнитопровода трансфор-

матора от рабочей частоты и  $\cos \varphi$  (коэффициент мощности) машины:

$$V = \frac{\sqrt{\cos^2(\varphi)(1-F) + F}}{\sqrt[4]{F}}. \quad (8)$$

Подсчитанные по формуле (8) зависимости  $V$  от  $F$  и  $\cos \varphi$  приведены на рисунке. Как следует из рисунка, для машин с  $\cos \varphi = 0,9$  вторичного контура на промышленной частоте имеет место снижение объема магнитопровода максимум на 11 % с повышением рабочей частоты. При  $\cos \varphi \geq 0,8$  объем магнитопровода только возрастает с ростом рабочей частоты. Обычно  $\cos \varphi$  контактных машин промышленной частоты 50 Гц находится в пределах  $0,4 \dots 0,7$ , а максимально возможный диапазон  $0,2 \dots 0,8$  [4]. Поэтому повышение рабочей частоты машин для контактной сварки на переменном токе в целях снижения габаритов трансформатора нецелесообразно, так как для реальных вторичных контуров машин габариты трансформатора не снижаются, а наоборот, возрастают. Приведенные выше выкладки выполнены с использованием ряда упрощающих допущений. Однако их влияние имеет второй порядок малости и серьезно не сказывается на полученных закономерностях.

Реальное снижение размеров и массы трансформатора можно достичь при использовании повышенной частоты в контактных машинах с выпрямителем во вторичном контуре.

Увеличение рабочей частоты однозначно улучшает регулировочные характеристики машин для контактной сварки за счет увеличения динамических характеристик системы управления. Это заметно сказывается при времени импульсов сварочного тока менее  $5 \dots 10$  периодов сети 50 Гц. Поэтому для микросварки, требующей время протекания сварочного тока менее  $10 \dots 30$  мс, машины переменного тока промышленной частоты не используются. В этом случае наиболее целесообразно применять машины повышенной частоты с и без выпрямителей во вторичном контуре, которые имеют несравненно лучшие регулировочные характеристики, чем наиболее распространенные в настоящее время конденсаторные машины.

## Выводы

1. Увеличение рабочей частоты (применение инверторов) не дает уменьшения габаритов и массы трансформатора машин для контактной сварки на переменном токе.

2. Увеличение рабочей частоты может в некоторых случаях уменьшить габариты и массу машины для контактной сварки с выпрямителем во вторичном контуре, при этом улучшает динами-



ческие характеристики системы управления тока сварки, что особенно целесообразно для микросварки.

1. *Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания* / А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов и др. — М.: Радио и связь, 1988. — 176 с.

2. *Рыськова З. А., Федотов П. Д., Жимерева В. И.* Трансформаторы для электрической контактной сварки. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 424 с.  
 3. *Пат. 2047444 РФ, МПК7 В23К111/24.* Установка для контактной сварки / Б. А. Будилов, В. В. Глазов, А. И. Комарчев и др. — Заявл. 07.02.1994; опубл. 10.11.1995.  
 4. *Глебов Л. В., Пескарев Н. А., Файгенбаум Д. С.* Расчет и конструирование машин для контактной сварки. — Л.: Энергоатомиздат, 1981. — 424 с.

A particular welding machine powered from the increased frequency electric mains was considered. It was investigated how increase in the operating frequency, compared to the commercial frequency, affected capacity of the machine transformer core. It is shown that increase in the frequency does not lead to decrease in dimensions and weight of the transformer, and that powering of medium- and high-capacity AC resistance machines from increased-frequency inverters is inexpedient.

Поступила в редакцию 24.11.2009



## ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING JOURNAL» (май, июнь 2009)

### СВАРКА — ОСНОВА АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ S. McCracken et al. (май)

В 2016–2017 гг. в США планируется ввести в строй более 30 новых атомных реакторов. Основной причиной повышенного интереса к атомной энергетике является наличие обнадёживающих данных о безопасности и безотказности работы существующего парка атомных электростанций (АЭС), насчитывающего 104 единицы.

Анализ эксплуатации АЭС показывает, что гарантией безопасности и безотказности их работы является качество сварных швов ответственных систем, конструкций и узлов. В большинстве случаев отказы, вызванные разрушениями материалов, происходят по сварному шву или вблизи него. В связи с этим одним из основных условий достижения срока эксплуатации АЭС порядка 60 лет и более, а также минимизации вероятности возникновения отказов и необходимости выполнения дорогостоящих ремонтно-восстановительных работ является разработка более совершенных способов сварки и технологических инструкций по сварке и монтажу сварных конструкций.

Институт исследований в области электроэнергетики (Electric Power Research Institute — EPRI) в качестве независимой и некоммерческой организации совместно с изготовителями сварочного оборудования, инструмента и сварочных приспособлений занимается разработкой руко-

водящих материалов и нормативов по передовым методам организации сварочных работ при строительстве новых АЭС.

Ключевыми моментами разрабатываемых EPRI проектов является оценка различных процессов сварки и технологии изготовления сварных конструкций, использованных при строительстве и эксплуатации АЭС, и разработка типовых процессов, учитывающих основные факторы, которые влияют на предрасположенность наиболее уязвимых сварных швов к деградации свойств соединяемых металлов.

В задачи EPRI входит разработка руководящих материалов по сооружению новых, более совершенных конструкций атомных реакторов, а также технологических инструкций по вопросам сварки всех основных узлов каждой АЭС отдельно. Без существенных изменений в основном останутся условия эксплуатации новых реакторов и набор материалов, но, вероятно, более или менее существенным изменениям подвергнутся процессы подготовки материалов под сварку и сами процессы сварки с целью повышения надежности и увеличения срока службы систем водной защиты реактора. В частности, будут использоваться несколько недавно разработанных методов снижения остаточных напряжений, возникающих в сварных соединениях.