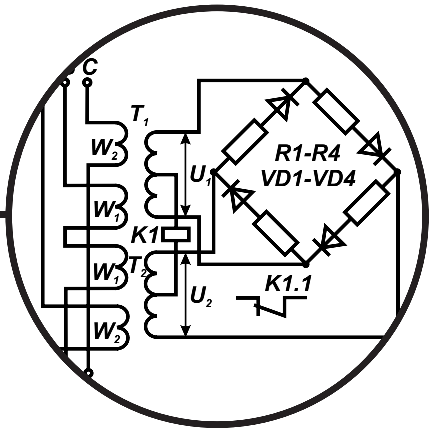
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА



DOI 10.15589/jnn20160310
УДК 621.791.75.01
В31

MODE INSTABILITY IN THE CIRCUIT WITH CAPACITY AND WELDING ELECTRIC AND PLASMA ARC POWERED BY DIRECT CURRENT

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА В ЦЕПИ С ЁМКОСТЬЮ И СВАРОЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ, ПИТАЕМОЙ ОТ ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Yevhen N. Vereshchaho
venmkua@gmail.com
ORCID: —

Vitalii I. Kostiuchenko
vikmkua@mail.ru
ORCID: —

Е. Н. Верещаго,
канд. техн. наук, доц.

В. И. Костюченко,
канд. техн. наук

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The article deals with automatic control at the arc of plasma welding and associated processes and technologies. The article engages mathematical techniques common in the description of automatic control systems. The article presents the results of the analytical study of dynamic processes occurring in the circuit of an electric arc with a capacity. The results of mathematical modeling that allow predicting the instability of the system with an integrated linear or non-linear load are rendered. Accounting for the reference to the object of automatic regulation (arc or plasma), the suggested materials can be of particular interest for a wide range of specialists in the field of welding production, as well as those engaged in the research of automatic control systems in converters.

Keywords: welding electric and plasma arc; stability; transitional processes.

Аннотация. В статье приведены результаты аналитического исследования динамических процессов, протекающих в цепи электрической дуги с ёмкостью. Представлены результаты математического моделирования, которые позволяют предсказывать неустойчивости системы с комплексной линейной или нелинейной нагрузкой.

Ключевые слова: сварочная электрическая и плазменная дуга; устойчивость; переходные процессы.

Анотація. У статті наведено результати аналітичного дослідження динамічних процесів, що протікають у колі електричної дуги з ємністю. Представлено результати математичного моделювання, які дозволяють передбачати нестійкості системи з комплексним лінійним або нелінійним навантаженням.

Ключові слова: зварювальна електрична і плазмова дуга; стійкість; перехідні процеси.

REFERENCES

[1] Vereshchago Ye. N., Kostyuchenko V. I. *Fiziko-matematicheskaya model tsepi pitaniya plazmotrona* [Physical and mathematical model of the power supply circuit of the plasma torch]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding production*, 2013, no. 2, pp. 19 – 25.

[2] Gladkov E. A. *Upravlenie protsessami i oborudovaniem pri svarke* [Control of processes and equipment in welding]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 430 p.

[3] Dyurgerov N. G., Sagirov Kh. N. *Ustoychivost sistemy samoregulirovaniya dugi pri mekhanizirovannoy i avtomaticheskoy svarke* [Stability of the automatic arc adjustment system in mechanized and automatic welding]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding production*, 2009, no. 2, pp. 13 – 24.

[4] Loos A. V., Lukutin A. V., Saraev Yu. N. *Istochniki pitaniya dlya impulsnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Power supplies for pulsed technological processes]. Tomsk, Izdatelsko-poligraficheskaya firma TPU Publ., 1998. 160 p.

[5] Sidorets V. N., Pentegov I. V. *Determinirovannyy khaos v nelineynykh tsepyakh s elektricheskoy dugoy* [Determined chaos in nonlinear circuits with electric arc]. Kiev, Mezhdunarodnaya assotsiatsiya «Svarka» Publ., 2013. 272 p.

[6] Vereshchago Ye. N., Kvasnitskiy V. F., Miroshnichenko L. N., Pentegov I. V. *Skhemotekhnika invertornykh istochnikov pitaniya dlya dugovoy nagruzki* [Circuit design of inverter power sources for arc load]. Nikolaev, UGMTU Publ., 2000. 283 p.

[7] Tsybulkin G. A. *K voprosu ob ustoychivosti protsessa dugovoy svarki plavyashchimsya elektrodom* [On the question of stability of the process of arc welding with the consumable electrode]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic welding*, 2002, no. 5, pp. 17 – 19.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Устойчивость электрической дуги при определённых условиях в электрической цепи исследовалась неоднократно [1 – 7]. Обратим внимание на то, что в цепи с дугой всегда будет возникать параллельная ей ёмкость, образуемая собственными емкостями установки. Здесь уместно также отметить, что ёмкость на выходе, например, в сварочных инверторах тока, используется в качестве фиксирующей / демпфирующей цепи либо в целях помехоподавления [6]. Эти ёмкости достигают 0,001 мкФ, а с учётом ёмкости элементов запуска дуги и сети составляют даже несколько микрофарад [1, 4, 6]. Остановимся теперь более подробно на устойчивом и неустойчивом состоянии электрической дуги с ёмкостью и её влиянии на электрическую цепь.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — анализ цепи с ёмкостью и электрической дугой.

ИЗЛОЖЕНИЯ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В настоящей статье электрическая дуга как элемент электрической цепи описывается обобщённой моделью [5, 6], которая учитывает термическую инерционность электрической дуги и не ограничивает вид её статической вольт-амперной характеристики (ВАХ). Вследствие этого в схеме для исследования устойчивости неуправляемое нелинейное сопротивление — электрическая дуга имитирована дифференциальным сопротивлением $R_{дф0}$ и последовательно с ним включённой малой паразитной индуктивностью L, зашунтированной активным сопротивлением R_1 (рис. 1).

Исследуемая электрическая цепь (рис. 1) в данном случае образована параллельным соединением идеального источника тока, элемента с входным сопротивлением дуги $Z_д(p)$, сопротивления R_i и ёмкости C.

Наличие резистора R_i принимает во внимание все виды потерь в системе — конечное (хотя и достаточно большое) внутреннее (выходное) сопротивление источника тока, а также влияние внешних цепей.

Равенство $U_д(p) = Z(p) \cdot I(p)$ указывает на то, что передаточной функцией (ПФ) в данном случае служит при $R_i = \infty$ операторное сопротивление контура:

$$Z(p) = Z_{вх}(p) = \frac{p\theta R_{ст0} + R_{дф0}}{p^2\theta R_{ст0}C + p(\theta + R_{дф0}C) + 1} = \frac{p / C + R_{дф0}\omega_0^2}{p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2}, \tag{1}$$

где $\alpha = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_{ст0}C} + \frac{1}{\theta}\frac{R_{дф0}}{R_{ст0}}\right)$ — коэффициент затухания контура; $\omega_0 = 1/\sqrt{\theta R_{ст0}C}$ — частота собственных колебаний в контуре без потерь.

Легко заметить, что уравнение (1) переходит в уравнение

$$Z_Д(p) = \frac{R_{ст0}\theta p + R_{дф0}}{\theta p + 1}$$

при $C = 0$.

Выполняя замену переменной $p = j\omega$, находим частотный коэффициент передачи рассматриваемой системы

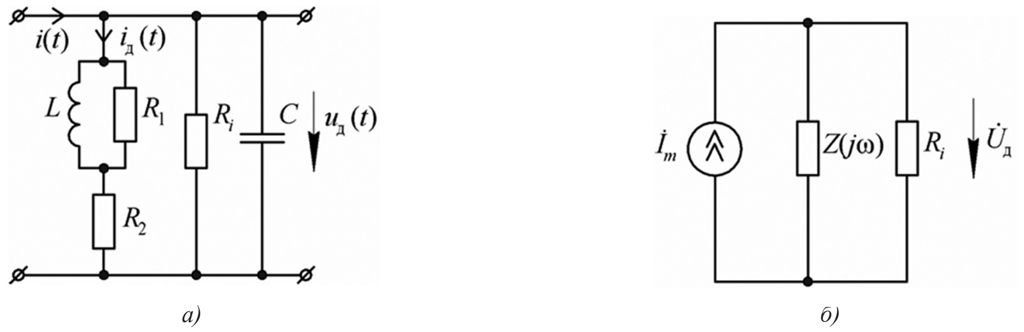


Рис. 1. Схема рассматриваемого контура:

а) принципиальная; ***б)*** схема замещения (эквивалентная) ($L = \theta(R_{ст0} - R_{дф0})$; $R_1 = R_{ст0} - R_{дф0}$; $R_{ст0}$, $R_{дф0}$ — статическое и дифференциальное сопротивление дуги в точке привязки I_0; θ — постоянная времени дуги)

$$Z(j\omega) = \frac{j\omega\theta R_{ст0} + R_{дф0}}{\left(1 - \omega^2\theta R_{ст0}C\right) + j\omega(\theta + R_{дф0}C)},$$

откуда следует уравнение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ)

$$A(\omega) = \operatorname{mod} Z(j\omega) = \left|Z(j\omega)\right| =$$

$$= \sqrt{\frac{(\theta R_{ст0})^2\omega^2 + R_{дф0}^2}{(\theta R_{ст0}C)^2\omega^4 + [\theta^2 - 2\theta C(R_{ст0} - R_{дф0}) + (R_{дф0}C)^2]\omega^2 + 1}}$$

и уравнение фазочастотной характеристики (ФЧХ)

$$\varphi(\omega) = \arg Z(j\omega) =$$

$$\operatorname{arctg}\theta\frac{R_{ст0}}{R_{дф0}}\omega - \operatorname{arctg}\frac{(\theta + R_{дф0}C)\omega}{1 - (\theta R_{ст0}C)^2\omega^2},\quad 0 \le \omega \le \infty.$$

Семейство АЧХ и ФЧХ контура с параметрами: $\theta = 1$ мкс, $R_{ст0} = 1{,}25$ Ом, $R_i = \infty$, $R_{дф0} = -0{,}49$ Ом приведено на рис. 2. Данное семейство образовано варьированием параметра C.

Определим частоту срыва системы как угловую частоту, при которой асимптотическая логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика (ЛАЧХ) $\left|Z(j\omega)\right|$ начинает резко отходить от единицы [6]. Тогда частота срыва ПФ (1) равна ω_0.

Пусть полоса частот двухполюсника (1) определяется как множество частот ω, $\omega \ge 0$, для которых

$$\left|Z(j\omega) - 1\right| \le \varepsilon,$$

где ε — заданное число, малое по сравнению с единицей.

Поскольку в данном случае полоса частот (полоса пропускания) представляет собой интервал $[0,\ \omega_C]$ (рассматривается низкочастотная система), то ω_C называется частотой среза, которая, конечно, значительно меньше, чем частота срыва и во многом зависит от числа ε и параметра демпфирования $\xi = 1/2\left(\sqrt{\theta R_{ст0}C}(\theta + R_{дф0}C)\right)$. Так, при $\varepsilon = 0{,}01$ и $\xi = 0{,}707$ определим $\omega_C = 0{,}0071\omega_0$ как 1%-ю частоту среза. Это означает, что в интервале $[0,\ \omega_C]$ содержится 99% от половины энергии стохастического процесса [5, 6].

Ёмкость C может быть выбрана такой, чтобы двухполюсник был демпфированным в желаемой полосе пропускания, что устраняет влияние резонансного пика. Выбором величины ёмкости C, обеспечивающей значение параметра демпфирования ~ 0,7, частота среза двухполюсника может быть сделана соответственно большой.

Таким образом, двухполюсник является низкочастотной системой, полоса пропускания которой представляет собой диапазон частот от нуля до частоты среза ω_C. Отметим, что полосой частот двухполюсника, грубо говоря, будет диапазон частот, в котором величина $Z(j\omega)$ близка к единице.

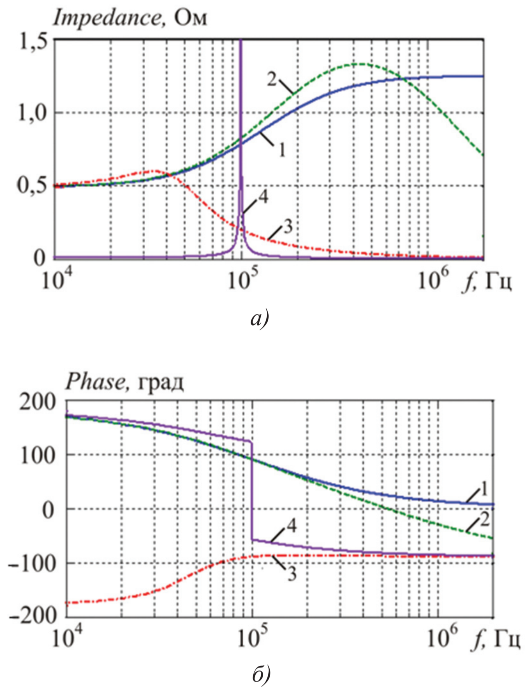


Рис. 2. Характеристики цепи:

1 — С = 0; *2* –С = 0,1 мкФ; *3* — С = 10,0 мкФ; *4* — С = 2,041 мкФ

Дифференциальное уравнение данной цепи, составленное относительно напряжения $u(t)$ на входном сопротивлении контура, имеет вид:

$$\theta R_{\text{ст}0} C \frac{d^2u}{dt^2} + (R_{\text{дф}0} C + \theta)\frac{du}{dt} + u = \theta R_{\text{ст}0}\frac{di}{dt} + R_{\text{дф}0} i. \quad (2)$$

Обратим внимание, что из условия $\operatorname{Re} Z(j\omega) > 0$ при $\omega \to \infty$ следует, что $R_{\text{ст}0} - R_{\text{дф}0} > |R_{\text{дф}0}|$. Очевидно, что $R_{\text{ст}0} \neq R_{\text{дф}0}$.

Варьируя величину ёмкости C, можно изменять коэффициент при производной du / dt. Знак и значение этого коэффициента, как известно, определяют характер свободных колебаний в такой динамической системе.

Если в уравнении (2) $R_{\text{дф}0} < 0$, то за счёт обратной связи возможна регенерация, т. е. частичная компенсация потерь в контуре.

Найдём условия самовозбуждения схемы (рис. 1,*а*), исследуя характеристическое уравнение этой системы с внутренней обратной связью.

Корни p_1 и p_2 характеристического уравнения (2) имеют вещественные части:

$$\operatorname{Re} p_1, p_2 = -\frac{R_{\text{дф}0} C + \theta}{2\theta R_{\text{ст}0} C}.$$

Система переходит в неустойчивый режим, когда величина $\operatorname{Re} p_{1,2}$ обращается в нуль. Отсюда находим

$$C_{\text{кр}} = -\theta / R_{\text{дф}0} = S_{\text{дф}0} / (\omega_0 Q),$$

или критическое значение отрицательного сопротивления

$$R_{\text{дф}0\text{кр}} = -\theta / C,$$

где $Q = R_1 / (\omega_0 L)$ — добротность контура без учёта регенерации; $S_{\text{дф}0} = -1 / R_{\text{дф}0}$ — дифференциальная крутизна ВАХ дуги.

Для цепи рис. 1,*а* с параметрами C = 1,0 мкФ, θ = 1 мкс, $R_i = \infty$; $R_{\text{дф}0\text{кр}}$ = –1,0 Ом. Полагая $R_{\text{дф}0}$ = –0,49 Ом, находим $C_{\text{кр}}$ = 2,041 мкФ.

Если величина C достигает критического значения $C_{\text{кр}} = \theta\, S_{\text{дф}0}$, то характеристическое уравнение невозмущённого движения приобретает вид:

$$p^2 + \omega_0^2 = 0, \quad (3)$$

свойственный идеальной колебательной системе без потерь. При этом собственные колебания есть гармонические функции вида:

$$u_{\text{соб}}(t) = {}^{\sin}_{\cos}\,\omega_0 t,$$

Незатухающие гармонические колебания в области неасимптотической устойчивости свидетельствуют о том, что система является консервативной и уравнение (3) представляет линеаризованную консервативную модель. Однако в отличие от действительно консервативной системы она имеет принципиальное отличие. В электрической цепи вся энергия от внешнего источника полностью рассеивается в контуре (энергетический баланс). Система, рассеивающая энергию, — диссипативная. Таким образом, получена консервативная модель диссипативной системы [5].

Однако следует иметь в виду, что небольшие случайные изменения параметров контура ($C > C_{\text{кр}}$) могут привести к переходу в неустойчивый режим, когда зависимости

$$u_{\text{соб}}(t) = Ae^{\alpha t}\cos\omega_c t + Be^{\alpha t}\sin\omega_c t, \quad \omega_c = \sqrt{\omega_0{}^2 - \alpha^2}$$

представляют собой экспоненциально нарастающие по амплитуде колебания. Поскольку потери в контуре с электрической дугой достаточно малы, то $\omega_0 >> \alpha$, поэтому $\omega_c \approx \omega_0$.

Обращаясь к эквивалентной схеме замещения (рис. 1,*б*), видим, что ток с комплексной амплитудой $\dot{I}_m$, поступающий от источника тока, протекает по сопротивлению

$$Z_{\text{экв}}(j\omega) = Z(j\omega) R_i / [Z(j\omega) + R_i] =$$

$$= \frac{p\theta R_{\text{ст}0} + R_{\text{дф}0}}{p^2\theta R_{\text{ст}0} C + p[R_{\text{дф}0} C + \theta(1 + R_{\text{ст}0} / R_i)] + R_{\text{дф}0} / R_i + 1}.$$

Несложные преобразования показывают, что

$$Z_{\text{экв}}(j\xi) = \frac{R_{\text{рез.эк}}}{1 + j\xi_{\text{эк}}}. \quad (4)$$

Здесь $R_{\text{рез.эк}} = \dfrac{R_{\text{рез}}}{1 + R_{\text{рез}} / R_i}$ — эквивалентное сопротивление контура при резонансе с учётом разрядного сопротивления R_i; эквивалентная обобщённая расстройка $\xi_{\text{эк}} = \dfrac{\xi_0}{1 + R_{\text{рез}} / R_i}$ (ξ_0 — безразмерная обобщённая расстройка при $R_i = \infty$).

Можно считать, что влияние R_i состоит в том, что добротность колебательной системы уменьшается и становится равной эквивалентной добротности

$$Q_{\text{эк}} = \frac{Q}{1 + R_{\text{рез}} / R_i}.$$

Согласно последней формуле для ослабления действия — $R_{\text{рез}}$ на колебательную систему следует уменьшать резонансное сопротивление $R_{\text{рез}}$, применяя параллельное включение R_i.

Пусть имеем параллельный колебательный контур с параметрами θ = 1 мкс, $R_{\text{ст}0}$ = 1,25 Ом, $R_{\text{дф}0}$ = –0,49 Ом, $C = C_{\text{кр}}$ = 2,041 мкФ, настроенный на частоту $f_{\text{рез}}$.

Частота собственных колебаний в контуре равна:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\theta R_{ст0} C}} \sqrt{1 - R_{дф0} / R_{ст0} - \frac{C}{\theta} R_{дф0}^2 / R_{ст0}} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25 \cdot 2,04 \cdot 10^{-6}}} \times$$

$$\times \sqrt{1 + 0,49 / 1,25 - \frac{2,04}{1 \cdot 10^{-6}} (0,49)^2 / 1,25} =$$

$$= 0,626 \cdot 10^6 c^{-1};$$

$$f_0 = 99,7 \cdot 10^3 \text{ Гц} \approx 100 \text{ кГц}.$$

Резонансное сопротивление колебательной системы представлено как:

$$R_{рез} = \frac{R_{дф0}[(\theta\omega_0)^2 R_{ст0}^2 / R_{дф0}^2 + 1]}{(\theta\omega_0)^2 R_{ст0} / R_{дф0} + 1} = -10,66 \text{ кОм}.$$

Эквивалентное сопротивление контура при резонансе с учётом шунтирующего действия R_i (R_i = 10 кОм) будет соответствовать:

$$R_{рез.эк} = -10,66 / (1 - 10,66 / 10) = 161,52 \text{ кОм}.$$

При настройке контура в резонанс $\xi_{эк} = 0$, поэтому из (4) следует, что резонансный коэффициент передачи контура —

$$K_{рез} = R_{рез.эк}.$$

Очевидно, что в данной цепи роль шунтирующего резистора R выполняет активное резонансное сопротивление контура $R_{рез}$ без учёта внутреннего сопротивления источника и демпфирующего резистора (вносимого сопротивления R_i).

Если, например, $R_{рез} < 0$ — активная составляющая входного сопротивления контура при резонансе, а $1 / R_i > 0$ — параллельно включенная проводимость, вносимая источником тока и демпфирующим резистором, то условие обеспечения устойчивости и отсутствия самораскачивания (стабилизации и демпфирования) примет вид

$$-R_i / R_{рез} < 1.$$

Если это условие выполняется, то демпфирование, отраженное в основном уравнении малых колебаний членом с положительным коэффициентом, приводит к затуханию колебаний. Рассматриваемая система будет самопроизвольно возбуждаться, если имеющееся в ней отрицательное сопротивление меньше вносимого сопротивления — $R_{рез} < R_{i\,вн}$. Отметим, что вызываемые неустойчивостью перенапряжения оказывают воздействие на установку в целом.

Пример результатов расчёта приведён на рис. 3. При этом основные условия с $\theta = 1$ мкс, $R_{дф0} = -0,49$ Ом; C = 2,041 мкФ выбирались так, чтобы могли возникать неустойчивости. Необходимо отметить, что возникающая неустойчивость приводит к колебаниям как напряжения, так и тока дуги.

В $u - i$ диаграмме (рис. 3,*б*) спиральная форма характеристики показывает, что напряжение и ток дуги сдвинуты по фазе относительно друг друга.

Полезно сравнить переходные характеристики контура, полученные при различных значениях R_i / $R_{рез}$. Соответствующие графики приведены на рис. 4.

Если, например, R_i = 10 кОм, то будем иметь собственные колебания с отрицательным затуханием (рис. 4,*а*).

Наконец, в общем случае переходная характеристика системы (рис. 4 *б*) представляет собой квазигармоническое затухающее колебание с биениями, огибающая которого быстро изменяется во времени.

Интересно отметить, что влияние R_i проявляется в снижении в зависимости от отношения R_i / $|R_{рез}|$ во времени тока и напряжения дуги. При значениях отношения R_i / $|R_{рез}|$ приблизительно от 0,95 до 0,5 оно вызывает сильное затухание колебаний напряжения (тока) по сравнению со случаем $R_i = \infty$. Если же, напротив, сделать это отношение ещё меньше, то коле-

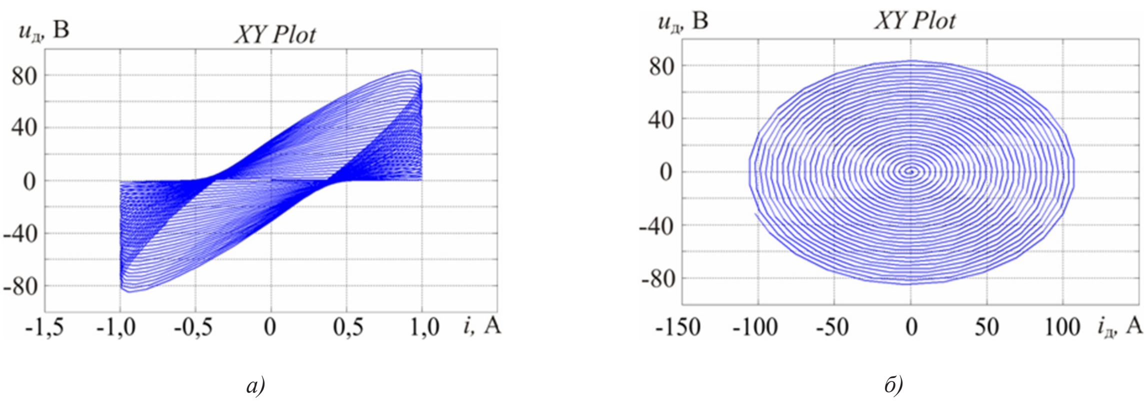


Рис. 3. $u - i$ — диаграммы:
а) $u_д = f(i)$; *б*) $u_д = f(i_д)$

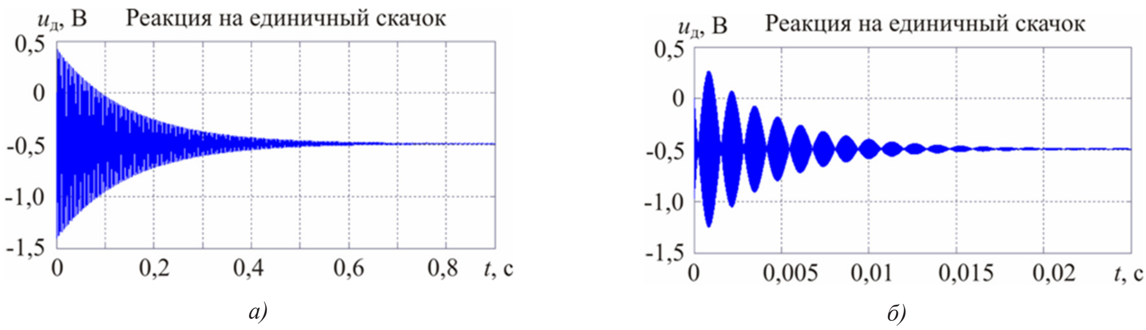


Рис. 4. Отклик цепи на функцию включения при различных значениях R_i:
а) при R_i = 10 кОм; *б)* при R_i = 1 кОм

бания хотя и продолжают затухать, но относительное изменение уже не является таким большим. Кроме того, с уменьшением R_i / $|R_{рез}|$ появляются биения.

Таким образом, для практических нужд сопротивление R_i для резистивного демпфирования должно составлять приблизительно $R_i \approx |R_{рез}|$.

ВЫВОДЫ. 1. В электрической цепи с активным элементом (электрической дугой), моделью которого служит резистор с отрицательным сопротивлением, возможно возникновение нарастающих колебаний. 2. Установившаяся амплитуда колебаний определяется видом нелинейной характеристики электрической дуги, входящей в контур. Различают устойчивые и неустойчивые стационарные режимы электрической дуги в колебательных цепях. 3. Найденные частотные характеристики входного сопротивления цепи позволяют предсказывать неустойчивости системы с комплексной линейной или нелинейной нагрузкой. 4. В тех случаях, когда рабочая точка выбрана на монотонно убывающем участке ВАХ электрической дуги, реализуется мягкий режим самовозбуждения. 5. В контуре, имеющем только резистивное демпфирование при R_i / $R_{рез} \approx 1$, колебания затухают достаточно медленно. Если же, напротив, сделать отношение R_i / $R_{рез}$ меньше, (приблизительно от 0,5 до 0,2), то, хотя, и снижение колебаний будет более интенсивным, но появляются биения в переходной характеристике $h[t]$ для отклонения $\varepsilon_{св}(t)$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Верещаго, Е. Н.** Физико-математическая модель цепи питания плазмотрона [Текст] / Е. Н. Верещаго, В. И. Костюченко // Сварочное производство. — 2013. — № 2. — С. 19–25.

[2] **Гладков, Э. А.** Управление процессами и оборудованием при сварке [Текст] / Э. А. Гладков. — М. : Академия, 2006. — 430 с.

[3] **Дюргеров, Н. Г.** Устойчивость системы саморегулирования дуги при механизированной и автоматической сварке [Текст] / Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров // Сварочное производство. — 2009. — № 2. — С. 13–14.

[4] **Лоос, А. В.** Источники питания для импульсных технологических процессов [Текст] / А. В. Лоос, А. В. Лукутин, Ю. Н. Сараев. — Томск. Издательско-полиграфическая фирма ТПУ, 1998. — 160 с.

[5] **Сидорец, В.Н.** Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой [Текст] / В. Н. Сидорец, И. В. Пентегов. — К. : Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 272 с.

[6] Схемотехника инверторных источников питания для дуговой нагрузки: [учеб. пособие] / Е. Н. Верещаго, В. Ф. Квасницкий, Л. Н. Мирошниченко, И. В. Пентегов. — Николаев : УГМТУ, 2000. — 283 с.

[7] **Цыбулькин, Г. А.** К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом [Текст] / Г. А. Цыбулькин // Автоматическая сварка. — 2002. — № 5. — С. 17–19.

Надійшла до редколегії 19.07.2016
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Б. М. Гордєєв*