

УДК 519.6

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ К ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ

**ВЕРЕЩАГО Е.Н.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры морского приборостроения Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: venmkua@gmail.com;

**КОСТЮЧЕНКО В.И.** канд. техн. наук, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: vikmkua@gmail.com;

**Цель работы.** Рассмотрение количественной оценки чувствительности определённых свойств автоматической системы к изменениям параметров элементов лишь части управляемого объекта – сварочной дуги.

**Методы исследования.** При решении практических задач регулирования электродуговыми и плазменными технологическими процессами важное значение имеет решение задачи определения оптимальных параметров настройки или параметрической оптимизации автоматических систем регулирования, среди методов которых выделяются беспоскоковые методы, основанные на использовании аппарата чувствительности.

**Полученные результаты.** Проанализирована чувствительность характеристик модели электрической дуги к изменениям параметров номинальной передаточной функции дуги, получены выражения для функций чувствительности, построены графики соответствующих функций. Предположено, что изменения параметров вызываются изменениями ёмкости, всегда имеющей место в цепях с дугой.

**Научная новизна.** Сформулирована и решена задача нахождения приемлемого компромисса между требованиями малого значения ошибки стабилизации без значительного увеличения значения входной переменной.

**Практическая ценность.** Разработаны различные правила для уменьшения чувствительности передаточной функции объекта по отношению к возможным, непредвиденным изменениям параметров управляемого объекта, которые могут быть использованы при проектировании высококачественных транзисторных источников тока для дуговой нагрузки. Для иллюстрации чувствительности передаточной функции дуги показаны реакции модели на ступенчатое изменение входного воздействия для разных случаев. К сожалению, в статье не рассматриваются характеристики подавления возмущения и шумов, а рассматриваются лишь некоторые варианты для уменьшения функции чувствительности.

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

### I. ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении задачи управления электродуговыми и плазменными технологическими процессами (ТП) и оборудованием в сварочной технике и в смежных областях необходимо проанализировать физико-технологические свойства элементов контура источника питания (ИП) – дуга [1]-[4]. Источник питания должен удовлетворять, прежде всего, технологическим требованиям [1], [2], [4]. 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 ваны [1]-[3].

### II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Во многих электрических цепях дугу можно рассматривать как нагрузку источника питания. Электрическая дуга как элемент электрической цепи является нелинейным активным (нереактивным) накопи-

телем энергии [5].

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], [7]. 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 [8]. Предположим, что в автоматической системе основным варьируемым элементом является управляемый объект.

Наряду с решением той или иной задачи автоматического управления следует уменьшать чувствительность автоматической системы по отношению к возможным, непредвиденным изменениям параметров управляемого объекта.

Естественно, что чем меньше чувствительность  $S_{\alpha_j}^W(p)$ , тем меньше влияние ПФ рассматриваемого элемента на свойства автоматической системы, тем система более высококачественна. Говоря об уменьшении или увеличении чувствительности, мы всегда будем подразумевать уменьшение или увеличение её модуля.

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

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

### III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью статьи является рассмотрение количественной оценки чувствительности определённых свойств автоматической системы к изменениям параметров элементов лишь части управляемого объекта – сварочной дуги.

### IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Такие важные свойства электрических цепей, как управляемость и надёжность, в значительной степени определяются чувствительностью характеристик электрических цепей к изменению параметров элементов.

Рассмотрим чувствительность передаточной функции и частотных характеристик электрической дуги. Пусть  $W(p, \alpha_j)$  является передаточной функцией дуги, зависящей от параметра  $\alpha_j$ .

Предполагаем, что скалярный параметр  $\alpha_j$  может принимать значения из некоторого интервала  $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ .

Тогда функция чувствительности ПФ по параметру  $\alpha_j$

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

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

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

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 операторная ПФ в виде рациональной дроби [4], [5]:

$$W_\delta(p) = Z_\delta(p) = (R_{cm0}\theta p + R_{\delta\phi 0}) / (\theta p + 1),$$

где  $R_{cm0}$ ,  $R_{\delta\phi 0}$  – статическое и дифференциальное сопротивление дуги в выбранной точке;  $\theta$  – постоянная времени дуги.

Эта ПФ при  $R_{\delta\phi 0} < 0$  имеет нуль в правой полуплоскости. Оператор в свою очередь характеризуется структурой и параметрами. В процессе функционирования системы структура и параметры оператора могут возмущаться, что приводит, как правило, к изменениям качества управления. Поэтому чувствительности ПФ дуги к изменениям ряда технических параметров будут иметь вид

$$S_{R_{cm0}}^W(p) = R_{cm0}\theta p / (R_{cm0}\theta p + R_{\delta\phi 0}),$$

$$S_{R_{\delta\phi 0}}^W(p) = R_{\delta\phi 0} / (R_{cm0}\theta p + R_{\delta\phi 0}),$$

$$S_\theta^W(p) = (R_{cm0} - R_{\delta\phi 0})\theta p / [(\theta p + 1)(R_{cm0}\theta p + R_{\delta\phi 0})].$$

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

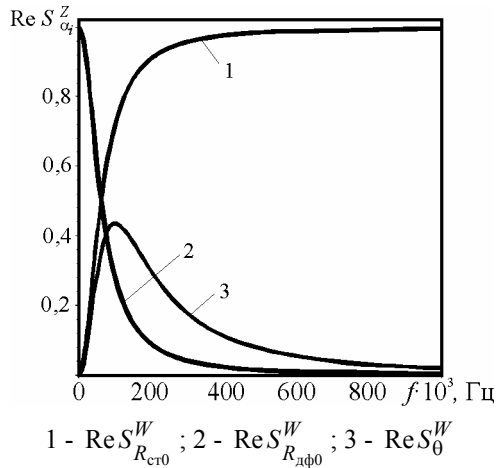
$$\frac{dZ_\delta(p)}{Z_\delta(p)} = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial Z_\delta(p)}{\partial \alpha_i} \frac{\alpha_i}{Z_\delta(p)} \right) \frac{d\alpha_i}{\alpha_i} = \sum_{i=1}^3 S_{\alpha_i}^Z \frac{d\alpha_i}{\alpha_i},$$

т.е. выразить её через нормированные чувствительности системы.

Графики функций  $U_j(\omega) = \text{Re} S_{\alpha_j}^W(j\omega)$  при численных значениях параметров  $R_{\delta\phi 0} = -0,49$  Ом,  $R_{cm0} = 1,25$  Ом и  $\theta = 1 \cdot 10^{-6}$  с приведены на рис. 1.

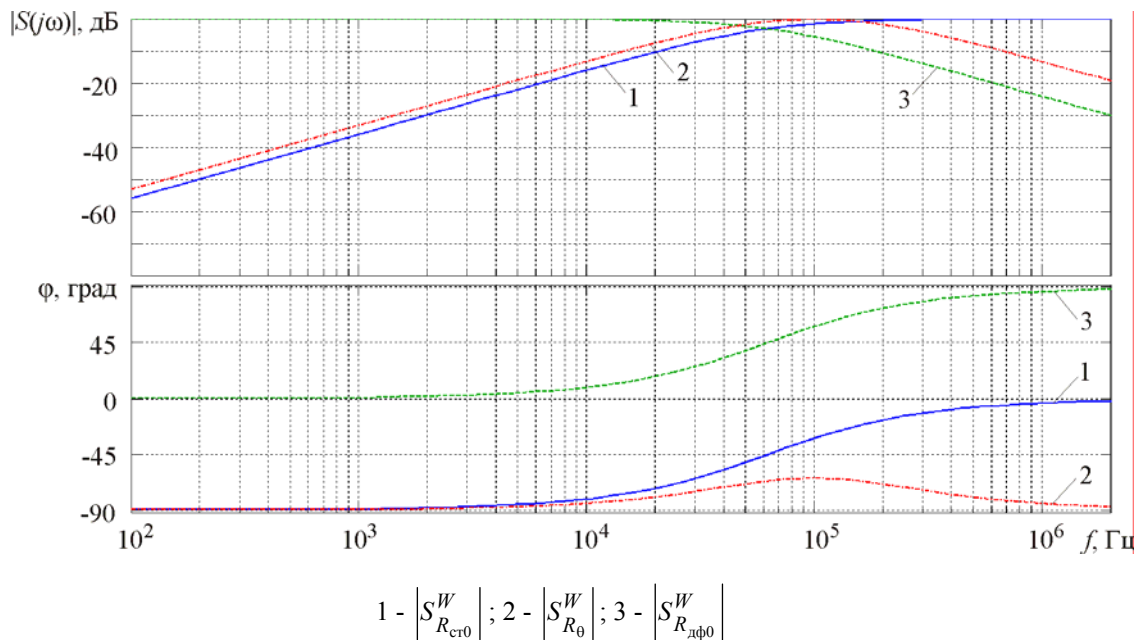
Проанализируем чувствительность ПФ дуги к изменениям параметров. На нулевой частоте чувстви-

тельность  $Re S_{\theta}^W = Re S_{R_{cm0}}^W = 0$ ,  $Re S_{R_{\phi 0}}^W = 1$ . При увеличении частоты  $Re S_{R_{cm0}}^W$  увеличивается, стремясь к единице, а  $Re S_{R_{\phi 0}}^W$  уменьшается, стремясь к нулю. Вещественная частотная характеристика ПФ дуги  $Re S_{\theta}^W < 1$  для всех вещественных частот.



**Рисунок 1.** Вещественные характеристики функции чувствительности передаточной функции дуги

Относительные изменения (погрешности) ПФ



**Рисунок 2.** Логарифмические частотные характеристики функций чувствительности ПФ дуги

2. Из выражения (1) видно, что функция  $\omega$  влияния изменения  $\Delta R_{ct0}$  на ПФ дуги возрастает до частоты срыва  $\alpha = R_{\phi 0} / (R_{ct0} \theta) = 2,46 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  и остаётся

$$\frac{\Delta W(p, R_{cm0})}{W(p)} \approx \frac{p}{p + \alpha} \cdot \frac{\Delta R_{cm0}}{R_{cm0}}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta W(p, R_{\phi 0})}{W(p)} \approx \frac{R_{\phi 0} / (R_{cm0} \theta)}{p + \alpha} \cdot \frac{\Delta R_{\phi 0}}{R_{\phi 0}},$$

$$\frac{\Delta W(p, \theta)}{W(p)} \approx \frac{(1 - R_{\phi 0} / R_{cm0}) p}{(\theta p + 1)(p + \alpha)} \cdot \frac{\Delta \theta}{\theta},$$

где  $\alpha = R_{\phi 0} / (R_{ct0} \theta)$ .

Графики функции  $|S_{\alpha_j}^W(j\omega)|$  представлены на рис. 2.

Отметим следующее.

1. При нулевой частоте независимо от значений  $\Delta R_{ct0}$ ,  $\Delta \theta$  имеем

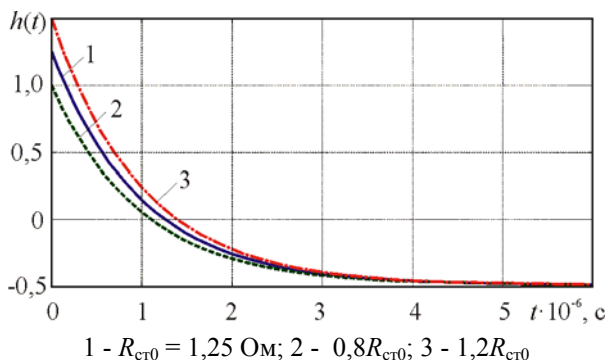
$$\frac{\Delta W(0, R_{cm0})}{W(0)} = 0, \quad \frac{\Delta W(0, \theta)}{W(0)} = 0.$$

Это означает, что независимо от изменения параметров функции чувствительности  $S_{R_{cm0}}^W(0)$ ,  $S_{\theta}^W(0)$  всегда равны нулю, т.е. реакция звена на изменение заданной точки всегда является правильной.

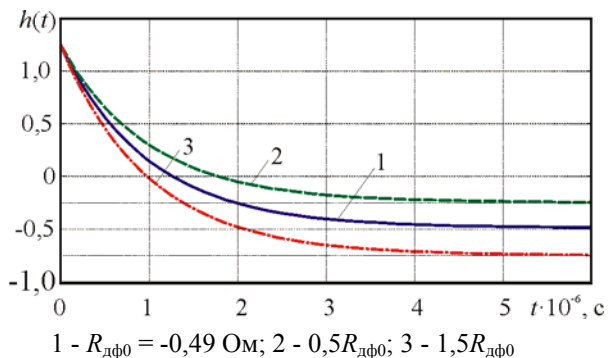
ослабляется. Таким образом, диаграмма Боде  $|S_{R_{ст0}}^W(j\omega)|$  показывает, что противодействие изменению параметра  $\Delta R_{ст0}$  обеспечивается вплоть до частоты срыва ПФ  $\alpha$ .

Чтобы иллюстрировать чувствительность ПФ дуги, на рис. 3-5 показаны переходные или разгонные характеристики звена, имитирующего электрическую дугу, для случаев

$$\begin{aligned} \Delta R_{cm0}/R_{cm0} &= 0; -0,20; +0,20; \\ \Delta R_{\phi0}/R_{\phi0} &= 0; -0,50; +0,50; \\ \Delta\theta/\theta_0 &= 0; -0,20; +0,40. \end{aligned}$$



**Рисунок 3.** Влияние изменений параметров на временную характеристику двухполюсника, имитирующего электрическую дугу



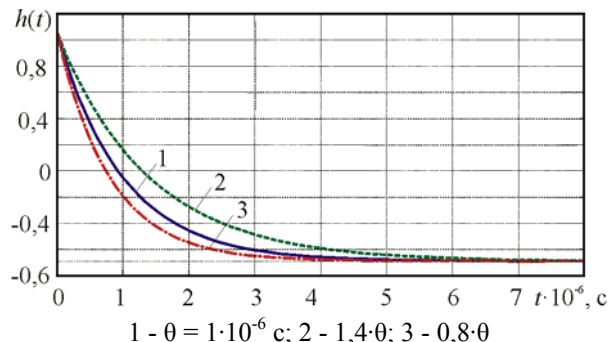
**Рисунок 4.** Влияние изменений параметров на временную характеристику двухполюсника, имитирующего электрическую дугу

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

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



**Рисунок 5.** Влияние изменений параметров на временную характеристику двухполюсника, имитирующего электрическую дугу

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 [6];  $S_0(p)$  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  $W(p, \alpha)$  аргумента  $p$  на  $j\omega$ . Кроме того, в теории управления рассматривают амплитудную  $A(\omega)$ , фазовую  $\varphi(\omega)$ , вещественную  $U(\omega) = \text{Re}Z_d(j\omega)$  и мнимую  $V(\omega) = \text{Im}Z_d(j\omega)$  частотные характеристики.

Рассмотрим комплексную частотную характеристику  $W(j\omega, \alpha)$ :

$$W(j\omega, \alpha) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i(\alpha)(j\omega)^i}{\sum_{i=0}^n a_i(\alpha)(j\omega)^i} = A(\omega) \exp[j\varphi(\omega)],$$

где  $A(\omega) = A[\omega, a_0(\alpha), \dots, a_n(\alpha), b_0(\alpha), \dots, b_m(\alpha)]$ ,  
 $\varphi(\omega) = \varphi[\omega, a_0(\alpha), \dots, a_n(\alpha), b_0(\alpha), \dots, b_m(\alpha)]$ .

В соответствии с правилами дифференцирования сложных функций

$$\frac{\partial A(\omega)}{\partial \alpha} = \sum_{i=0}^n \frac{\partial A(\omega)}{\partial a_i} \cdot \frac{da_i}{d\alpha} + \sum_{i=0}^m \frac{\partial A(\omega)}{\partial b_i} \cdot \frac{db_i}{d\alpha},$$

$$\frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \alpha} = \sum_{i=0}^n \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial a_i} \cdot \frac{da_i}{d\alpha} + \sum_{i=0}^m \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial b_i} \cdot \frac{db_i}{d\alpha}.$$

Сомножители  $\partial A/\partial a_i$ ,  $\partial A/\partial b_i$ ,  $\partial \varphi/\partial a_i$ ,  $\partial \varphi/\partial b_i$  определяются только структурой передаточной функции и величинами коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  при  $\alpha = \alpha^0$ .

В табл. 1 и 2 приведены выражения этих сомножителей для передаточной функции дуги. Сомножители  $\partial a_i/\partial \alpha$  и  $\partial b_i/\partial \alpha$  определяются конкретной зависимостью передаточной функции от параметров  $\alpha$ .

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.

Рассмотрим нелинейную цепь с электрической

дугой и одним накопителем энергии – ёмкостью. На рис. 6 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 включенной паразитной индуктивностью  $L_1$ , зашунтированной активным сопротивлением  $R_1$  [4], [9]-[12].

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 микрофард [13]-[15].

Таблица 1. Чувствительность амплитудных характеристик дуги

Передаточная функция $W(p)$	Чувствительность по отдельным параметрам		
	$\frac{\partial A}{\partial R_{дф0}}$	$\frac{\partial A}{\partial R_{сг0}}$	$\frac{\partial A}{\partial \theta}$
$\frac{R_{сг0}\theta p + R_{дф0}}{\theta p + 1}$	$\frac{R_{дф0}}{\sqrt{MD}}$	$\frac{R_{дф0}\theta\omega^2}{\sqrt{MD}}$	$\frac{\theta\omega^2}{\sqrt{MD}}$

Таблица 2. Чувствительность фазовых характеристик дуги

Передаточная функция $W(p)$	Чувствительность по отдельным параметрам		
	$\frac{\partial \varphi}{\partial R_{дф0}}$	$\frac{\partial \varphi}{\partial R_{сг0}}$	$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta}$
$\frac{R_{сг0}\theta p + R_{дф0}}{\theta p + 1}$	$\frac{R_{сг0}\theta\omega}{D}$	$\frac{R_{дф0}\omega}{D}$	$\frac{R_{дф0}^2\omega}{D}$

где  $M = (\theta\omega)^2 + 1$ ,  $D = R_{сг0}^2(\theta\omega)^2 + R_{дф0}^2$ .

С целью исследования влияния резистивного демпфирования на электрическую цепь, рассмотрим и более сложную цепь, изображенную на рис. 6. Электрическая цепь в соответствии с рис. 6. в данном случае состоит из сопротивления  $R_i$  и ёмкости  $C$ , соединённых параллельно с электрической дугой. Параллельный колебательный контур с потерями и параметрами  $L = \theta(R_{сг0} - R_{дф0}) = 1,74 \cdot 10^{-6}$  Гн;  $R1 = R_{сг0} - R_{дф0} = 1,74$  Ом содержит резистор с отрицательным сопротивлением  $R2 = R_{дф0} = -0,49$  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 получения ПФ контура и определения чувствительности ПФ к параметрам элементов в символьном виде применялся известный математический пакет Maple, а полная автоматизация процесса вычис-

ления осуществлялась путём применения такого программного продукта как FASTMEAN, имеющего возможность экспорта полученных формул в Maple в текстовом виде.

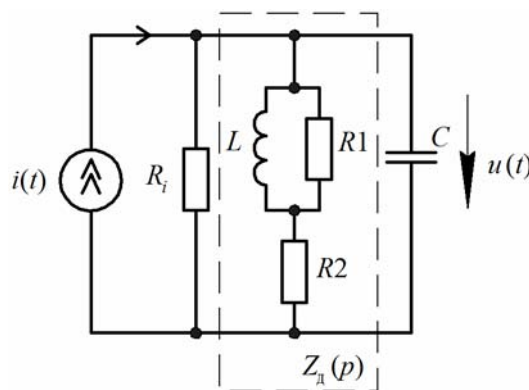


Рисунок 6. Эквивалентная схема параллельного колебательного контура

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

$$Z_{д}^C(p) = \frac{p\theta R_{ст0} + R_{дф0}}{p^2\theta R_{ст0}C + p(R_{дф0}C + \theta) + 1},$$

$$Z_{д}^{CR_i}(p) = (p\theta R_{ст0} + R_{дф0}) / (p^2\theta R_{ст0}C + p[R_{дф0}C + \theta(1 + R_{ст0}/R_i)] + 1 + R_{дф0}/R_i).$$

Нетрудно найти, что функции чувствительности рассматриваемых контуров определяются выражениями:

$$S_{-C} = -pCZ_{\delta}^C(p); \tag{2}$$

$$S_{-R_{\delta ф0}} = R_{\delta ф0}Z_{\delta}^{-1}(p)Z_{\delta}^C(p) / (p\theta R_{см0} + R_{\delta ф0});$$

$$S_{-R_{см0}} = R_{см0}p\theta Z_{\delta}^{-1}(p)Z_{\delta}^C(p) / (p\theta R_{см0} + R_{\delta ф0});$$

$$S_{-\theta} = \frac{p\theta(R_{см0} - R_{\delta ф0})Z_{\delta}^{-1}(p)Z_{\delta}^C(p)}{(p\theta + 1)(p\theta R_{см0} + R_{\delta ф0});}$$

$$S_{-C I} = -pCZ_{\delta}^{CR_i}(p); \tag{3}$$

$$S_{-R_{\delta ф0} I} = R_{\delta ф0}Z_{\delta}^{-1}(p)Z_{\delta}^{CR_i}(p) / (p\theta R_{см0} + R_{\delta ф0});$$

$$S_{-R_{см0} I} = R_{см0}p\theta Z_{\delta}^{-1}(p)Z_{\delta}^{CR_i}(p) / (p\theta R_{см0} + R_{\delta ф0});$$

$$S_{-\theta I} = \frac{p\theta(R_{см0} - R_{\delta ф0})Z_{\delta}^{-1}(p)Z_{\delta}^{CR_i}(p)}{(p\theta + 1)(p\theta R_{см0} + R_{\delta ф0})}.$$

Связь между логарифмическими функциями чувствительности (2) и (3) определяется соотношением

$$S_{-CI}(p) = S_{-C}(p)C_I(p),$$

откуда

$$C_I(p) = \frac{S_{-CI}(p)}{S_{-C}(p)} = \frac{Z_{\delta}^{CR_i}(p)}{Z_{\delta}^C(p)}$$

или с учётом формул

$$C_I(p) = \frac{E}{F}. \tag{4}$$

где  $E = p^2\theta R_{см0}C + p(R_{\delta ф0}C + \theta) + 1,$

$$F = p^2\theta R_{см0}C + p[R_{\delta ф0}C + \theta(1 + \frac{R_{см0}}{R_i})] + \frac{R_{\delta ф0}}{R_i} + 1.$$

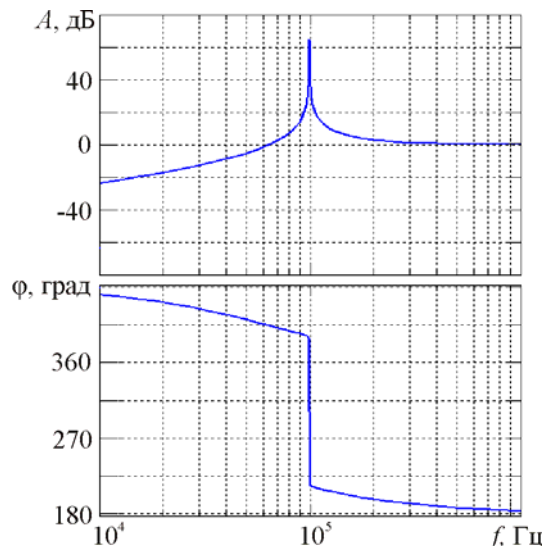
Из формулы (4) для установившегося режима ( $p = 0$ ) находим

$$C_I(0) = 1 / (1 + R_{\delta ф0} / R_i).$$

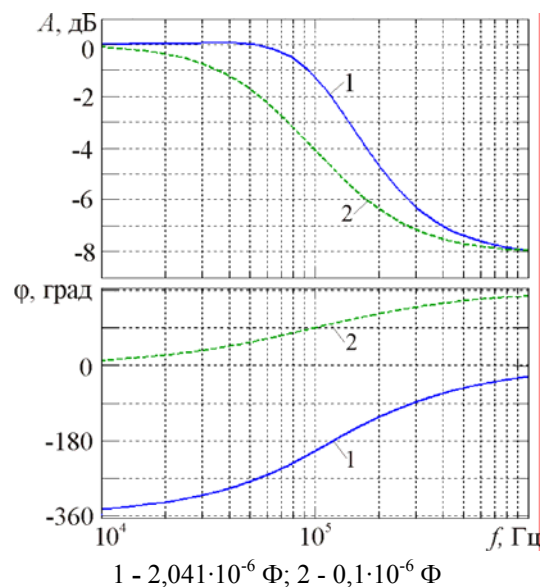
Как следует из соотношения (4) шунтирование контура сопротивлением  $R_i$  практически не влияет на чувствительность цепи по отношению к вариациям

ёмкости  $C$ .

На рис. 7-10 представлены логарифмические характеристики  $|S(j\omega)|$  при некоторых значениях параметров  $C_0$  и  $R_{дф0}$ .



**Рисунок 7.** Логарифмические частотные характеристики функции чувствительности ПФ цепи ( $R_i = 1$  кОм) к изменению параметра  $C$  для  $C_0 = 2,041 \cdot 10^{-6}$  Ф

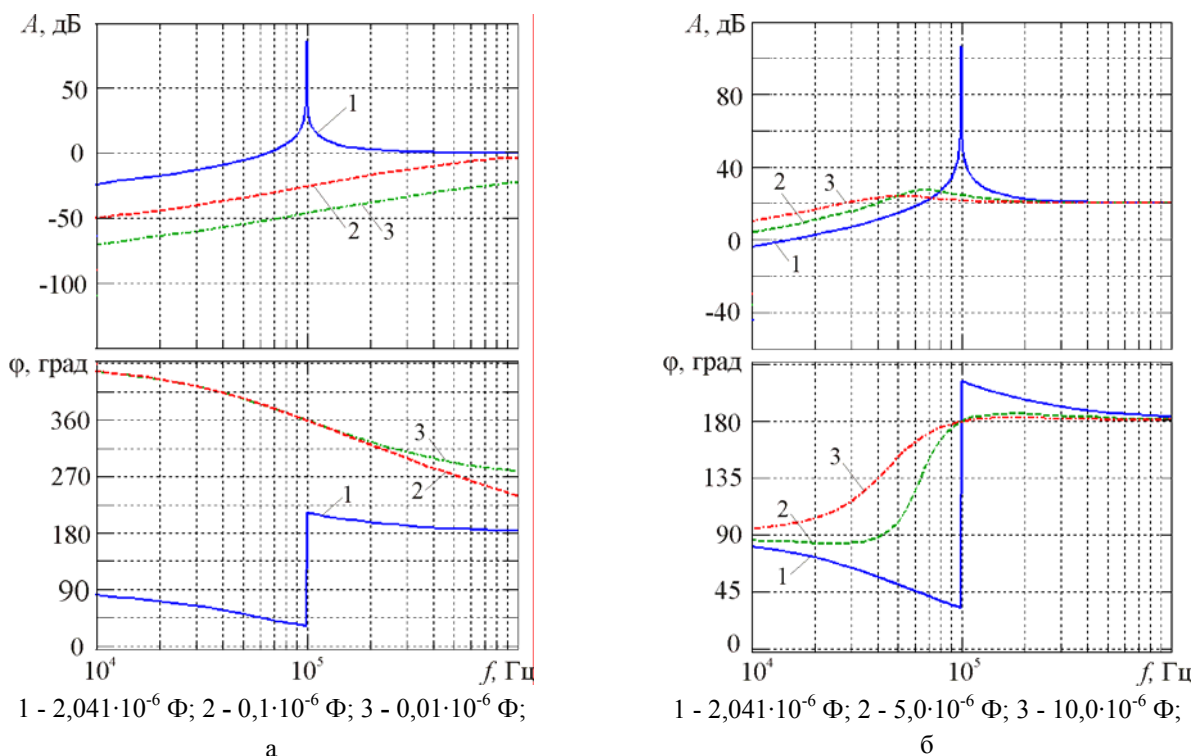


**Рисунок 8.** Логарифмические частотные характеристики функции чувствительности ПФ цепи к изменению  $R_{дф0}$  при различных значениях  $C_0$

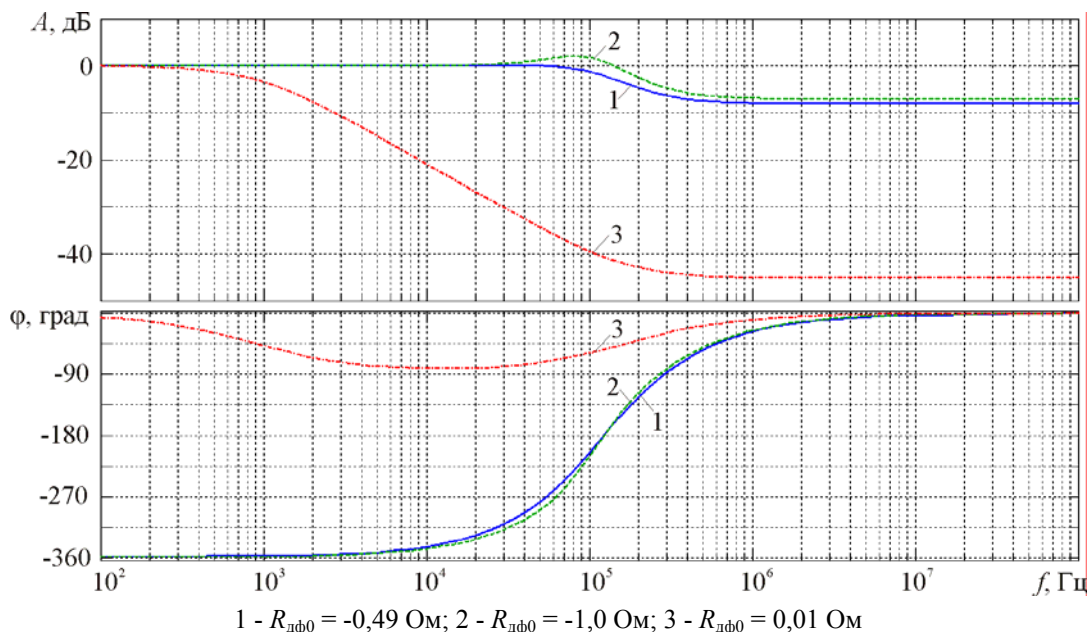
При больших значениях  $C$  полоса частот, в которой подавляются возмущения, становится уже. Если, к тому же, эквивалентное возмущение управляемой переменной имеет большую энергию вблизи частоты, соответствующей пику характеристики  $|S(j\omega)|$ , то следует рекомендовать меньшее значение ёмкости 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

Очевидно, что при  $C = 10,0$  мкФ (самое благоприятное значение параметра цепи) подавление влияния изменений параметров обеспечивается при значе-

ниях до  $2,0 \cdot 10^4$  Гц. Значение ёмкости  $C = 10,0$  мкФ соответствует случаю, когда параметр демпфирования  $\xi$  приблизительно равен 0,7.



**Рисунок 9.** Логарифмические частотные характеристики функции чувствительности ПФ цепи ( $R_i = \infty$ ) к изменению параметра  $C$  при различных значениях  $C_0$



**Рисунок 10.** Логарифмические частотные характеристики функции чувствительности ПФ цепи к изменению  $R_{df}$  при различных значениях  $R_{df0}$

Для большей конкретности предположим, что изменения параметров вызываются изменениями ём-

кости конденсатора  $C$ . Нетрудно найти, что при малых изменениях  $\Delta C$  параметра  $C$  можно написать

$$\frac{\Delta W(p)}{W(p)} \cong - \frac{p^2 L_1 (R_1 + R_2) + p R_1 R_2}{p^2 C_1 L_1 (R_1 + R_2) + p(C_1 R_1 R_2 + L_1) + R_1} \times \frac{\Delta C}{C}, \quad (5)$$

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

При нулевой частоте независимо от значения  $\Delta C$  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.

Из выражения (5) видно, что функция  $\omega$  влияния изменения ёмкости  $C$  на ПФ объекта возрастает до частоты срыва  $\omega_0$  и остаётся далее постоянной. 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 [4], [5], [16], 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  $R_i$ , 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

$$R_{рез} \cong R_i.$$

## V. 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. Так как 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 [7] сенситивными. Успех её решения во многом предопределяет эффективность разработанных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ленивкин В.А. Источники питания для сварки [Текст] / В.А. Ленивкин, В.М. Евченко, Е.Л. Стрижаков. – Ростов н/Д.: ИЦ ДГТУ, 2008. – 273 с.
- [2] 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.
- [3] Милютин В.С. Источники питания для сварки [Текст] / В.С. Милютин, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров. – М.: Айрис-пресс, 2007. – 376 с.
- [4] Схемотехника инверторных источников питания для дуговой нагрузки: учеб. пособие [Текст] / Е.Н. Верещаго, В.Ф. Квасницкий, Л.Н. Мирошниченко, И.В. Пентегов. – Николаев: УГМТУ, 2000. – 283 с.
- [5] Сидорец В.Н. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой [Текст] / В.Н. Сидорец, И.В. Пентегов. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.
- [6] Горовиц А.М. Синтез систем с обратной связью [Текст] / А.М. Горовиц. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.
- [7] Широков Л.А. Алгоритм сенситивной адаптации [Текст] / Л.А. Широков // В кн.: Оптимальное и адаптивное управление. – Саратов: СГУ, 1972, – с. 61 – 81.
- [8] Бакалов В.П. Основы теории цепей: учебник для вузов [Текст] / В.П. Бакалов, В.Ф. Дмитриков, Б.И. Крук. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 597 с.
- [9] Mayer E.A. An improved sampled-data current-mode-control model which explains the effects of control delay [Text] / E.A. Mayer, R.J. King // IEEE Trans on Power Electronics, 2001, Vol. 16, Issue: 3, p. 369 – 374. DOI: 10.1109/63.923769



- [10] Krein P.T. Types of instabilities encountered in simple power electronics circuits: Unboundedness, chattering and chaos [Text] / P.T. Krein, R.M. Bass // Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf., 1990, p. 191–194. DOI: 10.1109/APEC.1990.66411
- [11] Lowke J.J. A simplified unified theory of arcs and their electrodes [Text] / J.J. Lowke, R. Morrow, J. Haidar // Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, Vol. 30, P. 2033–2042. DOI: 10.1088/0022-3727/30/14/011
- [12] Arif A. Load Modeling – A Review [Text] / A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo, D. Zhao // IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, Vol. 9, Issue: 6, p. 5986–5999. DOI: 10.1109/TSG.2017.2700436
- [13] Vereshchago Y.N. A physical–mathematical model of the power circuit of a plasma torch [Text] / Y.N. Vereshchago, V.I. Kostyuchenko // Welding International. – 2014. – Vol. 28. – № 2. – PP. 133–139. DOI: 10.1080/09507116.2013.796664
- [14] Верещаго Е.Н. Модель электрической дуги в MATLAB / Simulink [Текст] / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – №2. – С. 40–46. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-5
- [15] Vereshchago E.N. A Simulation Model of Electric Arc [Text] / E.N. Vereshchago, V.I. Kostyuchenko // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85. – № 6. – PP. 376–381. DOI: 10.3103/S106837121406011X
- [16] Верещаго Е.Н. Неустойчивость режима в цепи с емкостью и электрической дугой, питаемой от источника постоянного тока [Текст] / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко // Автоматическая сварка. – 2014. – № 8. – С. 44–48.

Стаття надійшла до редакції 28.01.2019

## ЧУТЛИВІСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ДО ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ

ВЕРЕЩАГО Є. М.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: venmkua@gmail.com;

КОСТЮЧЕНКО В. І.

канд. техн. наук, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: vikmkua@gmail.com;

**Мета роботи.** Розгляд кількісної оцінки чутливості певних властивостей автоматичної системи до змін параметрів елементів лише частини керованого об'єкта - зварювальної дуги.

**Методи дослідження.** При вирішенні практичних завдань регулювання електродуговими і плазовими технологічними процесами важливе значення має вирішення завдання визначення оптимальних параметрів налаштування або параметричної оптимізації автоматичних систем регулювання, серед методів яких виділяються безпошукові методи, засновані на використанні апарату чутливості.

**Отримані результати.** Проаналізовано чутливість характеристик моделі електричної дуги до зміни параметрів номінальної передавальної функції дуги, отримані вирази для функцій чутливості, побудовані графіки відповідних функцій. Припущено, що зміни параметрів викликаються змінами ємності, яка завжди має місце в ланцюгах з дугою.

**Наукова новизна.** Сформульовано та розв'язано задачу знаходження прийняттого компромісу між вимогами малого значення помилки стабілізації без значного збільшення значення вхідної змінної.

**Практична цінність.** Розроблено різні правила для зменшення чутливості передавальної функції об'єкта по відношенню до можливих, непередбачених змін параметрів керованого об'єкта, які можуть бути використані при 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, в статті не розглядаються характеристики придушення збурення і шумів, а розглядаються лише деякі варіанти для зменшення функції чутливості.

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

## SENSITIVITY OF CHARACTERISTICS OF MODEL OF THE ELECTRIC ARC TO CHANGE OF PARAMETERS OF ELEMENTS

VERESCHAGO E.N.

PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Marine Instrument of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: venmkua@gmail.com;

KOSTYUCHENKO V. I. PhD, Associate Professor of the Department of Marine Electric Power Systems of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: vikmkua@gmail.com;

**Purpose.** 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.

**Methodology.** 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.

**Findings.** 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 takes place in circuits with an arc.

**Originality.** 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.

**Practical value.** 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.

#### REFERENCES

- [1] Lenivkin, V. A., Evchenko, V. M., Strizhakov, E. L. (2008). Istochniki pitaniya dlja svarki. Rostov n/D.: IC DGTU, 273.
- [2] Loos, A. V., Lukutin, A. V., Saraev, Ju. N. (1998). Istochniki pitaniya dlja impul'snyh tehnologicheskikh processov. Tomsk: Izdatel'sko-poligraficheskaja firma TPU, 160.
- [3] Miljutin, V. S., Shalimov, M. P., Shanchurov, S.M. (2007). Istochniki pitaniya dlja svarki. M.: Ajrispress, 376.
- [4] Vereshhago, E. N., Kvasnickij, V. F., Miroshnichenko, L. N., Pentegov, I. V. (2000). Shemotehnika invertornyh istochnikov pitaniya dlja dugovoj nagruzki. Nikolaev: UGMTU, 283.
- [5] Sidorec, V. N., Pentegov, I. V. (2013). Determinirovannyj haos v nelinejnyh cepjah s jelektricheskoj dugoj. Kiev: Mezhdunarodnaja asociacija «Svarka», 272.
- [6] Gorovic, A. M. (1970). Sintez sistem s obratnoj svjaz'ju. M.: Sovetskoe radio, 560.
- [7] Shirokov, L. A. (1972). Algoritm sensitivnoj adaptacii. V kn.: Optimal'noe i adaptivnoe upravlenie. Saratov: SGU, 61-81.
- [8] Bakalov, V. P., Dmitrikov, V. F., Kruk, B. I. (2007). Osnovy teorii cepej. M.: Gorjachaja linija – Telekom, 597.
- [9] Mayer, E. A., King, R. J. (2001). An improved sampled-data current-mode-control model which explains the effects of control delay. *IEEE Trans on Power Electronics*, 16, 3, 369-374. DOI: 10.1109/63.923769
- [10] Krein, P.T., Bass, R.M. (1990). Types of instabilities encountered in simple power electronics circuits: Unboundedness, chattering and chaos. *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf.*, 191-194. DOI: 10.1109/APEC.1990.66411
- [11] Lowke, J. J., Morrow, R., Haidar, J. (1997). A simplified unified theory of arcs and their electrodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30, 2033-2042. DOI: 10.1088/0022-3727/30/14/011
- [12] Arif, A., Wang, Z., Wang, J., Mather, B., Bashualdo, H., Zhao, D. (2017). Load Modeling – A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9, 6, 5986-5999. DOI: 10.1109/TSG.2017.2700436
- [13] Vereshchago, Y. N., Kostyuchenko, V. I. (2014). A physical-mathematical model of the power circuit of a plasma torch. *Welding International*, 28, 2, 133-139. DOI: 10.1080/09507116.2013.796664
- [14] Vereshhago, E. N., Kostjuchenko, V. I. (2013). Model' jelektricheskoj dugi v MATLAB / Simulink. *Elektrotehnika ta elektroenergetyka*, 2, 40-46. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-5
- [15] Vereshchago, E. N., Kostyuchenko, V. I. (2014). A Simulation Model of Electric Arc. *Russian Electrical Engineering*, 85, 6, 376-381. DOI: 10.3103/S106837121406011X
- [16] Vereshhago, E. N., Kostjuchenko, V. I. (2014). Neustojchivost' rezhima v cepi s emkost'ju i jelektricheskoj dugoj, pitaemoj ot istochnika postojannogo toka. *Avtomaticheskaja svarka*, 8, 44-48.