



УДК 621.791.763.1.037:621.311.6

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ЗА СЧЕТ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

**А.А. ПИСЬМЕННЫЙ**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрена работа системы питания однофазной машины для контактной точечной сварки с введением в первичный контур сварочного трансформатора схемы продольной компенсации реактивной мощности. Машины для контактной точечной сварки характеризуются высокой потребляемой мощностью, значительная часть которой – реактивная составляющая. Это приводит к увеличению общей установленной мощности рабочих участков и асимметрии загрузки фаз питающей распределительной трехфазной сети. В работе показано, что система с продольным компенсатором хорошо взаимодействует со стандартным тиристорным регулятором мощности машины для контактной точечной сварки и позволяет поддерживать высокое значение коэффициента мощности в диапазоне фазового регулирования до 60 град. Применение продольной компенсации дает технологические преимущества точечной сварке, так как коэффициент мощности машины с компенсатором мало зависит от сопротивления сварочного контакта. Поэтому возможна сварка металлов в расширенном диапазоне удельных сопротивлений: от малоуглеродистых сталей до некоторых легких сплавов и металлов с защитными покрытиями. Невысокая стоимость доработки существующих машин продольным компенсатором с одновременным улучшением их технологических свойств делает способ продольной компенсации перспективным для промышленного применения. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* контактная точечная сварка, система питания, компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности

Сварочное оборудование для контактной точечной сварки (КТС), особенно для сварки переменным током промышленной частоты, характеризуется высокой потребляемой мощностью. В настоящее время для промышленности актуален вопрос оптимизации энергопотребления источников питания сварочного оборудования. Существующий парк оборудования для КТС в основном состоит из машин устаревшего исполнения, с однофазным питанием. Это связано с тем, что такие машины долговечны, а закупка новых, с более совершенными системами питания требует существенных капитальных затрат.

В работах [1, 2] проанализированы пути повышения энергоэффективности систем питания устаревших машин КТС. Известен способ продольной компенсации реактивной составляющей мощности в однофазных сварочных машинах переменного тока промышленной частоты [3]. Целью настоящей работы является рассмотрение некоторых особенностей данного способа, применительно к машинам КТС.

Известно, что любая машина для контактной сварки на токе промышленной частоты, в том числе и для точечной, обладает значительным реактивным сопротивлением. Реактивная мощность, частично расходуемая на нагрев сварочного трансформатора и токоведущих частей сварочно-

го контура, соизмерима с активной, расходуемой на нагрев места сварки. Из-за этого полная электрическая мощность, потребляемая такой сварочной машиной, увеличивается и возрастает общая установленная мощность рабочего участка.

Продольная компенсация реактивной составляющей мощности применительно к машине КТС — это включение батареи конденсаторов  $C$  последовательно с первичной обмоткой сварочного трансформатора  $T$  (рис. 1). Общий принцип состоит в достижении, по возможности, идеальной компенсации реактивного сопротивления контура, что означает равенство по абсолютной величине реактивного (индуктивного) сопротивления вторичного контура и приведенного к вторичной стороне реактивного (емкостного) сопротивления батареи конденсаторов:  $X_L + X'_C = 0$ , где  $X_L = \omega L$  — индуктивное сопротивление вторичной цепи,  $\omega$  — круговая частота,  $L$  — индуктивность,  $X'_C$  — емкостное сопротивление конденсаторной ба-

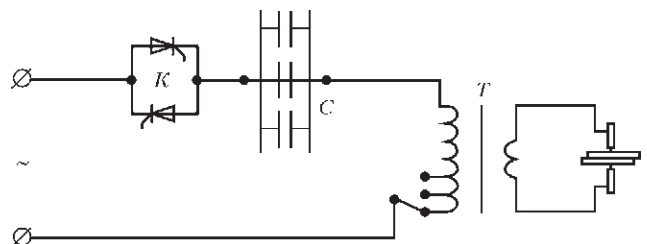


Рис. 1. Схема системы питания машин КТС с продольной компенсацией реактивной составляющей мощности



тарей, приведенное к вторичной обмотке сварочного трансформатора. При отсутствии компенсации сопротивление короткого замыкания машины  $Z_M = \sqrt{X_L^2 + (R_K + R_{св.к})^2}$ . При компенсации, в идеальном случае, выполняется условие, при котором  $Z_M$  достигает минимального значения, т. е. практически становится равным полному активному сопротивлению контура  $R_K$  ( $R_{св.к}$  – активное сопротивление сварочного контакта).

Таким образом, значение  $Z_M$  стремится к сумме значений активных сопротивлений и

$$\cos \varphi = \frac{R_K + R_{св.к}}{Z_M} \rightarrow 1.$$

При этом условии питающая распределительная сеть «воспринимает» сварочную машину как активную нагрузку и потребляемая из сети полная мощность существенно снижается. Учитывая, что у машин КТС индуктивное сопротивление  $X_L$  значительно превышает активное  $R_K$  [4], значение потребляемой полной мощности может быть снижено в два и более раз.

Рассмотрим пример. Пусть сварочный ток машины без компенсатора составляет

$$I_2 = \sqrt{\frac{S'}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}},$$

где  $S'$  — полная потребляемая мощность, приведенная к вторичной цепи,  $R$  — полное активное сопротивление вторичной цепи, включая сопротивление сварочного контакта.

Предположим, что такие же значения тока должна обеспечивать и машина с компенсатором:

$$I_2 = \sqrt{\frac{S'_k}{R}},$$

где  $S'_k$  — полная потребляемая мощность, приведенная к вторичной цепи машины с компенсирующим устройством.

Следовательно, при одном и том же вторичном токе потребляемая мощность машины с компенсатором:

$$S'_k = \frac{S' R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{S'}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi}}.$$

Реактивное сопротивление (для большей части машин КТС средней мощности), приведенное к вторичной цепи, составляет не менее 150 мкОм [4], активное сопротивление (в зависимости от конструктивного исполнения) находится в пределах 50...100 мкОм, сопротивление сварочного контакта сталей углеродистой группы – 50...100 мкОм. Значит, в машине без компенсатора:

$$\text{tg} \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{150}{50...100 + 50...100} = 1,5...0,75.$$

При этом отношение мощностей составляет

$$\frac{S'}{S'_k} = \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi} = 1,8...1,25.$$

При сварке алюминиевых и магниевых сплавов это отношение еще больше, так как сопротивление сварочного контакта снижается до 10...20 мкОм:

$$\frac{S'}{S'_k} = 2,69...1,6.$$

Как видно уже в первом приближении, использование продольной компенсации позволяет получить одну и ту же активную мощность в нагрузке при меньшем вторичном напряжении сварочного трансформатора. Поэтому в данном случае можно увеличить коэффициент трансформации, что соответственно снизит вторичное напряжение, первичный ток и потребляемую мощность.

Применение продольной компенсации реактивной мощности снижает нагрузку на трансформаторы распределительных подстанций, что особенно важно при повторно-кратковременном режиме работы машин КТС, а также позволяет использовать для подключения машины токоведущие проводники с гораздо меньшим сечением.

При очевидных преимуществах способа продольной компенсации есть вопросы прикладного характера, требующие специальных исследований и расчетов.

Первая задача — настройка машины с компенсатором на требуемый режим сварки. На обычных машинах это осуществляется путем переключения ступеней трансформатора. В данном случае это приводит к нарушению компенсации, поскольку изменяется индуктивность. Можно регулировать первичное напряжение с помощью автотрансформатора, включенного между сетью и машиной с компенсатором, но такое решение потребует дополнительных немалых затрат. Эффективнее применить фазовое управление, особенности которого при использовании в сварочной машине с продольной компенсацией приведены ниже.

Вторая задача (цель работы) состоит в возможности достижения полной компенсации в реальных условиях и сохранении настройки в течение всего рабочего цикла. Известно, что влияние вносимых в сварочный контур ферромагнитных масс, таких как габаритные и массивные свариваемые изделия, повышает реактивное сопротивление сварочного контура машины [4]. Кроме того, и при постоянной настройке режима для сварки одного и того же изделия, и от изделия к изделию изменяется активное сопротивление сварочного контакта. Если оно сопоставимо с активным сопротивлением контура, то могут существенно измениться параметры режима сварки.

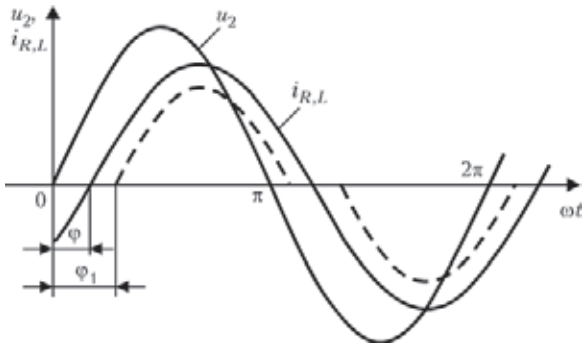


Рис. 2. Зависимости мгновенных значений напряжения  $u_2$  и тока  $i_{R,L}$  от угла  $\omega t$  за период

Фазовое управление на обычных машинах точечной сварки осуществляется тиристорным контактором  $K$  (см. рис. 1). Фаза включения определяет ток, необходимый для получения сварного соединения (рис. 2).

Для того, чтобы не было постоянной составляющей в токе и трансформатор не насыщался, угол управления тиристором  $\varphi_1$  должен находиться в пределах  $\varphi < \varphi_1 < (\pi - \varphi)$ . Чем больше  $\varphi_1$ , тем меньше ток, который изменяется по синусоидальному закону без прерывания только в случае, если  $\varphi_1 = \varphi$ . При других значениях этого угла в установившемся режиме между импульсами тока возникают паузы, причем общая продолжительность импульса и следующей за ним паузы составляет  $\pi$ , а продолжительность импульса тока полупериода  $\theta_1 = \pi + \varphi_1 - \varphi$ .

Даже если тиристорный контактор не используется, а режим сварки определяет выбранная ступень сварочного трансформатора, на практике  $\varphi$  не является постоянной величиной. Введение в сварочный контур габаритных ферромагнитных материалов, а также увеличение вылета электродов приводит к росту индуктивности сварочного контура  $L$  и угла  $\varphi$ . Если режим сварки определяется углом управления тиристором  $\varphi_1$ , то нужно выяснить, в какой мере при таком регулировании происходит «раскомпенсация» системы.

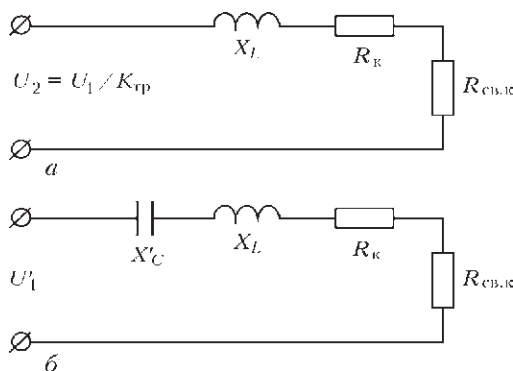


Рис. 3. Схемы замещения сварочной машины без компенсатора (а) и с компенсатором (б), приведенные к вторичной стороне трансформатора (коэффициент трансформации  $K_{тп} = 1$ ,  $U'_1$  — первичное напряжение, приведенное к вторичной цепи)

Схема замещения электрической части машины КТС без компенсатора, приведенная к вторичному контуру и, для упрощения расчетов, не учитывающая ток холостого хода трансформатора [5], изображена на рис. 3, а и описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$U_m \sin(\theta + \varphi + \varphi_1) = iR + X_L \frac{di}{d\theta},$$

где  $\theta = \omega t$ ,  $i$  — мгновенный ток.

В качестве базовых величин принимаем:  $U_m$  — амплитудное значение вторичного напряжения;  $X_L$  — индуктивное сопротивление машины;  $\varphi_1$  — угол управления тиристором;  $\varphi$  — фазовый угол.

Перейдем к относительным единицам:

$$\sin(\theta + \varphi + \varphi_1) = i \frac{X_L R}{U_m X_L} + \frac{X_L}{U_m} \frac{di}{d\theta}$$

или

$$\sin(\theta + \varphi + \varphi_1) = \frac{i_e^*}{tL} + \frac{d i_e^*}{d\theta}, \quad (1)$$

где

$$i_e^* = i \frac{X_L}{U_m}, \quad tL = \frac{X_L}{R} = \text{tg } \varphi \quad \text{и} \quad R = R_k + R_{св.к}.$$

Используя эти выражения, определим для дальнейших расчетов важный показатель сварочной машины  $\chi$  — коэффициент мощности. В этом случае для установившегося режима активная мощность

$$P = \left( \frac{i_e^* U_m}{X_L} \right)^2 R,$$

полная мощность

$$S = \frac{i_e^* U_m U_m}{X_L \sqrt{2}},$$

т. е.

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{i_e^{*2} U_m^2 R \sqrt{2} X_L}{X_L^2 i_e^{*2} U_m^2} = \frac{1,41 i_e^*}{tL}.$$

Упрощенная схема замещения электрической части машины с компенсатором изображена на рис. 3, б, где используется Г-образная схема замещения трансформатора (без учета цепи протекающего тока холостого хода). Поэтому учитываем, что уравнение (1) трансформируется в уравнение для цепи  $R - L - C$  (в относительных единицах):

$$\sin(\theta + \varphi + \varphi_1) = \frac{i_e^*}{tL} + \frac{d i_e^*}{d\theta} + \frac{X_L}{X_C} U'_C, \quad (2)$$

где  $U'_C = U'_C / U_m$  — относительное значение напряжения на конденсаторе ( $U'_C$  — напряжение на



Сравнительные характеристики серийных машин КТС

Тип машины	$R$ , мкОм	$X_L$ , мкОм	$tL$	$\chi$
МТ-1818	93	307	3,3	0,29
МТ-1618	121	359	2,97	0,31
МТ-2102	95	400	4,21	0,24
МТ-2002	102	479	4,7	0,21
МТ-4019	79	220	2,78	0,34

конденсаторе, приведенное к вторичной стороне сварочного трансформатора).

Теперь определим, как изменяется эффект от продольной компенсации при изменении угла управления тиристором  $\varphi_1$  посредством стандартно применяемого силового тиристорного контактора. Для этого будем брать в расчет данные таблицы серийных машин КТС, взятые из источника [4] (значения коэффициентов мощности  $\chi$  машин даны при  $\varphi_1 = \varphi$ , в режиме короткого замыкания).

Для стационарной машины с самым низким коэффициентом мощности (МТ-2002) при различных активных сопротивлениях  $R_{св.к}$  — от 20 мкОм (при сварке деталей из легких сплавов) до 180 мкОм (типично при сварке деталей из малоуглеродистых сталей) с учетом выражений (1) и (2) рассчитаны данные для трех вариантов включения: без компенсации ( $X_C = 0$ ), с недокомпенсацией ( $X'_C/X_L = 0,75$ ) и полной компенсацией ( $X'_C/X_L = 1$ ). Построены сравнительные графики (рис. 4), иллюстрирующие зависимость  $\chi = f(R_k)$  при различных отношениях  $X'_C/X_L$ . Данные для их построения, а также программа для расчета приведены в [6]. Были рассчитаны: относительное значение напряжения на конденсаторе  $U'_{c0}$  (приведенного к вторичной стороне, по модулю), относительное значение тока  $i_c$ , коэффициент мощности  $\chi$ .

Графики иллюстрируют рассчитанные значения коэффициентов мощности в зависимости от активного сопротивления нагрузки (функция угла включения тиристорного контактора) для машин с компенсатором и без него. Существенное от-

клонение  $X_L$  может быть вызвано переключением ступеней сварочного трансформатора, которых, в зависимости от мощности, бывает от 4 до 12 и отношение наибольшего напряжения к наименьшему обычно не превышает 2,6 [5]. Поэтому в многвитковых трансформаторах переход на соседние ступени будет не столь ощутимым. Из графиков видно, что даже при неполной компенсации коэффициент мощности машин существенно повышается. В частности, у машины МТ-2002 при  $R_k = 20$  мкОм и  $\varphi_1 = 0,8$  (около 60 град) коэффициент мощности равен 0,71, у машины, не оборудованной компенсатором, — 0,39.

Графики иллюстрируют незначительное влияние на коэффициент мощности колебаний  $R_{св.к}$ , изменяющегося в широких пределах. Это означает, что возможные изменения переходных сопротивлений и удельного сопротивления металла при нагреве в зоне контакта будут мало сказываться на стабильности качества сварки. Следовательно, даже на обычной однофазной, но оборудованной компенсатором машине промышленной частоты средней мощности (до 100 кВА), возможны сварка металлов в расширенном диапазоне удельных сопротивлений — от углеродистых сталей до некоторых марок легких сплавов, а также соединение деталей с предварительно нанесенным защитным покрытием с высоким значением электросопротивления. Указанные возможности ограничиваются только техническими особенностями оборудования — максимальной мощностью сварочного трансформатора, исполнением вторичного сварочного контура, максимальным усилием сжатия электродов и их конфигурацией [7].

Компенсация реактивной мощности позволяет проводить сварку с существенной экономией электроэнергии. Принимая во внимание, что дооборудование серийной сварочной машины компенсирующим устройством, в зависимости от ее мощности, добавляет не более 15 % к стоимости, срок окупаемости компенсатора будет относитель-

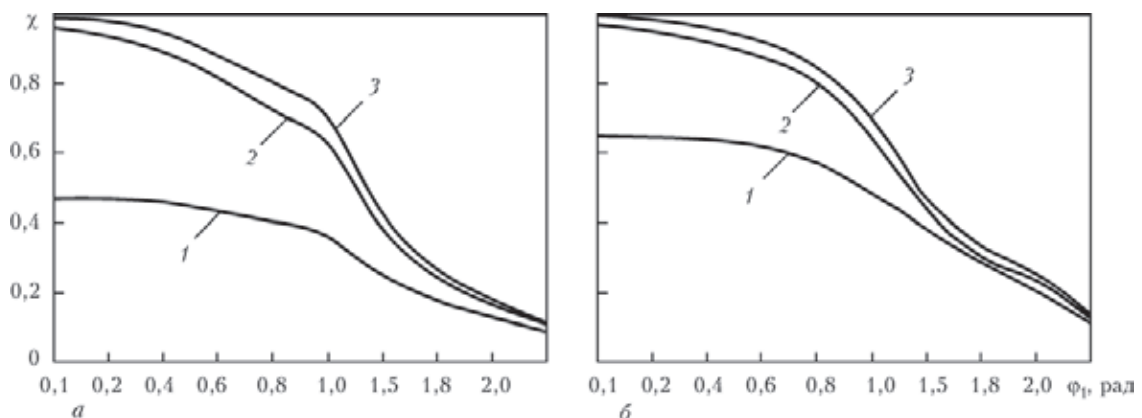


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности  $\chi$  машины КТС с продольной компенсацией от угла включения тиристорного контактора  $\varphi_1$  при  $R_{св.к} = 20 \cdot 10^{-6}$  (а) и  $180 \cdot 10^{-6}$  (б): 1 — без компенсации; 2 — с недокомпенсацией; 3 — с полной компенсацией





но невелик и тем короче, чем больше машина находится в рабочем режиме.

Преимущества продольной компенсации реактивного сопротивления в машинах КТС, работающих на промышленной частоте, очевидны, и таким системам следует уделять внимание при разработке нового оборудования.

Продолжением работ в данной области может стать разработка методики систематизированного расчета конкретных параметров компенсаторов реактивной мощности по реальным данным, полученным при эксплуатации современных машин КТС мощностью до 100 кВА, с учетом возможного дооборудования тиристорным контактором тех моделей, где его применение технологически целесообразно.

### Выводы

1. Применение продольной компенсации реактивной мощности в машинах КТС позволяет поддерживать высокое значение коэффициента мощности в диапазоне фазового регулирования до 60 град (соответствует 5...6 ступеням многовиткового сварочного трансформатора), при неявной зависимости от сопротивления нагрузки, что соответствует практическим условиям эксплуатации сварочной машины.

2. Определено, что в указанном диапазоне изменений угла регулирования лежит область эффективного применения продольной компенсации. При дальнейшем увеличении угла включения

значения коэффициентов мощности для машин, оборудованных компенсирующими устройствами, сопоставимы со значениями режимов машин без применения компенсации.

3. Установлено: в рассмотренном диапазоне фазового регулирования значение коэффициента мощности машины с компенсатором почти не зависит от сопротивления нагрузки, что позволяет выполнять сварку деталей в широком диапазоне удельных сопротивлений.

4. Рекомендуется практическое применение систем с продольной компенсацией реактивной мощности в однофазных машинах КТС установленной мощностью до 100 кВА, с расчетом на недокомпенсацию в пределах 10...25 %.

1. Лебедев В. К., Письменный А. А. Системы питания машин для контактной сварки // Автомат. сварка. – 2001. – № 11. – С. 32–36.
2. Лебедев В. К., Письменный А. А. Система питания машин для контактной сварки с транзисторным инвертором // Там же. – 2003. – № 2. – С. 11–13.
3. Зорин В. В. Компенсация реактивной мощности контактных машин последовательными конденсаторами // Там же. – 1960. – № 6. – С. 28–36.
4. Глебов Л. В., Филиппов Ю. И., Чулошников П. Л. Устройство и эксплуатация контактных машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 308 с.
5. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 59, 302, 342.
6. Письменный А. А. Повышение эффективности систем питания машин для контактной точечной сварки: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 2008. – С. 149.
7. Koubek P. Energeticke aspekty pouzivania zvaracich strojov s trojfazovym napajanim // Zvaranie-Svarovanie. – 2006. – № 10. – S. 288–292.

Поступила в редакцию 27.03.2013

## XIV «УРАЛЬСКАЯ ПРОМЫШЛЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ НЕДЕЛЯ»

*15-18 апреля 2014 г. в Челябинске состоится XIV «Уральская промышленно-экономическая неделя» — специализированные выставки XVII «Металлургия. Метмаш», XVIII «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент», «Промэнерго. Энергосбережение и энергоэффективность», XIV «Экология. Промышленная безопасность».*

*Одновременно пройдет Шестой международный промышленный форум «Реконструкция промышленных предприятий — прорывные технологии в металлургии и машиностроении». Это наиболее авторитетный на территории УрФО международный форум, организуемый Центром международной торговли (Челябинск) при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ и Министерства промышленности и природных ресурсов Челябинской области. С основными докладами и презентациями выступят руководители предприятий и компаний РФ, Италии, Германии, Японии, Австрии, Чехии, Финляндии, Китая, Республики Казахстан, Украины, Республики Беларусь.*

**Контакты:** тел./факс: +7 (351) 239-46-37.

E-mail: vkuznetsova@wtc-chel.ru; http:// www.promforum74.ru