

## ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ПИТАНИЯ КОНТАКТНЫХ МАШИН

П. М. РУДЕНКО, В. С. ГАВРИШ

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

При изготовлении металлических конструкций и изделий широко применяют машины для контактной сварки сопротивлением и оплавлением, мощность которых может достигать нескольких сотен киловатт. В настоящее время для электрического питания этих машин наибольшее распространение получили схемы питания от сети переменного тока частотой 50 (60 Гц), одно- и двухфазное. В настоящее время большое внимание уделяется обеспечению электромагнитной совместимости потребителей электроэнергии, особенно таких мощных, как контактные сварочные машины. Это может быть обеспечено при равномерной нагрузке трехфазной сети, в том числе с помощью преобразователей частоты и числа фаз. Целью настоящей статьи является разработка и анализ преобразователей частоты, обеспечивающих равномерную нагрузку трехфазной сети, существующих мощных контактных машин, сварочные трансформаторы которых рассчитаны на питание от однофазной сети 50 Гц. Показаны преимущества и недостатки преобразователей, работающих на частотах 30, 37,5 и 45 Гц. Опытный образец преобразователя 37,5 Гц прошел промышленные испытания при сварке железнодорожных рельсов. Библиогр. 5, рис. 3.

*Ключевые слова:* контактные сварочные машины, преобразователь частоты и числа фаз, равномерная нагрузка трехфазной сети

Машины для контактной сварки сопротивлением и оплавлением широко применяют при изготовлении металлических конструкций и изделий. При этом каждая из этих машин может иметь различные схемы электрического питания [1–3], наибольшее распространение получили следующие:

- от сети переменного тока частотой 50 (60 Гц), одно- и двухфазное;
- от преобразователей частоты и числа фаз;
- от источников выпрямленного напряжения промышленной частоты;
- от инверторов повышенной частоты с последующим выпрямлением;
- от источников конденсаторного типа.

Разнообразие схем питания объясняется необходимостью задания и обработки различных сварочных циклов, гарантирующих требуемое качество сварных соединений из различных металлов и сплавов. Кроме того, в настоящее время большое внимание уделяется электромагнитной совместимости потребителей электроэнергии, особенно таких мощных, как контактные сварочные машины (ГОСТ 13109–97). Это может быть обеспечено при равномерной нагрузке трехфазной сети, в том числе с помощью преобразователей частоты и числа фаз.

Так, преобразователи частоты, нашедшие применение при контактной сварке, впервые были разработаны фирмой «Сияки» [1, 2]. Однако несмотря на хорошие технологические показатели они широкого распространения не получили из-за слишком громоздкого и тяжелого сварочного

трансформатора, рассчитанного на очень низкую (приблизительно несколько герц) частоту. На основании проведенного В. К. Лебедевым [2] анализа частотных характеристик подобных машин был сделан вывод о том, что требуемые электрические и технологические характеристики можно получить и при более высоких частотах.

Был предложен преобразователь, который работал на частоте 30 Гц без вентиля в вторичной цепи сварочной машины и обеспечивал равномерную нагрузку трехфазной электрической сети [2]. Сварочные машины с таким преобразователем имеют как технологические, так и энергетические преимущества по сравнению с однофазными машинами. По КПД и некоторым другим показателям они превосходят машины постоянного тока. Однако эти машины имеют и определенные недостатки: увеличенную массу и размеры сварочного трансформатора по сравнению с машинами промышленной частоты; невозможность использования такого преобразователя для питания существующих однофазных контактных машин без снижения напряжения питания, так как в этом случае резко возрастает ток холостого хода сварочного трансформатора (в десятки раз), что приводит к увеличению электрических потерь и сбоям в работе системы автоматического регулирования вплоть до аварийных режимов.

Целью настоящей статьи является разработка и анализ преобразователей частоты, обеспечивающих равномерную нагрузку трехфазной сети, существующих мощных контактных машин, сварочные трансформаторы которых рассчитаны на



питание от однофазной сети 50 Гц. Авторами разработаны алгоритмы управления преобразователями с применением частот 37,5 и 45 Гц, при которых в значительной мере устраняются эти недостатки. Формы напряжения на выходе таких преобразователей приведены на рис. 1.

Наиболее простой и надежный трехфазный преобразователь числа фаз можно построить по схеме с непосредственным преобразованием (без промежуточного звена постоянного тока) с использованием в качестве управляющих элементов тиристоров, которые допускают многократную перегрузку по току. Эффективность работы преобразователя оценим по коэффициенту эффективности  $K_3$  загрузки сети при одно- и трехфазном питании, а также минимальному времени усреднения фазного (линейного) тока при равномерной нагрузке фаз.

При этом наиболее эффективной схемой источника питания мог бы быть трехфазный выпрямитель. При одинаковой нагрузке на каждую фазу (что можно допустить с достаточной для практической оценки точностью) среднее значение каждого фазного тока, а следовательно, и соответствующей мощности будет постоянным при времени усреднения, равном половине периода, т. е. 10 мс.

При этом, если пренебречь падением напряжения на диодах, эффективное напряжение на вы-

ходе двухполупериодного трехфазного моста (6-пульсной схемы выпрямления) составляет

$$U_e = 0,957U_m,$$

где  $U_m$  — амплитуда линейного напряжения.

Как известно, эффективное напряжение двухфазной сети питания  $U_e = 0,707U_m$ . Далее для простоты оценки предполагаем, что модуль полного сопротивления цепи нагрузки, который зависит от частоты питающего напряжения,  $Z$  мало изменяется для рассматриваемых форм выходного напряжения. Тогда для двухполупериодного трехфазного моста получается следующее значение коэффициента эффективности загрузки сети — относительной мощности на его выходе по сравнению с максимально возможным потреблением электроэнергии только от двух фаз

$$K_3 = (0,957U_m / 0,707U_m)^2 = 1,832.$$

Такая система также имеет технологические преимущества, поскольку коэффициент амплитуды, представляющий собой отношение амплитудного значения напряжения к его эффективному значению  $K_a = U_a / U_e$ , равен 1,045, тогда как для переменного тока  $K_a = 1,41$  [1].

Заметим, что система питания является симметричной и уравновешенной, когда сумма мгновенных мощностей по каждой фазе в любой момент времени является постоянной. При таком потреблении электрической энергии коэффициент эффективности  $K_3 = 3$ .

Эффективность выпрямительной схемы питания снижается из-за необходимости установки выпрямителя во вторичной цепи силового трансформатора. При этом падение напряжения на диодах соизмеримо с напряжением на выходе выпрямителя и значительная часть мощности теряется на выпрямителе.

Если использовать преобразователь, который питает первичную цепь силового трансформатора напряжением в виде импульсов квазипостоянного тока, то потери на управляемых выпрямителях будут незначительными. Однако при переключении полярности импульсов напряжения на входе трансформатора необходимо пропускать включение как минимум на двух последовательных линейных напряжениях. Вследствие этого длительность каждого полупериода увеличивается на 6,6 мс, а следовательно, возрастает время усреднения, в течение которого выравниваются фазные токи и соответственно падает выходная мощность схемы питания.

Так, при частоте выходного напряжения 30 Гц

$$K_3 = 1,314, T_c = 50 \text{ мс}, K_a = 1,23,$$

а при 37,5 Гц

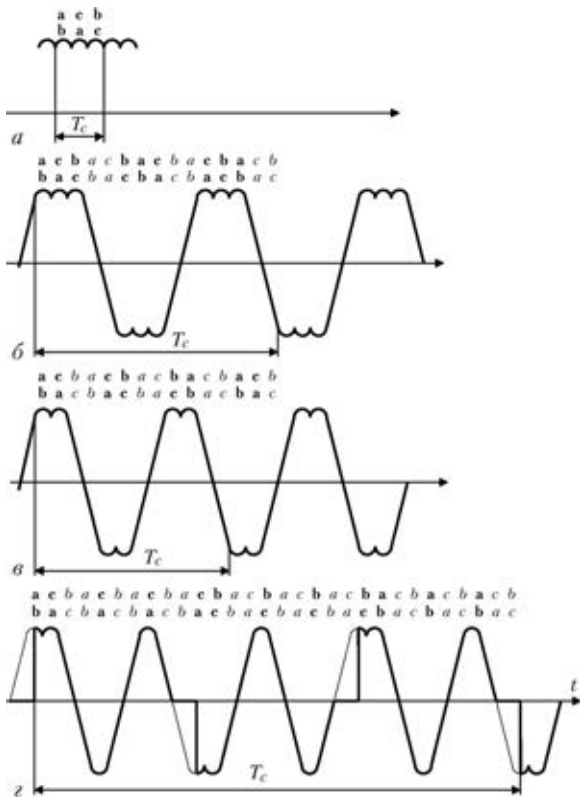


Рис.1. Формы напряжения на выходе 6-пульсного выпрямителя (а), преобразователя частоты 30 (б), 37,5 (в) и 45 (г) Гц. Жирные буквы — линейные напряжения, на которых включается выпрямитель

$$K_3 = 1,195, T_c = 40 \text{ мс}, K_a = 1,29.$$

Для работы на указанных частотах необходимо использовать специально разработанные трансформаторы. Обычные трансформаторы, установленные на двухфазных сварочных машинах для переменного тока частотой 50 (60) Гц, сложно использовать из-за их высокого тока холостого хода на частотах значительно ниже 50 Гц, например, 37,5 Гц. Так, экспериментальные исследования силового трансформатора для стыковой машины К-1000 показали, что при питании от сети переменного тока напряжением выше 360 В, частотой 37,5 Гц ток холостого хода увеличивается в 10 раз по сравнению с питанием напряжением частотой 50 Гц при том же эффективном напряжении (рис. 2). При питании машин от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением  $U = 380 \text{ В}$  ток холостого хода для машины К-190 составляет 20 А, а для машины К-1000 — 35 А. Очевидно, что при частоте напряжения 30 Гц работа трансформаторов 50 Гц будет еще более усложнена.

Если преобразователь предполагается использовать для трансформаторов 50 (60) Гц, необходимо применять специальные меры. При этом основной показатель — равная загрузка фаз — должен сохраняться.

Простейшим способом повышения частоты является «вставка» в форму напряжения 37,5 Гц кратного числа периодов напряжения с частотой 50 Гц после каждого импульса напряжения одной полярности на том линейном напряжении, на котором заканчивается импульс [4]. В этом случае

$$K_3 = [(2n + 1)/(2n + 1,333)]^2, \\ T_c = 40 + 60n, K_a = 1,41(2n + 1,133)/(2n + 1).$$

В частности, при  $n = 1$  частота напряжения составляет 45 Гц [5]

$$K_3 = 0,81, T_c = 100 \text{ мс}, K_a = 1,56.$$

Показатели эффективности по мощности и коэффициенту амплитуды приближаются к данным для двухфазного питания, так как питание фактически осуществляется сериями импульсов 50 Гц. При этом значительно уменьшается ток холостого хода сварочного трансформатора, а трехфазный отбор электроэнергии позволяет получить равномерную загрузку сети при времени усреднения 0,1 с.

Таким образом, все рассмотренные алгоритмы имеют как преимущества, так и недостатки. Наиболее оптимальным для уже имеющихся сварочных машин является алгоритм с применением напряжения с частотой 37,5 Гц.

Источник питания с частотой напряжения 37,5 Гц прошел производственные испытания при сварке сопротивлением изделий большого сечения. При сварке оплавлением он работал более

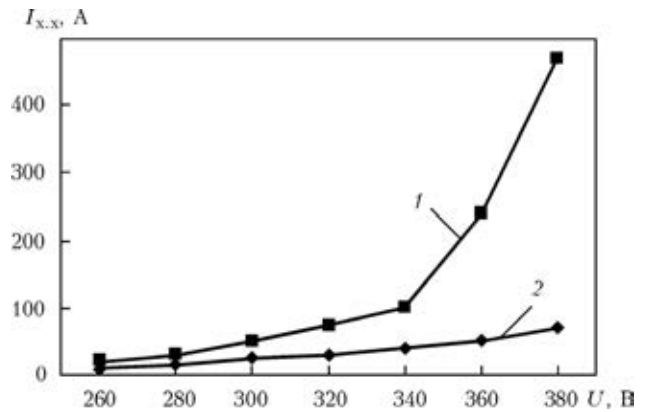


Рис. 2. Зависимость тока холостого хода от входного напряжения для сварочных трансформаторов машин К-190 (2) и К-1000 (1) при питании от преобразователя частоты 37,5 Гц

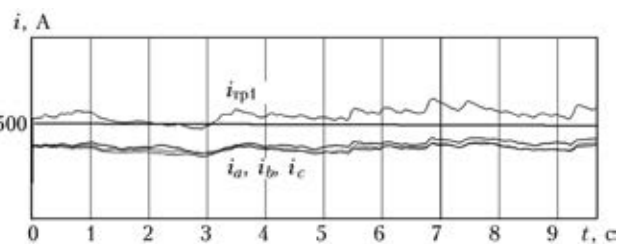


Рис. 3. Осциллограммы токов  $i_a, i_b, i_c$  в фазах A, B, C на входе преобразователя и тока в первичной цепи сварочного трансформатора  $i_{tr1}$  при сварке рельсов на машине К-1000 с использованием преобразователя частоты и числа фаз

двух лет на рельсосварочном поезде (технологическими испытаниями источника руководил науч. сотrud. ИЭС им. Е. О. Патона А. В. Дидковский). На завершающем этапе испытаний осуществляли сварку плетей, установленных в главный путь железной дороги. Как в первом, так и во втором случае качество сварных изделий соответствовало техническим требованиям для этих изделий.

Осциллографирование фазных токов на входе преобразователя частоты и числа фаз при сварке (рис. 3) показало их равенство между собой и уменьшение на 20 % по сравнению с током в нагрузке (выходе источника).

## Выводы

1. Преобразователи частоты с алгоритмами управления на частотах 37,5 и 45 Гц имеют электрические преимущества перед источниками питания машин для контактной сварки промышленной частоты за счет потребления электроэнергии от трех фаз.

2. Опытно-промышленные испытания преобразователя частоты на 37,5 Гц показали его возможность и целесообразность применения для контактной сварки оплавлением, в частности, железнодорожных рельсов. При этом обеспечивается равномерная загрузка трехфазной электрической сети.



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. Совершенствование систем питания машин для контактной сварки сопротивлением // Сварка и родственные технологии — в XXI век. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 130–136.
3. Лебедев В. К., Письменный А. А. Система питания машин для контактной сварки с транзисторным инвертором // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 11–13.
4. Пат. 86279 Україна, МПК (2009) В23К 11/24. Спосіб електричного живлення однофазних контактних машин змінного струму / С. І. Кучук-Яценко, В. С. Гавриш, П. М. Руденко та ін.; опубл. 10.04.2009.
5. Пат. 100064 Україна, МПК В23К 11/24 (2006.01). Спосіб електричного живлення зварювального трансформатора однофазних контактних машин змінного струму / С. І. Кучук-Яценко, В. С. Гавриш, П. М. Руденко та ін.; опубл. 12.11.2012.

Поступила в редакцію 15.04.2013

## НОВЫЕ КНИГИ

**Сварка и наплавка меди и сплавов на ее основе** / Составители: В. М. Илюшенко, Е. П. Лукьянченко. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 396 с.

Сборник включает основные публикации — статьи, доклады, информационные материалы и изобретения в области сварки и наплавки меди и ее сплавов за период с 1953 по 2013 гг., авторами которых являлись в основном сотрудники Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В представленных материалах освещен широкий круг вопросов разработки прогрессивных технологических процессов сварки и наплавки этих материалов и опыт их промышленного применения в различных отраслях промышленности.

Может быть полезен инженерно-техническим работникам сварочного производства, а также специалистам, занимающимся исследованиями в этой области.



**Сидорец В. Н., Пентегов И. В. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой.** — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 272 с.

Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты наглядны и достаточно подробно проиллюстрированы.

Рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем, может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.



Заказы на книги просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка».