



Evgeniy
N. Vereschago

Верещаго
Евгений
Николаевич

УДК 519.6

INFLUENCE OF CAPACITY ON STABILITY OF ARC BURNING IN TECHNOLOGICAL PROCESSES OF METAL WORKING

ВЛИЯНИЕ ЁМКОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ ДУГИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

DOI 10.15589/SMI. 2018.02.15

Evgeniy N. Vereschago Е. Н. Верещаго, канд. техн. наук, доц.

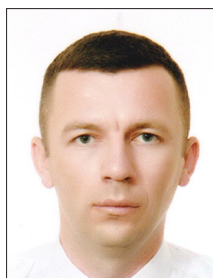
venmkua@gmail.com

ORC ID: 0000-0002-4370-7706

Vitaliy I. Kostyuchenko В. И. Костюченко, канд. техн. наук

vikmkua@gmail.com

ORC ID: 0000-0003-2128-2388



Vitaliy
I. Kostyuchenko

Костюченко
Виталий
Иванович

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The characteristics of an electrical arc under certain conditions in an electrical circuit have been investigated repeatedly. Deviations of the parameters of the arc elements cause a change in the stability stocks and other indicators of the quality of the automatic control system. Mathematical modeling of processes occurring in an electric arc circuit allows solving various problems of automatic control, predicting system instabilities with complex linear or non-linear loads. The article is devoted to the analysis of the influence of the uncertainties of the parameters of the electric arc model on the quality of the current control system for electro-technological processes and consideration of the quantitative assessment of the sensitivity of certain properties of the automatic system to changes in the parameters of elements of only a part of the controlled object — the welding arc. When solving practical problems of regulation by electric arc and plasma technological processes, it is important to solve the problem of determining the optimal settings or parametric optimization of automatic control systems, among the methods of which are non-exploratory methods based on the use of the sensitivity apparatus. The sensitivity to changes in the parameters of the nominal transfer function of the arc was analyzed, expressions for the sensitivity functions were obtained, and graphs of the corresponding functions were plotted. For more precision, it is assumed that changes in parameters are caused by changes in capacity, which always take place in circuits with an arc. The problem of finding an acceptable compromise between the requirements of a small value of the stabilization error without a significant increase in the value of the input variable is formulated and solved. Various rules have been developed to reduce the sensitivity of the transfer function of an object with respect to possible, unexpected changes in the parameters of a controlled object, which can be used in the design of high-quality transistor current sources for arc loads. To illustrate the sensitivity of the transfer function of the arc, the model shows the response to a stepwise change in input for different cases. Unfortunately, the article does not consider the characteristics of the disturbance and noise suppression, but only some options for reducing the sensitivity function are studied.

Keywords: sensitivity; model; electric arc; variation; research.

Анотація. Характеристики електричної дуги за певних умов у електричному колі досліджувалися неодноразово. Відхилення параметрів елементів дуги викликають зміни запасів стійкості та інших показників якості системи автоматичного керування. Математичне моделювання процесів, що проходять у колі електричної дуги, дає змогу вирішити різні завдання автоматичного керування, передбачити нестійкості системи з комплексним лінійним або нелінійним навантаженням. Проаналізовано вплив невизначеностей параметрів моделі електричної дуги на якість системи керування струмом для електротехнологічних процесів. Розглянута кількісна оцінка чутливості певних властивостей автоматичної системи до змін параметрів елементів лише частини керованого об'єкта — зварювальної дуги. Для вирішення практичних завдань регулювання електродуговими і плазовими технологічними процесами велике значення має вирішення завдання визначення оптимальних параметрів налаштування або параметричної

оптимізації автоматичних систем регулювання, серед методів яких виділяються безпошукові методи, засновані на використанні апарата чутливості. Проаналізовано чутливість характеристик моделі електричної дуги до зміни параметрів номінальної передавальної функції дуги, отримані вирази для функцій чутливості, побудовані графіки відповідних функцій. Для більшої конкретності припущено, що зміни параметрів викликаються змінами ємності, яка завжди має місце в ланцюгах з дугою. Сформульовано та розв'язано задачу знаходження прийняттого компромісу між вимогами малого значення помилки стабілізації без значного збільшення значення вхідної змінної. Розроблено різні правила для зменшення чутливості передавальної функції об'єкта стосовно можливих, непередбачених змін параметрів керованого об'єкта, які можуть бути використані у проектуванні високоякісних транзисторних джерел струму для дугового навантаження. Для ілюстрації чутливості передавальної функції дуги показані реакції моделі на ступеневу зміну вхідного впливу для різних випадків. На жаль, у статті не розглянуті характеристики зменшення збурення і шумів, а розглянуті лише деякі варіанти для зменшення функції чутливості.

Ключові слова: чутливість; модель; електрична дуга; варіація; дослідження.

Аннотация. Характеристики электрической дуги при определенных условиях в электрической цепи исследовались неоднократно. Отклонения параметров элементов дуги вызывают изменение запасов устойчивости и других показателей качества системы автоматического управления. Математическое моделирование процессов, проходящих в кругу электрической дуги, позволяет решить различные задачи автоматического управления, предусмотреть неустойчивости системы с комплексной линейной или нелинейной нагрузкой. Проанализировано влияние неопределенностей параметров модели электрической дуги на качество системы управления током для электротехнологических процессов. Рассмотрена количественная оценка чувствительности определенных свойств автоматической системы к изменениям параметров элементов только части управляемого объекта — сварочной дуги. Для решения практических задач регулирования электродуговыми и плазменными процессами большое значение имеет решение задачи определения оптимальных параметров настройки или параметрической оптимизации автоматических систем регулирования, среди методов которых выделяются беспоисковые методы, основанные на использовании аппарата чувствительности. Проанализирована чувствительность характеристик модели электрической дуги к изменению параметров номинальной передаточной функции дуги, получены выражения для функций чувствительности, построены графики соответствующих функций. Для большей конкретности предположено, что изменения параметров вызываются изменениями емкости, которая всегда имеет место в цепях с дугой. Сформулирована и решена задача нахождения приемлемого компромисса между требованиями малого значения ошибки стабилизации без значительного увеличения значения входящей переменной. Разработаны различные правила для уменьшения чувствительности передаточной функции объекта относительно возможных непредвиденных изменений параметров управляемого объекта, которые могут быть использованы в проектировании высококачественных транзисторных источников тока для дуговой нагрузки. Для иллюстрации чувствительности передаточной функции дуги показаны реакции модели на ступенчатую смену входного воздействия для различных случаев. К сожалению, в статье не рассмотрены характеристики уменьшения возмущения и шумов, а рассмотрены только некоторые варианты для уменьшения функции чувствительности.

Ключевые слова: чувствительность; модель; электрическая дуга; вариация; исследование.

References

- [1] Jesibjan, Je. M. (2000). *Vozdushno-plazmennaja rezka: sostojanie i perspektivy* [Air plasma cutting: state and prospects]. *Avtomaticheskaja svarka*, 12, 6-17.
- [2] Shirshov, I. G., & Kotikov, V. N. (1987). *Plazmennaja rezka* [Plasma cutting]. Leningrad: Mashinostroenie.
- [3] Byhovskij, D. G. (1972). *Plazmennaja rezka* [Plasma cutting]. Leningrad: Mashinostroenie.
- [4] Bakalov, V. P., Dmitrikov, V. F., & Kruk, B. I. (2007). *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of the theory of chains]. Moscow: Goryachaya liniya.
- [5] Vereshchago, Ye. N., & Kostyuchenko, V. I. (2013). *Fiziko-matematicheskaya model tsepi pitaniya plazmotrona* [Physico-mathematical model of the plasma torch power circuit]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2, 19-25.
- [6] Gorovits, A. M. (1970). *Sintez sistem s obratnoy svyazyu* [Synthesis of systems with feedback]. Moscow: Sovetskoe radio Publ.
- [7] Lenivkin, V. A., Yevchenko, V. M., & Strizhakov, Ye. L. (2008). *Istochniki pitaniya dlya svarki* [Welding power sources]. Rostov-na-Donu: ITs DGTU Publ.
- [8] Loos, A. V., Lukutin, A. V., & Saraev, Yu. N. (1998). *Istochniki pitaniya dlya impulsnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Power Supplies for Pulse Processes]. Tomsk: Izdatelsko-poligraficheskaya firma TPU Publ.
- [9] Milyutin, V. S., Shalimov, M. P., & Shanchurov, S. M. (2007). *Istochniki pitaniya dlya svarki* [Welding power sources]. Moscow: Ayris-press Publ.

- [10] Sidorets, V. N., & Pentegov, I. V. (2013). *Determinirovannyi khaos v nelineynykh tsepyakh s elektricheskoy dugoy* [Deterministic chaos in non-linear arcs]. Kiev: Mezhdunarodnaya assotsiatsiya "Svarka".
- [11] Vereshchago, Ye. N., Kvasnitskiy, V. F., Miroshnichenko, L. N., & Pentegov, I. V. (2000). *Skhemotekhnika invertornykh istochnikov pitaniya dlya dugovoy nagruzki* [Circuitry of inverter power sources for arc load]. Nikolaev: UGMTU.
- [12] Shirokov, L. A. (1972). *Algoritmy sensitivnoy adaptatsii. Optimalnoe i adaptivnoe upravlenie* [Sensitive Adaptation Algorithm. Optimal and adaptive management]. Saratov: SGU Publ., 61-81.

Постановка задачи. Широкое практическое применение сжатой электрической дуги в технологических процессах металлообработки (резка, сварка, наплавка и напыление) в судостроении, судоремонте и новых технологиях обусловлено высокой концентрацией теплового потока [1]. Эта особенность горения плазменной дуги позволяет производить обработку низколегированных и легированных сталей, цветных металлов и сплавов с максимальной скоростью, качеством и эффективностью при относительно небольших затратах. Обеспечение высокой эффективности плазменной обработки металлов требует всесторонних исследований сжатой дуги, позволяющих максимально учесть всё многообразие физических процессов, протекающих в электродуговом разряде, и установить взаимосвязь между характеристиками рассматриваемого разряда и параметрами технологического объекта.

Одна из перспектив развития плазменной технологии, в первую очередь, — это создание малогабаритных и экономичных источников тока, построенных на инверторных преобразователях [1]. Существенное влияние на процессы, происходящие при формировании и регулировании плазменной дуги, оказывают электрические параметры системы источник тока–дуга [2]. Важной проблемой системы является вопрос её устойчивости. Различают четыре аспекта проблемы: собственно, статическая (апериодическая), колебательная, пространственная и технологическая устойчивость [3]. В общем случае за устойчивость системы ответственны её статические и динамические характеристики, определяемые структурой системы, её статическими и динамическими параметрами.

Различным аспектам решения задач исследования сжатой электрической дуги и разработки генерирующих её плазмотронов посвящены работы Б. Е. Патона, Н. Н. Рыкалина, К. В. Васильева, В. Я. Фролова, С. В. Дресвина, М. Ф. Жукова и др. Однако отсутствие детального анализа характеристик сжатой электрической дуги затрудняет развитие отрасли при разработке технологических процессов, выборе плазмотронов и установлении режимов работы оборудования. Учитывая вышесказанное, необходимо поэтапное изучение характеристик сжатой электрической дуги.

Анализ последних исследований и публикаций. При рассмотрении задачи управления электродуговыми и плазменными технологическими про-

цессами (ТП) и оборудованием в сварочной технике и в смежных областях необходимо проанализировать физико-технологические свойства элементов контура источника питания (ИП)–дуга [4–7]. Источник питания должен соответствовать прежде всего технологическим требованиям [4; 5; 7]. Эти требования определяются техническими возможностями достижения технологических свойств, которые определяются, во-первых, статическими и динамическими свойствами ИП, и во-вторых, свойствами нелинейных участков, например, цепи — разрядного промежутка и ванны [4–6].

В производственных условиях технологический сварочный процесс подвержен воздействиям — возмущениям, нарушающим его нормальное протекание и приводящим к отклонениям показателей качества конечного продукта от требуемых значений.

Системный подход к оценке точности системы автоматического управления (САУ) ТП сварки характеризуется всесторонним учётом доминирующих факторов, сопровождающих проектирование, производство и эксплуатацию САУ совместно с объектом управления в реальной внешней среде.

При системном подходе к функционированию САУ изучаются все реальные причины, приводящие к отклонению параметров от номиналов. Кстати, уместно отметить, что те САУ, у которых контрольные показатели не выходят из допустимых зон в реальной эксплуатации, относятся к сильным системам, т.е. робастным [6; 8]. Вариация элемента автоматической системы приводит к изменению его передаточной функции (ПФ), а это, в свою очередь, вызывает изменение ПФ всей замкнутой системы, а значит, в конечном итоге, и изменение величин, характеризующих её состояние. Оценка робастности должна проводиться по всем элементам САУ. Предположим, что в автоматической системе основным варьируемым элементом является управляемый объект.

Естественно, что чем меньше чувствительность $S_{\alpha_j}^W(p)$, тем меньше влияние ПФ рассматриваемого элемента на свойства автоматической системы, тем система более высококачественна.

Отклонения параметров также вызывают изменение запасов устойчивости и других показателей качества системы автоматического управления (САУ). В отдельных случаях, например, появление паразитной ёмкости может изменить порядок дифференциальных уравнений, описывающих динамику САУ.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ — рассмотрение количественной оценки чувствительности определённых свойств автоматической системы к изменениям параметров элементов лишь части управляемого объекта — сварочной дуги. Такие важные свойства электрических цепей, как управляемость и надёжность, в значительной степени определяются чувствительностью характеристик электрических цепей к изменению параметров элементов. Электрическая дуга как элемент электрической цепи является нелинейным активным (нереактивным) накопителем энергии [8].

Основной материал. Рассмотрим чувствительность передаточной функции и частотных характеристик электрической дуги. Пусть $W(p, \alpha_j)$ является передаточной функцией дуги, зависящей от параметра α_j . Предполагаем, что скалярный параметр α_j может принимать значения из некоторого интервала $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$. Тогда функция чувствительности ПФ по параметру α_j

$$V_{\alpha_j}^W(p) = \left[\frac{\partial W(p, \alpha_j)}{\partial \alpha_j} \right]^0,$$

которая определяет первое приближение дополнительной ПФ, равной разности варьируемой и исходной передаточных функций при вариации по параметру α_j :

$$\Delta W_j(p, \alpha_j) = \tilde{W}(p, \alpha_j) - W(p, \alpha_j) = V_{\alpha_j}^W(p) \Delta \alpha_j.$$

Нулевым индексом сверху обозначено то обстоятельство, что частные производные должны приниматься равными значениям, соответствующим номинальным (расчётным) параметрам.

Часто удобнее рассматривать логарифмическую функцию чувствительности, или просто чувствительность $S_{\alpha_j}^W(p)$ ПФ, определяемую как

$$\begin{aligned} S_{\alpha_j}^W(p) &= \frac{\partial \ln W(p, \alpha_j)}{\partial \ln \alpha_j} = \frac{\partial W(p, \alpha_j)}{W(p, \alpha_j)} \bigg/ \frac{\partial \alpha_j}{\alpha_j} = \\ &= \frac{\alpha_j}{W(p, \alpha_j)} V_{\alpha_j}^W(p). \end{aligned}$$

Типовым описанием передаточных свойств длинной свободной или сжатой дуги является операционная ПФ в виде рациональной дроби [7; 8]:

$$W_d(p) = Z_d(p) = (R_{ct0}\theta p + R_{df0})/(\theta p + 1),$$

где R_{ct0} , R_{df0} — статическое и дифференциальное сопротивление дуги в выбранной точке; θ — постоянная времени дуги. Эта ПФ при $R_{df0} < 0$ имеет нуль в правой полуплоскости. Оператор, в свою очередь, характеризуется структурой и параметрами. Чувствительности ПФ дуги к изменениям ряда технических параметров будут иметь вид

$$S_{R_{ct0}}^W(p) = R_{ct0}\theta p / (R_{ct0}\theta p + R_{df0});$$

$$S_{R_{df0}}^W(p) = R_{df0} / (R_{ct0}\theta p + R_{df0});$$

$$S_{\theta}^W(p) = (R_{ct0} - R_{df0})\theta p / [(\theta p + 1)(R_{ct0}\theta p + R_{df0})].$$

При этом результирующую чувствительность можно определить через относительные чувствительности элементов при помощи выражения:

$$\frac{dZ_d(p)}{Z_d(p)} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial Z_d(p)}{\partial \alpha_i} \frac{\alpha_i}{Z_d(p)} \right) \frac{d\alpha_i}{\alpha_i} = \sum_{i=1}^3 S_{\alpha_i}^Z \frac{d\alpha_i}{\alpha_i},$$

то есть выразить её через нормированные чувствительности системы.

Графики функций $U_j(\omega) = \operatorname{Re} S_{\alpha_j}^W(j\omega)$ при численных значениях параметров $R_{df0} = -0,49$ Ом, $R_{ct0} = 1,25$ Ом и $\theta = 1 \cdot 10^{-6}$ с приведены на рис. 1.

Проанализируем чувствительность ПФ дуги к изменениям параметров. На нулевой частоте чувствительность $\operatorname{Re} S_{\theta}^W = \operatorname{Re} S_{R_{ct0}}^W = 0$, $\operatorname{Re} S_{R_{df0}}^W = 1$. При увеличении частоты $\operatorname{Re} S_{R_{ct0}}^W$ увеличивается, стремясь к единице, а $\operatorname{Re} S_{R_{df0}}^W$ уменьшается, стремясь к нулю. Вещественная частотная характеристика ПФ дуги $\operatorname{Re} S_{\theta}^W < 1$ для всех вещественных частот.

Относительные изменения (погрешности) ПФ:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta W(p, R_{ct0})}{W(p)} &\approx \frac{p}{p + \alpha} \cdot \frac{\Delta R_{ct0}}{R_{ct0}}, \\ \frac{\Delta W(p, R_{df0})}{W(p)} &\approx \frac{R_{df0} / (R_{ct0}\theta)}{p + \alpha} \cdot \frac{\Delta R_{df0}}{R_{df0}}, \\ \frac{\Delta W(p, \theta)}{W(p)} &\approx \frac{(1 - R_{df0} / R_{ct0})p}{(\theta p + 1)(p + \alpha)} \cdot \frac{\Delta \theta}{\theta}, \end{aligned}$$

где $\alpha = R_{df0} / (R_{ct0}\theta)$.

Чтобы проиллюстрировать чувствительность ПФ дуги, на рис. 2–4 показаны переходные или разгонные характеристики звена, имитирующего электрическую дугу, для случаев:

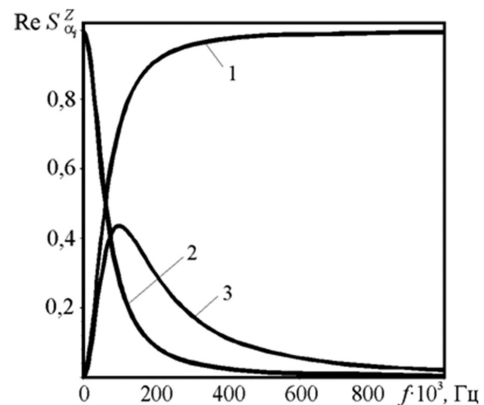


Рис. 1. Вещественные характеристики функции чувствительности передаточной функции дуги:

1 — $\operatorname{Re} S_{R_{ct0}}^W$; 2 — $\operatorname{Re} S_{R_{df0}}^W$; 3 — $\operatorname{Re} S_{\theta}^W$

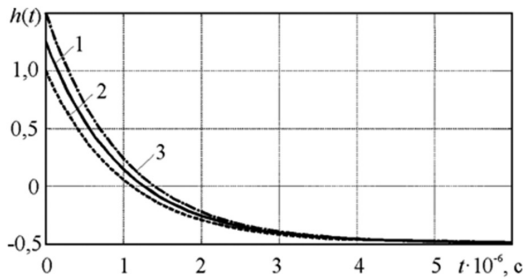


Рис. 2. Влияние изменений параметров на временную характеристику двухполюсника, имитирующего электрическую дугу:

1 — $R_{ст0} = 1,25 \text{ Ом}$; 2 — $0,8R_{ст0}$; 3 — $1,2R_{ст0}$

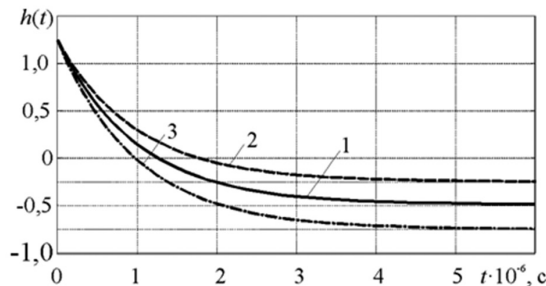


Рис. 3. Влияние изменений параметров на временную характеристику двухполюсника, имитирующего электрическую дугу:

1 — $R_{дф0} = -0,49 \text{ Ом}$; 2 — $0,5R_{дф0}$; 3 — $1,5R_{дф0}$

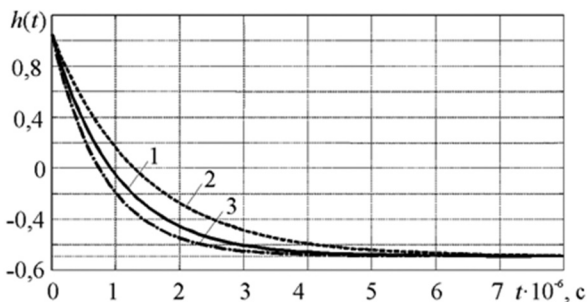


Рис. 4. Влияние изменений параметров на временную характеристику двухполюсника, имитирующего электрическую дугу:

1 — $\theta = 1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; 2 — 1,40; 3 — 0,80

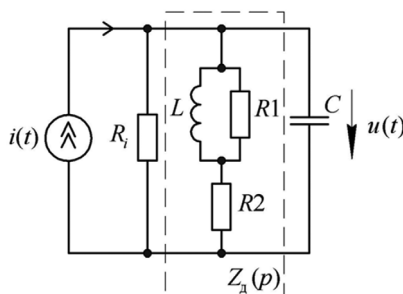


Рис. 5. Эквивалентная схема параллельного колебательно-го контура

$$\frac{\Delta R_{ст0}}{R_{ст0}} = 0; -0,20; +0,20;$$

$$\frac{\Delta R_{дф0}}{R_{дф0}} = 0; -0,50; +0,50;$$

$$\frac{\Delta \theta}{\theta_0} = 0; -0,20; +0,40.$$

Видно, что влияние изменения параметров на реакцию элемента с ПФ дуги является вполне умеренным. С учётом того, что ступенчатому сигналу соответствует довольно большая полоса частот, система управления будет компенсировать изменение параметров части объекта вполне удовлетворительно.

Завершим данный анализ интерпретацией функции чувствительности системы управления $S_0(j\omega)$. Функция чувствительности действительной системы управления $S_1(j\omega)$ связывает относительное изменение ПФ объекта $W(p)$ с получающимся вследствие этого относительным изменением ПФ системы управления $W_3(p)$ выражением:

$$\frac{\Delta W_3(p)}{W_{30}(p)} = S_1(p) \frac{\Delta W(p)}{W_0(p)}.$$

Здесь через $W_{30}(p)$ и $W_0(p)$ обозначены номинальные передаточные функции системы управления и объекта соответственно. Если амплитуда изменений ПФ объекта невелика, то можно считать $S_1(j\omega) \approx S_0(j\omega)$. Эта интерпретация функции $S_0(p)$ является классической и принадлежит Боде [3]; $S_0(p)$ называется функцией чувствительности замкнутой системы, поскольку она даёт информацию о чувствительности ПФ системы управления к изменениям ПФ объекта.

Комплексную частотную характеристику системы можно формально получить заменой в $W(p, \alpha_j)$ аргумента p на $j\omega$. Кроме того, в теории управления рассматривают амплитудную $A(\omega)$, фазовую $\phi(\omega)$, вещественную $U(\omega) = \text{Re}Z_d(j\omega)$ и мнимую $V(\omega) = \text{Im}Z_d(j\omega)$ частотные характеристики.

Отметим, что для уменьшения чувствительности автоматических систем один из путей состоит в увеличении усиления элементов контура обратной связи. При стремлении динамического коэффициента усиления системы управления в соответствующем диапазоне частот к бесконечности чувствительность по отношению к управляемому объекту будет стремиться к нулю.

На рис. 5 изображена линейная схема замещения цепи с дугой. Она состоит из ёмкости C и параллельно соединённого с ней нелинейного сопротивления (НС), имеющего падающую ВАХ. В схеме для исследования оно имитировано дифференциальным сопротивлением $R_{дф}$ и последовательно с ним включённой паразитной индуктивностью L_1 , зашунтированной активным сопротивлением R_1 [7; 8]. Обратим внимание на то, что в рассматриваемой цепи всегда

будет параллельная электрической дуге ёмкость, образуемая собственными ёмкостями установки. Эти ёмкости достигают 0,1 мкФ, а с учётом ёмкости элементов запуска дуги составляют даже несколько микрофарад [7; 8].

С целью исследования влияния резистивного демпфирования на электрическую цепь рассмотрим и более сложную цепь, изображённую на рис. 5. Электрическая цепь в соответствии с рис. 5 в данном случае состоит из сопротивления R_i и ёмкости C , соединённых параллельно с электрической дугой. Параллельный колебательный контур с потерями и параметрами $L = \theta(R_{ct0} - R_{дф0}) = 1,74 \cdot 10^{-6}$ Гн; $R_1 = R_{ct0} - R_{дф0} = 1,74$ Ом содержит резистор с отрицательным сопротивлением $R_2 = R_{дф0} = -0,49$ Ом.

Контур возбуждается источником тока, выходным сигналом является напряжение на контуре. Равенство $U(p) = Z(p)I(p)$ указывает на то, что передаточной функцией в данном случае служит операторное сопротивление контура.

Для определения чувствительности ПФ к параметрам элементов в символьном виде применялся математический пакет Maple, а процесс вычисления осуществлялся путём применения такого программного продукта, как FASTMEAN 6.0.

Соответствующие две передаточные функции (входные сопротивления схем в операторной форме) равны:

$$Z_d^C(p) = \frac{p\theta R_{ct0} + R_{дф0}}{p^2\theta R_{ct0}C + p(R_{дф0}C + \theta) + 1};$$

$$Z_d^{CR_i}(p) = \frac{p\theta R_{ct0} + R_{дф0}}{p^2\theta R_{ct0}C + p[R_{дф0}C + \theta(1 + R_{ct0}/R_i)] + 1 + R_{дф0}/R_i}.$$

Функции чувствительности контуров определяются выражениями:

$$S_{-C} = -pCZ_d^C(p); \quad (1)$$

$$S_{-R_{дф0}} = R_{дф0}Z_d^{-1}(p)Z_d^C(p)/(p\theta R_{ct0} + R_{дф0});$$

$$S_{-R_{ct0}} = R_{ct0}p\theta Z_d^{-1}(p)Z_d^C(p)/(p\theta R_{ct0} + R_{дф0});$$

$$S_{-\theta} = p\theta(R_{ct0} - R_{дф0})Z_d^{-1}(p)Z_d^C(p)/((p\theta + 1)(p\theta R_{ct0} + R_{дф0}));$$

$$S_{-C1} = -pCZ_d^{CR_i}(p); \quad (2)$$

$$S_{-R_{дф0}1} = R_{дф0}Z_d^{-1}(p)Z_d^{CR_i}(p)/(p\theta R_{ct0} + R_{дф0});$$

$$S_{-R_{ct0}1} = R_{ct0}p\theta Z_d^{-1}(p)Z_d^{CR_i}(p)/(p\theta R_{ct0} + R_{дф0});$$

$$S_{-\theta1} = p\theta(R_{ct0} - R_{дф0})Z_d^{-1}(p)Z_d^{CR_i}(p)/((p\theta + 1)(p\theta R_{ct0} + R_{дф0})).$$

Связь между логарифмическими функциями чувствительности (1) и (2) определяется соотношением

$$S_{-C1}(p) = S_{-C}(p)C_1(p),$$

откуда

$$C1(p) = \frac{S_{-C1}(p)}{S_{-C}(p)} = \frac{Z_d^{CR_i}(p)}{Z_d^C(p)}$$

или с учётом формул

$$C1(p) = \frac{p^2\theta R_{ct0}C + p(R_{дф0}C + \theta) + 1}{p^2\theta R_{ct0}C + p[R_{дф0}C + \theta(1 + R_{ct0}/R_i)] + 1 + R_{дф0}/R_i}. \quad (3)$$

Из формулы (3) для установившегося режима ($p = 0$) находим

$$C1(0) = 1/(1 + R_{дф0}/R_i).$$

Как следует из соотношения (3), шунтирование контура сопротивлением R_i практически не влияет на чувствительность цепи по отношению к вариациям ёмкости C .

На рис. 6–8 представлены логарифмические характеристики $|S(j\omega)|$ при некоторых значениях параметров C_0 и $R_{дф0}$.

Очевидно, что при больших значениях C полоса частот, в которой подавляются возмущения, становится уже. Если к тому же эквивалентное возмущение управляемой переменной имеет большую энергию вблизи частоты, соответствующей пику характеристики $|S(j\omega)|$, то следует рекомендовать меньшее значение ёмкости C .

Очевидно, что при $C = 10,0$ мкФ (самое благоприятное значение параметра цепи) подавление влияния изменений параметров обеспечивается при значениях до $2,0 \cdot 10^4$ Гц. Значение ёмкости $C = 10,0$ мкФ соответствует случаю, когда параметр демпфирования ξ приблизительно равен 0,7.

Для большей конкретности предположим, что изменения параметров вызываются изменениями ёмкости конденсатора C . Нетрудно найти, что при малых изменениях ΔC параметра C можно написать

$$\frac{\Delta W(p)}{W(p)} \cong - \frac{p^2 L_1 (R_1 + R_2) + p R_1 R_2}{p^2 C_1 L_1 (R_1 + R_2) + p (C_1 R_1 R_2 + L_1) + R_1} \cdot \frac{\Delta C}{C}, \quad (4)$$

где $W(p) = \frac{p L_1 (R_1 + R_2) + R_1 R_2}{p^2 C_1 L_1 (R_1 + R_2) + p (C_1 R_1 R_2 + L_1) + R_1}$ — ПФ объекта.

Отметим следующее.

1. При нулевой частоте независимо от значения ΔC имеем

$$\frac{\Delta W(p)}{W(p)} = 0.$$

Это означает, что независимо от ёмкости конденсатора C реакция системы на изменение заданной точки всегда является правильной.

2. Из выражения (4) видно, что функция влияния изменения ёмкости C на ПФ объекта возрастает до частот срыва ω_0 и остаётся далее постоянной.

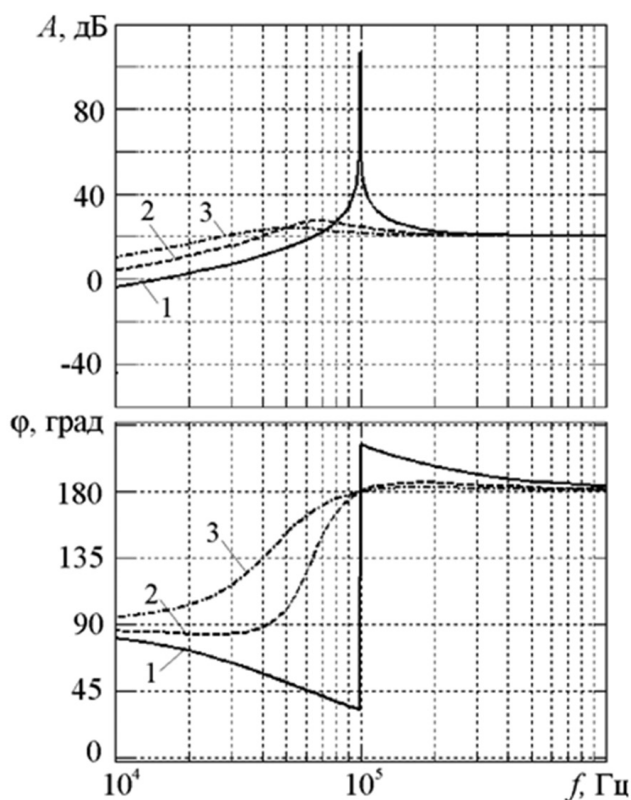


Рис. 6. Логарифмические частотные характеристики функции чувствительности ПФ цепи ($R_i = \infty$) к изменению параметра C при различных значениях C_0 :

1 — $2,041 \cdot 10^{-6}$ Ф; 2 — $5,0 \cdot 10^{-6}$ Ф; 3 — $10,0 \cdot 10^{-6}$ Ф

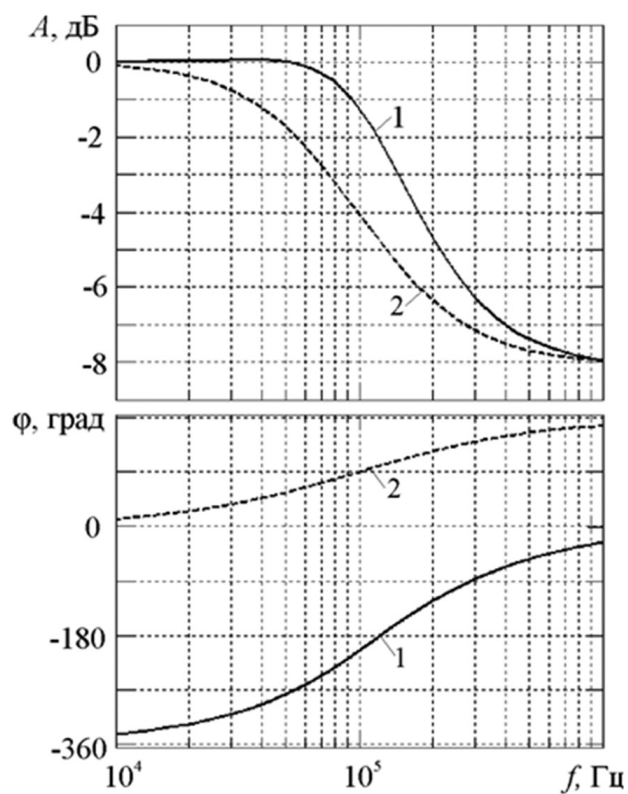


Рис. 7. Логарифмические частотные характеристики функции чувствительности ПФ цепи к изменению $R_{дф0}$ при различных значениях ёмкости C_0 :

1 — $2,041 \cdot 10^{-6}$ Ф; 2 — $0,1 \cdot 10^{-6}$ Ф

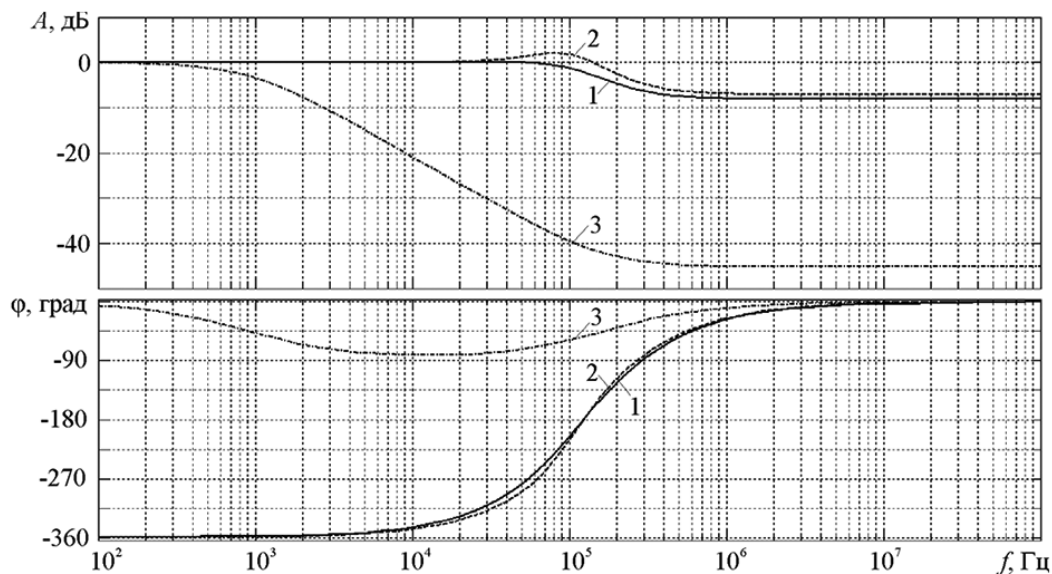


Рис. 8. Логарифмические частотные характеристики функции чувствительности ПФ цепи к изменению $R_{дф}$ при различных значениях $R_{дф0}$:

1 — $R_{дф0} = -0,49$ Ом; 2 — $R_{дф0} = -1,0$ Ом; 3 — $R_{дф0} = 0,01$ Ом

Из поведения функции чувствительности следует, что при низких частотах (до $2,0 \cdot 10^4$ Гц) влияние изменения ёмкости конденсатора C на ПФ объекта невелико, причём с уменьшением частоты это влияние ослабляется.

Как было показано [5; 10; 11], электрическая цепь с дугой и ёмкостью при определённых параметрах является колебательным контуром с малым затуханием, в нём возможны интенсивные переходные процессы. Для увеличения затухания переходных процессов в контуре (стабилизации и демпфирования) возможно включение гасящих резисторов. Влияние шунтирующего резистора состоит в том, что добротность колебательной системы уменьшается, увеличивается затухание, вносимое в контур сопротивлением R_p , тем самым уменьшается как интенсивность возникающих в контуре колебаний, так и время их затухания. Эквивалентное резонансное сопротивление контура с учётом шунтирующего действия резистора

$$R_{рез.эк} = R_{рез} / (1 + R_{рез} / R_i) = R_{рез} \parallel R_i.$$

Выбор шунтирующего резистора, удовлетворяющего как условию малых потерь мощности, так и условию хорошего демпфирования, осуществляется из условия

$$R_{рез} \cong R_i.$$

ВЫВОДЫ. 1. При взаимодействии таких двух инерционных элементов, как конденсатор и электрическая дуга, могут возникать автоколебания и неустойчивости. При этом автоколебания возникают и исчезают мягко.

2. Для источников питания электрической дуги с обратными связями предпочтительнее использовать схемы, которые базируются на источнике тока, управляемом напряжением.

3. Поскольку вольт-амперные характеристики, например, плазмотронов определяются их конструкцией и могут иметь различный характер, то выполненные исследования могут служить основой для создания перспективных плазмотронов с характеристиками, при которых в дугу передаётся наибольшее количество энергии.

4. При решении практических задач регулирования технологических сварочных процессов важное значение имеет решение задачи определения оптимальных параметров настройки или параметрической оптимизации автоматических систем регулирования, среди методов которых выделяются беспоисковые методы, основанные на использовании аппарата чувствительности, названные в [12] сенситивными. Успех её решения во многом предопределяет эффективность разработанных систем.

Список литературы

- [1] Эсибян, Э. М. (2000). Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы. *Автоматическая сварка*, 12, 6-17.
- [2] Ширшов, И. Г., & Котиков, В. Н. (1987). *Плазменная резка*. Ленинград: Машиностроение.
- [3] Быховский, Д. Г. (1987). *Плазменная резка*. Ленинград: Машиностроение.
- [4] Бакалов, В. П., Дмитриков, В. Ф., & Крук, Б. И. (2007). *Основы теории цепей: учебник для вузов*. Москва: Горячая линия-Телеком.

- [5] Верещаго, Е. Н., & Костюченко, В. И. (2013). Физико-математическая модель цепи питания плазмотрона. *Сварочное производство*, 2, 19-25.
- [6] Горовиц, А. М. (1970). *Синтез систем с обратной связью*. Москва: Советское радио.
- [7] Ленивкин, В. А., Евченко, В. М., & Стрижаков, Е. Л. (2008). *Источники питания для сварки*. Ростов на-Дону: ИЦ ДГТУ.
- [8] Лоос, А. В., Лукутин, А. В., & Сараев, Ю. Н. (1998). *Источники питания для импульсных технологических процессов*. Томск: Издательско-полиграфическая фирма ТПУ.
- [9] Милютин, В. С., Шалимов, М. П., & Шанчуров, С. М. (2007). *Источники питания для сварки*. Москва: Айрис-пресс.
- [10] Сидорец, В. Н., & Пентегов, И. В. (2013). *Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой*. Киев: Международная ассоциация «Сварка».
- [11] Верещаго, Е. Н., Квасницкий, В. Ф., Мирошниченко, Л. Н., & Пентегов, И. В. (2000). *Схемотехника инверторных источников питания для дуговой нагрузки: учебное пособие*. Николаев: УГМТУ.
- [12] Широков, Л. А. (1972). Алгоритм чувствительной адаптации. В кн.: *Оптимальное и адаптивное управление*. Саратов: СГУ, 61-81.

© Е. М. Верещаго, В. И. Костюченко

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов