

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕЙЛОРОВСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В РЕЗОНАНСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

И. В. ВЕРТЕЦКАЯ, А. Е. КОРОТЫНСКИЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью моделирования электрических процессов в источниках для дуговой сварки резонансного типа предложено использовать дифференциально-тейлоровское преобразование, которое существенно упрощает вычислительные процедуры для анализа режимов и определения основных параметров вторичного контура. Суть этого метода заключается в преобразовании временной непрерывной функции оригинала в функцию изображения от дискретного аргумента, коэффициенты которой именуются дискретами. Точность полученных результатов определяется количеством дискрет, используемых на этапе анализа изображений. Библиогр. 6, рис. 1.

Ключевые слова: оригинал, изображение, дифференциально-тейлоровское преобразование, ДТ-модель, резонансный источник

Известно [1], что дифференциально-тейлоровское преобразование (ДТП), предложенное и изученное Г. Е. Пуховым, получило в последние годы широкое применение в задачах математического моделирования нелинейных электрических цепей, к которым относятся и источники для дуговой сварки. Суть метода ДТП заключается в преобразовании функции оригинала некоторого непрерывного аргумента, например, времени, в функцию изображения дискретного аргумента, коэффициенты которой именуются дискретами. Таким образом, осуществляется переход от дифференциальных уравнений электрических цепей к алгебраическим, что существенно упрощает вопросы моделирования и анализа полученных результатов.

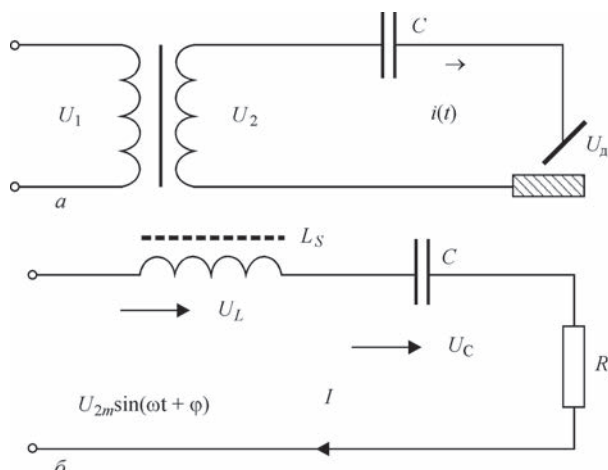
При этом осуществляется прямое и обратное преобразование функции $x(t)$ непрерывного аргумента t в дискретную функцию $X(k) = C_k$ дискретного аргумента $k = 0, 1, 2 \dots n$. Обычно указанная пара преобразований представляется в виде следующих выражений:

$$X(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k x(t)}{dt^k} \right]_{t=0} \leftrightarrow x(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{1}{H} \right)^k X(k),$$

где слева стоит прямое преобразование оригинала $x(t)$ в преобразование $X(k)$, а справа обратное преобразование $X(k)$ в $x(t)$.

Значения функции $X(k)$ при конкретных значениях аргумента k называется дискретами ($X(0)$ — нулевая дискрета, $X(1)$ — первая дискрета и т. д.).

Используя предложенный Г. Е. Пуховым метод анализа и синтеза нелинейных электрических цепей, проведем исследование режимов работы сварочных источников LC -типа. В линейном приближении их работа описана достаточно подробно в работах [2, 3]. В предлагаемом сообщении ставится задача анализа работы этих устройств с учетом нелинейного характера реактивных и активных сопротивлений, образующих вторичный контур. Упрощенное схематическое изображение рассматриваемого устройства показано на рис. 1, а, а эквивалентная схема вторичного контура — рис. 1, б. Здесь приняты следующие обозначения: L_S — индуктивность рассеивания; C — электрическая емкость конденсаторного блока; R_d — нелинейное сопротивление дугового промежутка и соответственно падения напряжения на этих элементах U_L , U_C и U_d .



Схематическое изображение устройства (а) и эквивалентная схема вторичного контура (б)

Уравнение, описывающее состояние такой схемы, как известно [4], имеет вид:

$$U_2(t) = U_L + U_C + U_d, \quad (1)$$

где

$$U_L = \frac{d\psi}{dt} = L_S(I) \frac{dI}{dt}, \quad U_C = \frac{1}{C} \left[g_0 + \int_0^t I(t) dt \right],$$

$$U_d = R_d(I)I(t).$$

Если подходить строго и в уравнении (1) все три слагаемые рассматривать нелинейными относительно сварочного тока $I(t)$, получим нелинейное дифференциальное уравнение в следующем представлении:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + k_1 \left(\frac{dI}{dt} \right) + k_2 I = 0, \quad (2)$$

где

$$k_1 = \frac{R_d}{L_S(I)}, \quad k_2 = \frac{1}{CL_S(I)}.$$

Как известно [5], анализ вынужденных колебаний в таких нелинейных RCL -цепях проводится методами хаотической динамики. В зависимости от выбора параметров цепи здесь возможны проявления детерминированного хаоса, однако это выходит за рамки данного сообщения.

Поскольку, как показывает опыт, значение электрической емкости C практически не зависит от тока в диапазоне рабочих режимов, то эту нелинейность из дальнейшего анализа исключим. Следовательно, с учетом того, что начальный заряд по условию равен нулю ($g_0 = 0$), то напряжение на C определится выражением:

$$U_C = x_C I(t) = \frac{I(t)}{314C}.$$

Значение индуктивности рассеивания можно получить экспериментальным путем и задать ее таблично либо аппроксимировать квадратичным полиномом:

$$L_S(I) = k_0 + k_1 I + k_2 I^2.$$

Что же касается сопротивления дугового промежутка, то его также можно получить экспериментальным путем для конкретного исполнения сварочного источника, либо из известного соотношения $U = U_0 + 0,04I(t)$ (ГОСТ 95–77), где $U_0 = 20$ В для ручной дуговой сварки. Разделив правую и левую части на $I(t)$, получим $R_d(I) = U_0 / I(t) + 0,04$.

Таким образом, нелинейное уравнение сварочного контура может быть приведено к виду:

$$\frac{dI}{dt} (k_0 + k_1 I + k_2 I^2) + I \left(0,04 + \frac{1}{314C} \right) + U_0 = U_{2m} \sin(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

Решать это нелинейное дифференциальное уравнение будем методом ДТП [1].

Перевод уравнения цепи с учетом специфики работы сварочного источника в область T -изображений по переменной времени t на отрезке $0 \leq t \leq H$ дает следующую ДТ-модель:

$$\frac{k+1}{H} I(k+1) \left(k_0 \vartheta(k) + k_1 I(k) + k_2 \sum_{l=0}^{l=k} I(k-l) I(l) \right) +$$

$$+ I(k) \left(0,04 + \frac{1}{314C} \right) + U_0 \vartheta(k) =$$

$$= \frac{(\omega H)^k}{k!} U_{2m} \left(\cos \varphi \sin \frac{\pi k}{2} + \sin \varphi \cos \frac{\pi k}{2} \right),$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, \infty,$$

где $\vartheta(k)$ — тейлоровская единица.

Зная начальную дискрету $I(0) = i(0)$, по этой формуле можно последовательно найти дискреты $I(1), I(2), \dots, I(n)$, затем представить решение в форме конечного отрезка степенного ряда:

$$i(t) = \sum_{k=0}^{k=n} \left(\frac{t}{H} \right)^2 I(k).$$

Точность результата будет зависеть от числа учитываемых дискрет, от параметров RLC -цепи, а также от начальной фазы φ , приложенного напряжения.

Необходимо отметить, что при переводе исходных уравнений в область изображений была использована таблица Г. Е. Пухова [1], а также ее уточнения, полученные в диссертационной работе Е. Д. Головина [6].

Таким образом, описанный метод может быть использован на завершающем этапе схемотехнического проектирования резонансных источников для дуговой сварки, когда по результатам схемного анализа выбираются и рассчитываются элементы LC -контура, обеспечивающие требования технического задания. Достоинством рассмотренного метода является то, что он дает возможность разработчику сварочного оборудования создавать алгебраические модели той же точности, что и исходные модели-оригиналы.

Список литературы

1. Пухов Г. Е. (1986) *Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов*. Киев, Наукова думка.
2. Лебедев В. К., Нарущквичус И. Р. (1971) Устойчивость горения дуги переменного тока в цепи с конденсатором. *Автоматическая сварка*, 4, 3–5.
3. Лебедев В. К., Коротынский А. Е. (1994) Дуга переменного тока в цепи с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью. *Автоматическая сварка*, 12, 47–48.
4. Атабеков Г. И., Купальян С. Д., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С. (1979) *Нелинейные электрические цепи*. Москва, Энергия.
5. Мун Ф. (1990) *Хаотические колебания*. Москва, Мир.

6. Головин Е. Д. (2004) *Математическое и численное моделирование нелинейных устройств и устройств с переменными параметрами*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск.

І. В. Вертецька, О. Є. Коротинський

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВИКОРИСТАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО
ТЕЙЛОРІВСЬКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ
ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
В РЕЗОНАНСНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ

З ціллю моделювання електричних процесів в джерелах для дугового зварювання резонансного типу запропоновано використовувати диференціально-тейлорівське перетворення, яке істотно спрощує обчислювальні процедури для аналізу режимів і визначення основних параметрів вторинного контуру. Суть цього методу полягає в перетворенні тимчасової безперервної функції оригіналу у функцію зображення від дискретного аргументу, коефіцієнти якої іменуються дискретами. Точність отриманих результатів визначається кількістю дискрет, використаних на етапі аналізу зображень. Бібліогр. 6, рис. 1.

Ключові слова: оригінал, зображення, диференціально-тейлорівське перетворення, ДТ-модель, резонансне джерело

Поступила в редакцію 26.04.2017

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Д. В. Степанов (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт») защитил в специализированном совете НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» 16 января 2017 г. кандидатскую диссертацию на тему «Дуговая наплавка износостойкого металла с использованием нанопорошков оксидов».

Диссертация посвящена поиску путей увеличения износостойкости и ресурса работы изделий, работающих в условиях трения металла по металлу и абразивного износа.

Разработаны схемы введения нанокomпонентов в сварочную ванну, приспособленные для условий наплавки и которые отличаются по форме и способу введения, в частности, в виде предварительно изготовленных спеченных стержней в виде смесей нанопорошков оксидов с железным порошком и непосредственно только нанопорошков. Скреплены предварительно грунтовкой смеси или только нанопорошки наносятся на пластину тонким слоем на ширину валика по длине наплавки.

Разработаны рациональные режимы механохимической обработки для получения гомогенной порошковой смеси с нано- и микрочастиц с помощью планетарной шаровой мельницы с дополнительным вакуумированием рабочих емкостей.

При наплавке высокохромистых композиций с повышенным содержанием углерода подтверждено положительное влияние на износостойкость объемных соотношений нанопорошков оксидов алюминия и титана, при которых износостойкость увеличивается в 2 раза, но применительно к этим композициям более эффективен диоксид кремния. Увеличение износостойкости более чем в 3 раза в этом случае может быть связано с формированием мартенситной структуры как более твердой по отношению к бейнитно-мартенситной.

При наплавке среднелегированных композиций установлено, что диоксид кремния более эф-

фективен по отношению к нанопорошкам Al_2O_3 и TiO_2 , обеспечивая повышение износостойкости более чем в 4 раза, что связано с изменением бейнитной структуры на чисто мартенситную, что и определяет повышение износостойкости.

Установлено, что при наплавке высоколегированной композиции введение в сварочную ванну нанопорошковых материалов приводит к увеличению количества неметаллических включений в структуре наплавленного металла и формированию цепочек включений по границам зерен.

Установлено, что при наплавке среднелегированной композиции распределение неметаллических включений по размеру делится на три группы: включения размерами до 0,3, от 0,3 до 0,8 и более 0,8 мкм. Показано, что в исходном состоянии их объемная доля составляет 0,31 % и соответствует, в основном, соразмерному диапазону 0,07...0,85 мкм, существенно увеличивается при введении в сварочную ванну нанопорошка диоксида кремния и составляет в металле валика 0,56 %, с несколько меньшим размерным диапазоном (0,07...0,61 мкм).

По результатам анализа морфологии и химического состава включений для условий наплавки среднелегированной композиции установлено, что в исходном состоянии ядро включения содержит, в основном, алюмосиликат марганца, а при введении диоксида кремния рядом с ними находятся и включения оксида алюминия (корунда), что при увеличении их объемной доли, как более твердых составляющих структуры, и объясняет более эффективное воздействие нанопорошков оксидов кремния на износостойкость наплавленного металла.

Разработаны технологические рекомендации, учитывающие специфику введения нанокomпонентов в сварочную ванну и особенности технологий наплавки.