

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ЦЕПИ С ЛАЗЕРНО-ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ

Досліджено амплітудно-частотні характеристики автоколивань струму лазерно-дугового розряду в колі з інерційним зворотним зв'язком. Встановлено, що зміною інерційності кола зворотного зв'язку можна одержати як автоколивання близькі до гармонічних, так і релаксаційні. Визначені діапазони зміни амплітуд і частот автоколивань. Дано рекомендації по застосуванню автоколивальних режимів при розробці нових технологій.

Исследованы амплитудно-частотные характеристики автоколебаний тока лазерно-дугового разряда в цепи с инерционной обратной связью. Установлено, что изменением инерционности цепи обратной связи можно получать как автоколебания близкие к гармоническим, так и релаксационные автоколебания. Определены диапазоны изменения амплитуд и частот автоколебаний. Даны рекомендации по применению автоколебательных режимов при разработке новых технологий.

ВВЕДЕНИЕ

Комбинированные лазерно-дуговые процессы и технологии, в частности, сварка и обработка материалов [1-3] обеспечивают значительное увеличение производительности изготовления изделий, а также повышение их качества. Синергетический эффект при воздействии лазерного пучка и электрической дуги на обрабатываемую поверхность позволяет получить новые типы изделий, соединений и конструкций, которые невозможно осуществить с помощью лазера и электрической дуги в отдельности. Именно поэтому в последние десятилетия эти процессы привлекают пристальное внимание ученых всего мира.

Авторами были разработаны принципы построения специализированных источников питания лазерно-дугового разряда [4], т.к. применение обычного сварочного оборудования, в частности, источники питания электрической дуги не всегда экономически оправдано.

Решение этой задачи базировалось на анализе электрических цепей с сосредоточенными параметрами, в состав которых входит лазерно-дуговой разряд, как элемент цепи. Для этого авторами было проведено исследование статических вольтамперных характеристик этого разряда [5].

Было обнаружено, что в исследуемой системе могут возникать автоколебания тока лазерно-дугового разряда. Это является нежелательным явлением для существующих сварочных технологий. Был поставлен вопрос, а нельзя ли использовать автоколебания при разработке новых технологий. Тем более что дуговая сварка модулированным током и импульсно-дуговая сварка имеют неоспоримые технологические преимущества перед обычным дуговым сварочным процессом.

Настоящая работа посвящена исследованию свойств автоколебаний тока лазерно-дугового разряда, в частности, его амплитудно-частотных характеристик, знание которых может стать в дальнейшем научной основой новых комбинированных лазерно-дуговых процессов и технологий.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ С ЛАЗЕРНО-ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ И ИНЕРЦИОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ТОКУ

В работе [4] показано, что в цепи, изображенной на рис. 1 возможно возникновение автоколебаний. На ее исследовании мы и остановимся. Единственной отличительной особенностью от ранее рассмотренной цепи будет наличие регулируемой инерционности цепи обратной связи (условно показано для конденсатора C). Именно зависимостью амплитудно-частотных характеристик от этой инерционности нас интересовала в первую очередь.

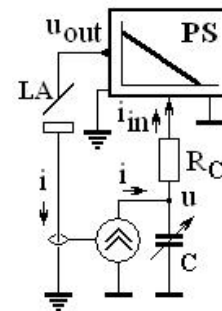


Рис. 1. Электрическая цепь с лазерно-дуговым разрядом LA и инерционной обратной связью, в которой наблюдаются автоколебания: PS – силовая часть источника питания

Рассмотрим источник питания PS с линейно падающей (для определенности) внешней характеристикой. Для упрощения не будем задаваться вопросом, как формируется эта характеристика. Источник питания представляет собой источник напряжения управляемый ток, у которого выходное напряжение u_{out} зависит от входного тока i_{in} следующим образом:

$$u_{out} = E - Ri_{in}, \quad (1)$$

где R – параметр, характеризующий наклон внешней характеристики, E – напряжение холостого хода источника

Инерционная обратная связь по току моделировалась с помощью RC -цепи. Тогда ток лазерно-дугового разряда i (он же ток обратной связи) разветвляется на ток конденсатора C и ток резистора R_C

$$i = \frac{u}{R_C} + C \frac{du}{dt}. \quad (2)$$

С учетом того, что ток резистора является управляющим входным током источника питания, имеем выражение

$$\frac{U(i_0)}{i_0} i = E - R \frac{u}{R_c}, \quad (3)$$

из которого можно найти значение тока i . Левая часть этого выражения представляет собой падение напряжения на лазерно-дуговом разряде LA .

Как было показано в работе [6] обобщенная математическая модель динамической дуги наиболее адекватно описывает динамику электрической дуги как элемента электрической цепи. Она учитывает не только нелинейность статической вольтамперной характеристики (ВАХ), но и термическую инерционность столба дуги. Именно термические процессы и в первую очередь процесс ионизации-деионизации влияет на проводимость плазмы столба дуги. В работах [7, 8] было показано, что обобщенную математическую модель динамической дуги можно применять для описания динамики лазерно-дугового разряда. При этом необходимо вместо статической вольтамперной характеристики дуги использовать статическую вольтамперную характеристику лазерно-дугового разряда $U(i)$. В наших исследованиях мы использовали степенную аппроксимацию статической вольтамперной характеристики

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

Здесь U_0 и I_0 координаты одной из точек степенной аппроксимации статической ВАХ лазерно-дугового разряда. При отрицательных значениях показателя степени n в формуле (4) такая аппроксимация вполне допустима на начальном участке ВАХ [5] (в расчетах, результаты которых представлены ниже, принимали значение $n = -1/3$).

Математическая модель динамической дуги оперирует с дополнительной переменной – током состояния i_0 [6], которая связана с током i следующим соотношением

$$\theta \frac{di_0^2}{dt} + i_0^2 = i^2, \quad (5)$$

где θ – постоянная времени лазерно-дугового разряда.

Каноническая безразмерная система дифференциальных уравнений для исследования динамики цепи имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dy}{d\tau} = \frac{1}{\Theta} \left[(1 + R - Ry) z^{\frac{1-n}{2}} - y \right]; \\ \frac{dz}{d\tau} = \left[(1 + R - Ry)^2 z^{-n} - 1 \right] z. \end{cases} \quad (6)$$

При приведении к безразмерному виду в качестве масштабов были выбраны: напряжение – U_0 , ток – I_0 , время – θ , сопротивление – U_0 / I_0 .

Безразмерная переменная y имеет вид

$$y = \frac{u}{U_0 R_c}. \quad (7)$$

Поскольку параметры цепи обратной связи R_c и C входят только в виде произведения

$$\frac{R_c C}{\theta} = \Theta, \quad (8)$$

использовали его как один параметр, который характеризует инерционность.

Не проводя анализ всех особых точек системы (6), сделаем это только для особой точки с координатами $(1 \ 1)^T$, которая соответствует режиму горения разряда на постоянном токе.

Матрица Якоби линеаризованной в окрестности особой точки системы (6) имеет вид

$$J = \begin{bmatrix} -\frac{1+R}{\Theta} & \frac{1-n}{2\Theta} \\ -2R & -n \end{bmatrix}, \quad (9)$$

а характеристическое уравнение представляет собой полином второй степени

$$\Theta \lambda^2 + (1 + R + \Theta n) \lambda + (R + n) = 0. \quad (10)$$

Собственные значения, определяемые характеристическим уравнением (10), могут быть весьма разнообразны. При малой инерционности цепи обратной связи Θ собственные значения действительные и отрицательные, а особая точка является устойчивым узлом. При большой инерционности цепи обратной связи Θ собственные значения действительные и положительные, а особая точка является неустойчивым узлом. Для промежуточных значений инерционности Θ собственные значения комплексные, действительная часть которых сначала отрицательная (особая точка – устойчивый фокус), а затем становится положительной (особая точка – неустойчивый фокус), пересекая нулевой уровень. Как было показано в работе [4], пересечение собственными значениями нулевого уровня при значении параметра инерционности

$$\Theta_H = -\frac{1+R}{n}. \quad (11)$$

соответствует бифуркации Хопфа. Сказанное выше иллюстрирует рис. 2.

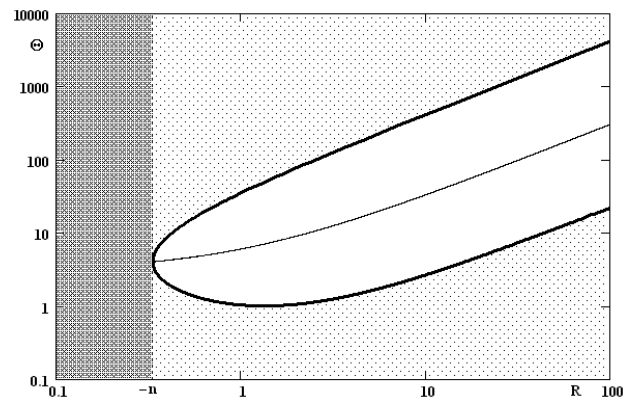


Рис. 2. Области различных типов собственных значений особой точки для цепи с лазерно-дуговым разрядом и обратной связью по току в плоскости (R, Θ) . Штрихованная область – особая точка – узел; незаштрихованная область – особая точка – фокус; затемненная область – особая точка – седло. Жирная кривая – кратность собственных значений; тонкая кривая – собственные значения чисто мнимые (бифуркация Хопфа)

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЦЕПИ С ЛАЗЕРНО-ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ И ИНЕРЦИОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Численный анализ подтверждает, что в цепи с лазерно-дуговым разрядом и инерционной обратной связью (рис. 1), возникают автоколебания (во всех примерах ниже $R = 3$). Как видно из рис. 3, с увеличением инерционности обратной связи Θ амплитуда предельного цикла растет, особенно, увеличивается амплитуда колебаний тока лазерно-дугового разряда.

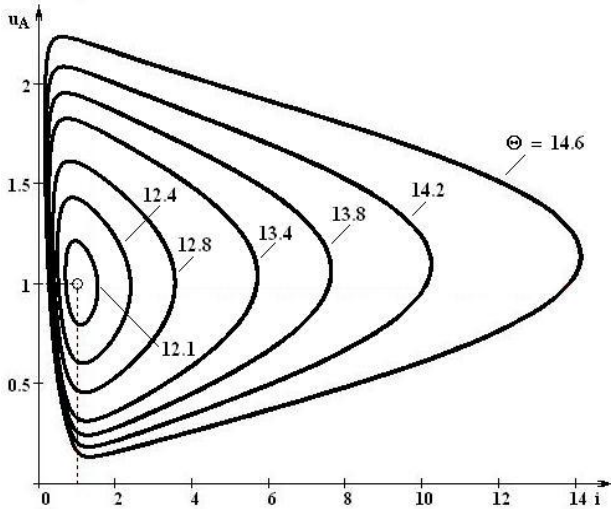


Рис. 3. Фазовые портреты в виде предельных циклов в зависимости от инерционности обратной связи Θ

Временные зависимости (рис. 4, 5) подтверждают это. Кроме того, они демонстрируют, при малых значениях разницы $\Theta - \Theta_H$ автоколебания мало отличаются от гармонических, а при больших – автоколебания становятся релаксационными.

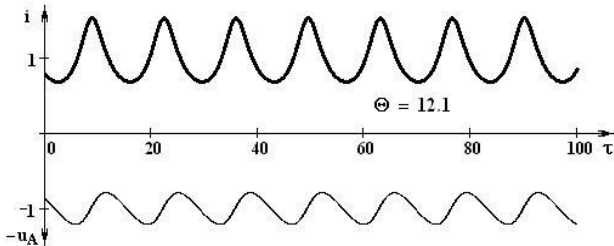


Рис. 4. Временные зависимости тока лазерно-дугового разряда i и падения напряжения на нем u_A при малых значениях разницы $\Theta - \Theta_H$.

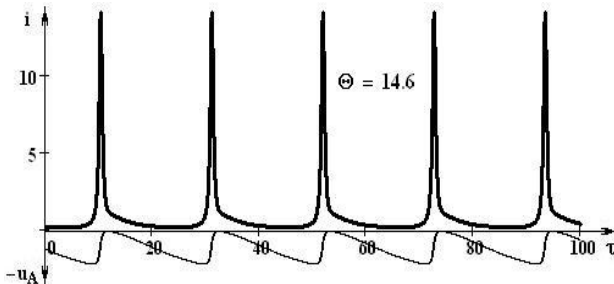


Рис. 5. Временные зависимости тока лазерно-дугового разряда i и падения напряжения на нем u_A при больших значениях разницы $\Theta - \Theta_H$

АМПЛИТУДНАЯ И ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При разработке новых технологий важно знать, в каких диапазонах изменяются амплитуда и частота автоколебаний тока лазерно-дугового разряда.

Из аналитических оценок было определено, что при бифуркации Хопфа, т.е. при значении параметра $\Theta = \Theta_H = 12$ амплитуда колебаний тока равна нулю $A_i = 0$, а частота

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-n \frac{R+n}{1+R}}. \quad (12)$$

Эти значения использовались при численных расчетах в качестве проверочных.

На рис.6 и 7 представлены зависимости амплитуды и частоты автоколебаний тока лазерно-дугового разряда. Из рис.6 видно, что амплитуда автоколебаний тока при увеличении инерционности Θ цепи обратной связи возрастает. Причем после определенного значения возрастание становится асимптотическим, а амплитуда стремится к бесконечности. Спад частоты автоколебаний тока при увеличении инерционности Θ цепи обратной связи происходит по линейному закону. Лишь при больших значениях Θ частота асимптотически стремится к нулю.

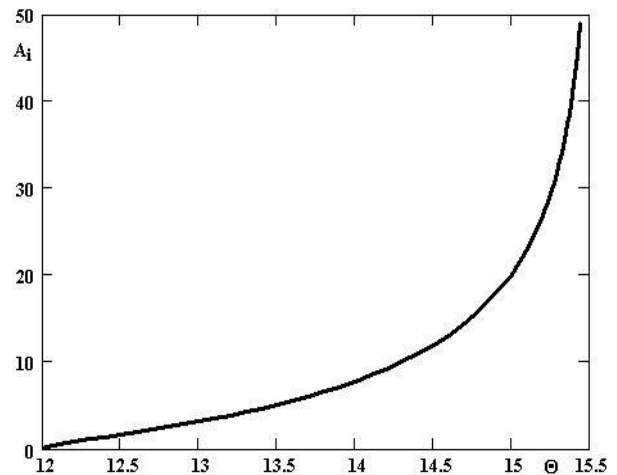


Рис. 6. Амплитудная характеристика автоколебаний тока лазерно-дугового разряда

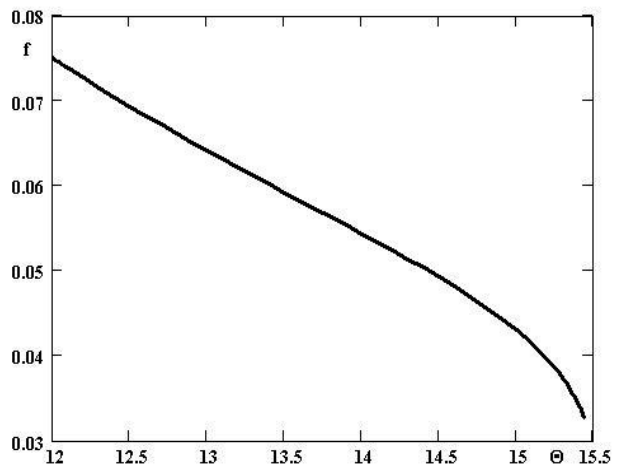


Рис. 7. Частотная характеристика автоколебаний тока лазерно-дугового разряда

Если принять во внимание, что постоянная времени лазерно-дугового разряда $\theta = 2$ мс, то диапазон частот автоколебаний составляет 15-38 Гц.

Амплитудно-частотная характеристика автоколебаний тока лазерно-дугового разряда, которая представлена на рис. 8, показывает, что малым частотам автоколебаний соответствует большие амплитуды. Такой режим перспективно применять при разработке технологий аналогичных импульсно-дуговой сварке, где требуется воздействие кратковременных импульсов большой амплитуды с низкой частотой.

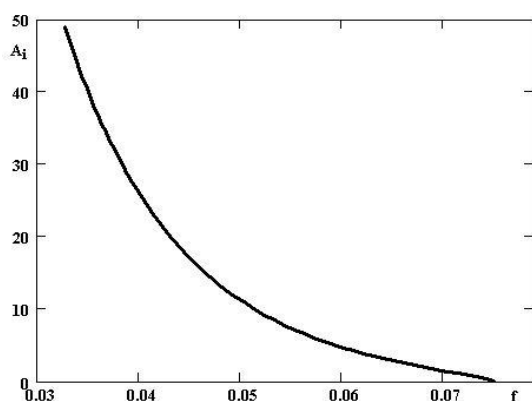


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика автоколебаний тока лазерно-дугового разряда

Режимы с более высокой частотой и меньшей амплитудой могут стать основой технологий подобных сварке модулированным током.

ВЫВОДЫ

1. Применение математической модели динамической дуги позволяет получить амплитудно-частотные характеристики автоколебаний тока лазерно-дугового разряда в цепи с инерционной обратной связью и проанализировать их.

2. Изменением инерционности цепи обратной связи можно получать как автоколебания близкие к гармоническим, та и релаксационные, без использования силовых ключей в источнике питания.

3. Полученные режимы автоколебаний можно использовать при разработке новых лазерно-дуговых технологий подобных импульсно-дуговой сварке и сварке модулированным током.

ПОДДЕРЖКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научные исследования, результаты которых изложены выше, проведены при финансовой поддержке "Державного фонду фундаментальних досліджень України" в рамках совместного украинско-российского проекта ДФФД-РФФИ-2011 (грант Ф40.7/047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазерно-дуговая сварка металлов / В.В. Башенко, С.Г. Горный, В.А. Лопота и др. – Л.: Изд-во ЛДНТП, 1988. – 22 с.
2. Laser-arc discharge: Theory and applications / V.S. Gvozdetzky, I.V. Krivtsun, M.I. Chizhenko, et al. // Welding and Surfacing Rev. – Harwood Academic Publ., 1995. – Vol. 3. –148 P.

3. Сом А.И., Кривцун И.В. Лазер + плазма: поиск новых возможностей в наплавке // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 36-41.

4. Bushma A.I., Sydorets V.N. Feedbacks Impact on the Work Stability of Laser-Arc Discharge Power Source // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч.1. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – С. 260-263.

5. Бушма А.И., Сидорец В.Н. Квазистатические вольтамперные характеристики комбинированного лазерно-дугового разряда // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2010. – Ч.1. – С. 201-204.

6. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги // Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 36-40.

7. Бушма А.И. Применение опыта моделирования дуг отключения в электрических сетях к комбинированному лазерно-дуговому разряду // Вестник ЧДТУ. – 2011. – №1 (47). – С. 82-86.

8. Bushma A.I. Common Approach to Modeling the Arc Blown by Gas and Combined Laser-Arc Discharge // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч.2. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – С. 234-237.

Bibliography (transliterated): 1. Lazerno-dugovaya svarka metallov / V.V. Bashenko, S.G. Gornyy, V.A. Lopota i dr. - L.: Izd-vo LDNTP, 1988. - 22 s. 2. Laser-arc discharge: Theory and applications / V.S. Gvozdetzky, I.V. Krivtsun, M.I. Chizhenko, et al. // Welding and Surfacing Rev. - Harwood Academic Publ., 1995. - Vol. 3. -148 P. 3. Som A.I., Krivcun I.V. Lazer + plazma: poisk novykh vozmozhnostej v naplavke // Avtomaticheskaya svarka. - 2000. - № 12. - S. 36-41. 4. Bushma A.I., Sydorets V.N. Feedbacks Impact on the Work Stability of Laser-Arc Discharge Power Source // Tehnichna elektrodinamika: Tem. випуск. Silova elektronika ta energoefektivnist'. Ch.1. - K.: IED NANU, 2011. - S. 260-263. 5. Bushma A.I., Sidorec V.N. Kvizistaticheskie vol'tampernye harakteristiki kombinirovannogo lazerno-dugovogo razryada // Tehnichna elektrodinamika. Tematichnij випуск "Silova elektronika ta energoefektivnist'". - 2010. - Ch.1. - S. 201-204. 6. Pentegov I.V., Sidorec V.N. `Energeticheskie parametry v matematicheskoy modeli dinamicheskoy svarochnoj dugi // Avtomaticheskaya svarka. - 1988. - № 11. - S. 36-40. 7. Bushma A.I. Primenenie opyta modelirovaniya dug otlyucheniya v `elektricheskikh setyah k kombinirovannomu lazerno-dugovomu razryadu // Vestnik ChDTU. - 2011. - №1 (47). - S. 82-86. 8. Bushma A.I. Common Approach to Modeling the Arc Blown by Gas and Combined Laser-Arc Discharge // Tehnichna elektrodinamika: Tem. випуск. Silova elektronika ta energoefektivnist'. Ch.2. - K.: IED NANU, 2011. - S. 234-237.

Поступила 20.09.2011

Бушма Александр Иванович, к.т.н.,

Сидорец Владимир Николаевич, д.т.н., с.н.с., в.н.с.

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
отдел физики газового разряда и техники плазмы
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. (044) 205-23-49, e-mail: bush@itb-adv.kiev.ua

Bushma A.I., Sydorets V.N.

Amplitude-frequency characteristics of self-oscillations in a circuit with laser-arc discharge.

Amplitude-frequency characteristics of laser-arc discharge current in a circuit with inertial feedback has been investigated. It is revealed that change in feedback circuit inertia may result in both near-harmonic self-oscillations and relaxation self-oscillations. The self-oscillation magnitude and frequency ranges are specified. Recommendations on applying self-oscillation modes at new technologies development are given.

Key words – laser-arc discharge, self-oscillations, electric circuits, inertial feedback.