

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СТАБИЛИЗАЦИИ СВАРОЧНОЙ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Показана можливість знаходження оптимальної різниці фаз між початком стабілізуючого імпульсу та переходом зварювального струму через нуль, яка забезпечує мінімальні значення напруги холостого ходу трансформатора, при якому дуга горить стійко. Шляхом математичного моделювання підтверджено переважне застосування зворотної (по відношенню до зварювального струму) полярності стабілізуючого імпульсу, виявлене раніш експериментально.*

*Показана возможность нахождения оптимальной разности фаз между началом стабилизирующего импульса и переходом сварочного тока через нуль, которая обеспечивает минимальное значение напряжения холостого хода трансформатора, при котором дуга горит устойчиво. Путем математического моделирования подтверждено предпочтительное применение обратной (по отношению к сварочному току) полярности стабилизирующего импульса, обнаруженное ранее экспериментально.*

### ВВЕДЕНИЕ

Как показал практический опыт, традиционные источники питания для дуговой сварки на базе трансформаторов продолжают успешно конкурировать со сварочными источниками питания инверторного типа.

Простота и надежность работы традиционных источников питания это те свойства, которыми еще не обладают инверторные источники питания, содержащие большое количество элементов силовой электроники.

Усовершенствование традиционных сварочных источников питания идет по пути устранения их основного недостатка – большой массы сварочного трансформатора. Необходимость обеспечения высоких значений напряжения холостого хода трансформатора для обеспечения стабильного горения сварочной дуги и устойчивости всего сварочного процесса является причиной большой массы трансформатора. Одним из путей усовершенствования традиционных сварочных источников питания является применение устройств стабилизации горения дуги [1, 2], которые питают дугу импульсами тока, что обеспечивает стабильное ее горение при более низких значениях напряжения холостого хода сварочного трансформатора. Поскольку способов подачи стабилизирующих импульсов может быть много, то это открывает широкие возможности и перспективы для исследований.

Таким образом, является актуальной проблема не только исследования условий горения сварочной дуги и влияния на них режимов стабилизации, а и оптимизации этих режимов. Эта задача относится к анализу нелинейных электрических цепей, для которых методы исследования развиты недостаточно и во многом бывают индивидуальными. Разработка таких методов посвящена предыдущая работа авторов [3]. Настоящая статья посвящена оптимизации режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока.

### ПАРАМЕТРЫ И КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ

В качестве критерия оптимизации выберем значение напряжения холостого хода трансформатора, при котором сварочная дуга горит еще устойчиво. Этот выбор понятен, т.к. именно напряжением холостого хода определяется масса и габарит трансформатора.

Чтобы добиться минимума выбранного критерия будем варьировать такой параметр импульса как разность фаз между сварочным током и стабилизирующим импульсом. Представляет также интерес исследование влияния полярности стабилизирующего импульса относительно полярности тока, перешедшего через нуль.

В первых разработках устройств стабилизации

использовались импульсы, полярность которых совпадает с полярностью сварочного тока. Затем экспериментальным путем было установлено [1], что предпочтительнее использовать импульсы, полярность которых противоположна полярности тока.

Анализ имеющихся в литературе данных показывает, что у авторов нет единого мнения в вопросе выбора момента подачи стабилизирующего импульса. Так в работе [4] стабилизирующий импульс подается в пределах участка вольтамперной характеристики тлеющего разряда, т.е. практически сразу после перехода тока через нуль. В другом устройстве [5] введен фазовращатель, позволяющий посылать стабилизирующий импульс с произвольной фазой. Авторы [6] утверждают, что наиболее целесообразно посылать стабилизирующие импульсы при достижении напряжения на дуговом промежутке 15..20В, а в работе [7] – 20..50В.

Количественные оценки фазы подачи импульса приведены в работе [2]. Авторы ее рекомендуют подавать импульс каждый полупериод при разности фаз между напряжением и импульсом

$$\Delta\psi = \arcsin \frac{U_D}{U_m}, \quad (1)$$

где  $U_D$  – напряжение горения дуги,  $U_m$  – амплитудное значение напряжения холостого хода, что совпадает с разностью фаз между сварочным током и напряжением при моделировании дуги как противо-ЭДС.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Как было показано в работе [8] обобщенная математическая модель динамической дуги наиболее адекватно описывает динамику электрической дуги как элемента электрической цепи. Она учитывает не только нелинейность статической вольтамперной характеристики, но и термическую инерционность столба дуги. Именно термические процессы и в первую очередь процесс ионизации-деионизации влияют на проводимость плазмы столба дуги. Столб дуги переменного тока 50 Гц при каждой смене полярности успевает деионизироваться, что требует повышенного напряжения для повторной ионизации и поддержания горения разряда. Если источник питания не может обеспечивать необходимое напряжение, дуга гаснет.

Упрощенная схема силовой части традиционных сварочных источников питания переменного тока представляет собой последовательно включенные синусоидальный источник переменного напряжения  $E(t)$ , сопротивление  $R$  и реактор  $L$ , подключенные к дуге  $A$ .

Для проведения исследований будем рассматри-

вать две электрической цепи с дугой, которые отличаются друг от друга контуром стабилизации. Первая (рис. 1), упрощенная, содержит подключенный параллельно дуги идеальный источник импульсного тока  $J_p(t)$ .

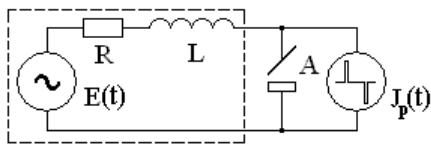


Рис. 1. Схема источника питания переменного тока со стабилизатором в виде идеального источника импульсного тока

Система дифференциальных уравнений, которые описывают эту цепь на этапе отсутствия импульса, состоит из уравнения Кирхгофа и уравнения обобщенной математической модели динамической дуги

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_A = E(t);$$

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i_A^2; \quad (2)$$

где  $i$  – ток реактора  $L$  и резистора  $R$ ,  $E(t)$  – напряжение источника питания, в общем случае имеющее вид  $E(t) = U_m \sin \omega t$  ( $U_m$  – амплитуда напряжения холостого хода). Напряжение на столбе дуги  $u_A$  (при электродными падениями напряжения пренебрегаем) и ток дуги  $i_A = i$  связаны соотношением

$$u_A = \frac{U(i_\theta)}{i_\theta} i_A, \quad (3)$$

где  $i_\theta$  – ток состояния дуги [8],  $\theta$  – постоянная времени дуги, функция  $U(i)$  задает вид статической вольт-амперной характеристики дуги, которая имеет падающий вид. Эта функция выбиралась в виде

$$U(i) = U_0 \cdot \left( \frac{i}{I_0} \right)^n, \quad (4)$$

где  $U_0$  и  $I_0$  – одна из точек на статической вольт-амперной характеристике. При отрицательных значениях параметра  $n$  функция является разновидностью гиперболы, т.е. вольт-амперная характеристика падающая. Для свободно горящих дуг  $n = -1/3$  (при расчете применялось именно это значение). Для дуг под флюсом  $n \rightarrow 0$ , оставаясь отрицательным, при этом статическая вольт-амперная характеристика становится почти независимой. Значения  $U_0$  и  $I_0$  использовались нами при приведении системы дифференциальных уравнений к безразмерному виду как масштабы напряжений и токов. Для удобства в качестве масштаба времени использовали величину  $1/\omega$ .

Для применения большинства численных методов интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений систему приводят к каноническому виду, решая ее относительно производных

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [U_m \sin t - Ri - i \cdot i_\theta^{n-1}];$$

$$\frac{di_\theta}{dt} = \frac{1}{2\theta} \cdot \frac{i^2 - i_\theta^2}{i_\theta}. \quad (5)$$

Здесь все переменные и параметры безразмерные.

Система дифференциальных уравнений, которая описывает переходные процессы на этапе импульса, получается из системы (2), если ток дуги

$$i_A = i + J(t) = i + J_m \sin \Omega(t - \Delta\psi), \quad (6)$$

где  $J_m$  и  $\Omega$  – амплитуда и частота импульсов тока,  $\Delta\psi$  – разность фаз между стабилизирующими импульсами и напряжением холостого хода.

Вторая схема (рис. 2) содержит контур стабилизации, который полностью соответствует применяемому на практике [1]. Конденсатор  $C_p$  запитан от дополнительной обмотки, которая моделируется источником переменного напряжения  $E_p(t)$ . Индуктивности рассеяния дополнительной обмотки соответствует реактор  $L_p$ . Для коммутации используется ключ  $K$  на базе тиристоров, которые будем считать идеальными.

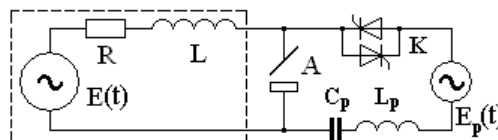


Рис. 2. Схема источника питания переменного тока со стабилизатором в виде LC-контур

Поскольку на этапе отсутствия импульса цепи на рис. 1 и 2 совпадают, то и описываются они той же системой дифференциальных уравнений (2), при условии  $i_A = i$ .

На этапе подачи импульса ток дуги содержит два слагаемых  $i_A = i + i_p$ , где  $i_p$  – ток в дополнительном контуре, а уравнения системы (2) дополняются еще двумя

$$L_p \frac{di_p}{dt} + u_p - u_A = E_p(t);$$

$$C_p \frac{du_p}{dt} = -i_p; \quad (7)$$

где  $u_p$  – напряжение на конденсаторе  $C_p$ .

После приведения уравнений систем (2) и (7) к каноническому виду имеем

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [U_m \sin t - Ri - (i + i_p) \cdot i_\theta^{n-1}];$$

$$\frac{di_\theta}{dt} = \frac{1}{2\theta} \cdot \frac{(i + i_p)^2 - i_\theta^2}{i_\theta};$$

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_p} [U_p \sin t - u_p + (i + i_p) \cdot i_\theta^{n-1}];$$

$$\frac{du_p}{dt} = -\frac{1}{C_p} \cdot i_p. \quad (8)$$

В системе (8) все переменные и параметры безразмерные. Масштабы напряжений, токов и времен аналогичны рассмотренным выше.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ И УСЛОВИЯ СШИВКИ РЕШЕНИЙ

Решение систем дифференциальных уравнений находилось на интервале полупериода, т.е. для безразмерного времени  $t$  на промежутке  $[0; \pi]$ . Считали, что напряжение питания имеет нулевую фазу.

Для нахождения разности фаз между напряжением холостого хода и током сварочной дуги, т.е. момента, когда  $i_A = 0$ , пользовались методикой нахождения сечения Пуанкаре [9, с. 242-246], которая успешно применяется при исследовании нелинейных динамических систем. Система (2) интегрируется по времени и отслеживается момент перехода тока  $i_A$  через нуль. Как только это произошло, отбрасываем последний шаг и интегрируем следующую систему дифференциальных уравнений по току

$$\frac{dt}{di} = \frac{L}{U_m \sin t - Ri - i \cdot i_0^{n-1}}; \quad (9)$$

$$\frac{di_0}{di} = \frac{L}{2\theta} \cdot \frac{i^2 - i_0^2}{i[U_m \sin t - Ri - i \cdot i_0^{n-1}]}.$$

от значения на предпоследнем шаге до нуля. Таким образом, за один шаг интегрирования можно найти значение  $t_0$ , когда ток дуги становится равным нулю, с заданной точностью.

Затем повторяем интегрирование системы (2) на интервале времени  $[0; t_0 + \Delta\phi]$ , где  $\Delta\phi$  – разность фаз между током дуги и стабилизирующим импульсом. Значения переменных на последнем шаге используем в качестве начальных на этапе подачи стабилизирующего импульса.

Разница в нахождении решения на этапе подачи стабилизирующего импульса для цепей, изображенных на рис.1 и 2, состоит не только в том, что интегрируется два или четыре дифференциальных уравнения. Разные также интервалы интегрирования: в первом случае длина интервала равна  $\pi/\Omega$ , а во втором она неизвестна. Она определялась из условия  $i_p = 0$  с помощью методики описанной выше.

Третий этап аналогичен первому, а интегрирование ведется до момента времени  $t = \pi$ .

Сшивка решения через полпериода выполняли по условиям

$$i(0) = -i(\pi); i_0(0) = i_0(\pi); u_p(0) = -u_p(\pi). \quad (10)$$

Причем первые два условия относятся к первой и второй цепям, а второе – только ко второй.

#### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕШЕНИЙ

На рис. 3 и 4 показаны временные зависимости токов и напряжений, которые являются решениями систем дифференциальных уравнений, описанных выше ( $U_m = 6.5$ ;  $R = 1.5$ ;  $L = 0.5$ ;  $\theta = 0.05$ ;  $J_m = \pm 2$ ;  $\Omega = 50$ ;  $\Delta\phi = 7^\circ$  все параметры безразмерные). Они довольно хорошо совпадают с осциллограммами полученными экспериментально [1].

На первый взгляд особой разницы между применением стабилизирующих импульсов различной полярности нет.

#### РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Постановка оптимизационной задачи была следующей. Для каждого значения параметра  $\Delta\phi$  определялось минимальное значение  $U_m^{\min}$ , при котором сварочная дуга горит устойчиво. По этим данным строился графики (рис. 5).

Из графиков, изображенных на рис. 5 видно, что обе кривые имеют минимум, т.е. оптимизация возможна. Для более точного определения минимума применялась интерполяция кубическими сплайнами [10].

Сравнительный анализ показывает, что при больших значениях разности фаз  $\Delta\phi$  минимальное напряжение горения дуги в обоих случаях почти одинаково. Объясняется это тем, что при больших значениях разности фаз  $\Delta\phi$  стабилизирующий импульс подается тогда, когда процессы, связанные с переходом тока через нуль уже окончены. Поэтому полярность импульса значения не имеет.

При малых значениях разности фаз  $\Delta\phi$  минимальное напряжение горения дуги при полярности стабилизирующего импульса противоположной сварочному току всегда меньше, чем при полярности, совпадающей с полярностью сварочного тока. Это относится и к минимумам этих кривых, хотя в первом

случае абсцисса минимума меньше. Таким образом, применение стабилизирующего импульса с полярностью противоположной сварочному току более предпочтительно. Этот вывод подтверждается и практический опыт построения источников питания со стабилизаторами [1].

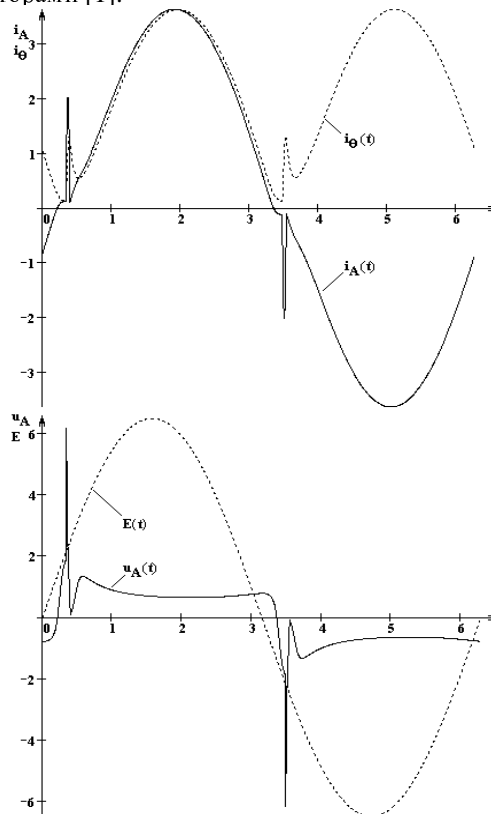


Рис. 3. Временные зависимости напряжений и токов в цепях со стабилизирующими импульсами от идеального импульсного источника тока. Полярность импульса совпадает с полярностью тока дуги

Попытаемся объяснить этот эффект.

Стабилизирующий импульс воздействует не только на дугу, но и на контур цепи основного источника питания. Это проявляется особенно при состоянии дуги близкому к погасанию, т.е. когда дуга представляет собой большое сопротивление. Временные зависимости токов, приведенные на рис. 6 и 7, помогают проиллюстрировать сказанное.

Как видно из рис.6, что импульс, полярность которого совпадает с полярностью тока дуги, приводит к уменьшению тока  $i(t)$  основного источника питания, что отрицательно сказывается, когда импульс кончается.

Стабилизирующий импульс, полярность которого противоположна полярности тока дуги, приводит к повышению тока  $i(t)$  основного источника питания. Поэтому после окончания импульса сам основной источник выполняет роль стабилизирующего устройства.

#### ВЫВОДЫ

1. Усовершенствование традиционных сварочных источников питания должно идти по пути устранения их основного недостатка – большой массы сварочного трансформатора путем оптимизации.

2. Нахождение минимума массы трансформатора может быть заменено минимизацией напряжения холостого хода за счет изменения разности фаз между током дуги и стабилизирующими импульсами.

3. Обобщенная математическая модель динамической дуги наиболее адекватно описывает динамику электрической дуги как элемента электрической цепи и позволяет не только моделировать переходные процессы в электрических цепях с дугой, исследовать вопросы устойчивости, а и решать задачи оптимизации.

4. Минимум напряжения холостого хода существует, причем для стабилизирующих импульсов различной полярности.

5. Применение стабилизирующих импульсов, полярность которых противоположна полярности тока дуги, более предпочтительно. Это может быть объяснено влиянием стабилизирующих импульсов на основной источник питания.

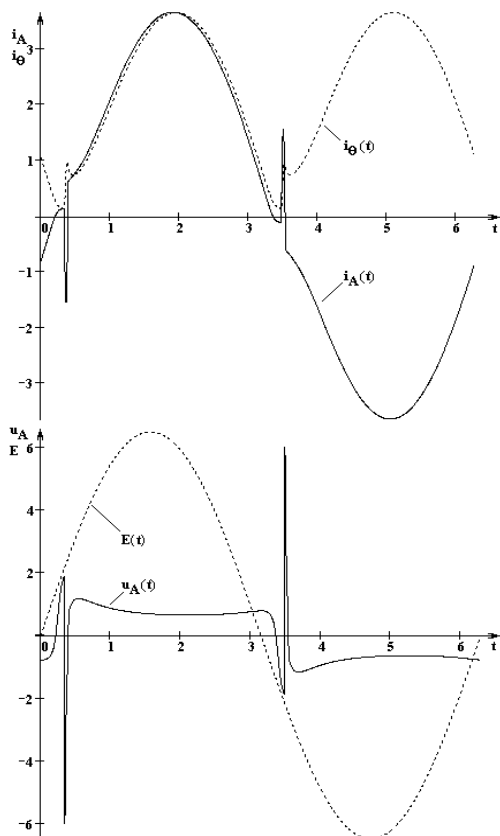


Рис. 4. Временные зависимости напряжений и токов в цепях со стабилизирующими импульсами от идеального импульсного источника тока. Полярность импульса противоположна полярности тока дуги

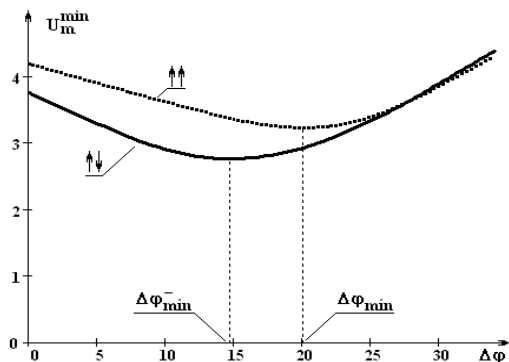


Рис. 5. Зависимости минимального напряжения холостого хода от разности фаз между током и стабилизирующим импульсом. Сплошная кривая – полярность импульса противоположна полярности тока дуги. Пунктирная кривая – полярности совпадают. Разность фаз  $\Delta\varphi$  – в градусах

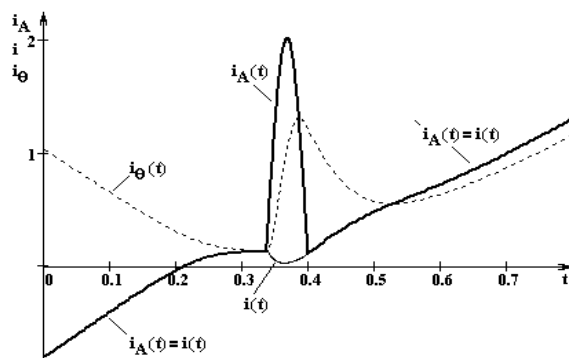


Рис. 6. Временные зависимости токов с укрупненным масштабом на этапе подачи стабилизирующего импульса. Полярность импульса совпадает с полярностью тока дуги

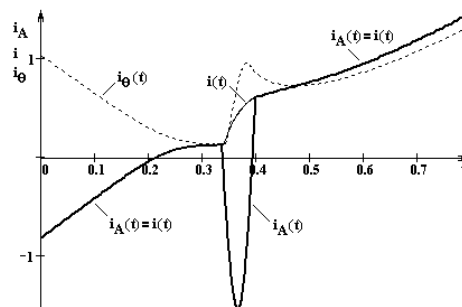


Рис. 7. Временные зависимости токов с укрупненным масштабом на этапе подачи стабилизирующего импульса. Полярность импульса противоположна полярности тока дуги

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б.Е. Патон, И.И. Заруба, В.В. Дименко, А.Ф. Шатан –К.: Екотехнологія, 2007. – 248 с.
2. Заруба И.И., Андреев В.В., Дименко В.В. Усовершенствование трансформаторов для ручной дуговой сварки // Автоматическая сварка. –2001. – №3. –С. 45-48
3. Сидорец В.Н., Андрианов А.А. Методы анализа режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока // Технічна електродинаміка, 2007, Тематичний випуск, Силова електроніка та енергоефективність. Частина 5. –С. 71-74
4. А.с. 179860 СССР В23К 9/10. Способ стабилизации сварочной дуги переменного тока / С.М.Катлер, Ю.Е.Алексеев, С.М.Белинский, Б.Я.Темкин – Оpub. 1966. Б.И. №6.
5. А.с. 633685 А1 СССР В23К 9/06. Устройство для стабилизации сварочной дуги переменного тока / Н.М.Трофимов, В.В.Коряжкин, В.Н.Лукашов, А.М. Зайцев – Оpub. 25.11.1978. Б.И. №43. – 2 с.
6. Патон Б.И., Завадский В.А. Импульсное зажигание дуги при газoeлектрической и ручной дуговой сварке // Автоматическая сварка. –1956. –№3. –С. 26-35.
7. Пат. 3328637 А1 США В23К 9/06. Alternating current arc power source / В.І. Aldenhoff –Оpub. 27.06.1967. – 6 с.
8. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги // Автоматическая сварка. –1988. –№11. –С. 36-40.
9. Методы анализа нелинейных математических моделей. / М. Холодниок, А. Клич, М. Кубичек, М. Марек –Москва: Мир, 1991. –368 с.
10. Майер Р.В. Расчет электрических цепей в системе MathCAD. –Г.лазов: ГГПИ, 2007. – 44 с.

Поступила 21.07.08

Андрианов Александр Анатольевич,  
Сидорец Владимир Николаевич, к.т.н.  
Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины,  
Украина, 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11, ИЭС  
им. Е.О.Патона, тел. (044) 271-2349, e-mail: sidvn@ua.fm