

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ

**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 вопросов, касающихся проблемы устойчивости системы «источник питания – электрическая дуга» при малых возмущениях и её решение в рамках метода малых колебаний. Обсуждение выбора математической модели, изложение эффективного подхода к решению задач устойчивости, основанного на использовании для аналитического описания цепей переменного тока общих уравнений квазистационарных режимов.

**Методы исследования.** В методологическом плане статья базируется на известных классических положениях общей теории устойчивости. В основном рассматривается устойчивость при малых возмущениях и используются методы, которые базируются на анализе дифференциальных уравнений первого (линейного) приближения, получившие плодотворное применение и развитие в теории автоматического регулирования.

**Полученные результаты.** Примеры решения конкретных задач устойчивости в аналитической, а также в графической или графоаналитической форме имеют важное значение в становлении и утверждении теоретических положений. В отличие от численных решений они более наглядно иллюстрируют все характерные стороны проблемы. В частности, они являются хорошей иллюстрацией той отличительной стороны задачи об апериодической устойчивости, что её решение зависит исключительно от статических характеристик элементов системы и может быть получено в рамках лишь конечных уравнений, а в качестве критерия устойчивости можно использовать коэффициент сопротивления.

**Научна новизна.** Получил дальнейшее развитие известный метод применительно к новому объекту исследования – преобразователю с мягким переключением, работающего на электрическую дугу. Уделено отдельное внимание более чёткой постановке задачи и более дифференцированной оценке её приемлемости для заданной технической системы.

**Практическая ценность.** В связи с непрерывным развитием отдельных систем электропитания значение проблемы их устойчивой работы ещё больше возрастает. Статья может служить реальной основой для конструктивного решения вопросов общей теории устойчивости новых источников питания технологических нагрузок, способствовать созданию благоприятных условий для дальнейшего плодотворного её развития, а также для разработки новых эффективных методов решения конкретных задач, интересующих специалистов в области систем электропитания электротехнологических установок.

**Ключевые слова:** устойчивость; система электропитания; электрическая дуга; инертность дуги.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые источники питания большинства современных электротехнологических установок широкого назначения должны обладать характеристиками источников тока [1]-[3]. Практическая их реализация с учётом специфики и режимов работы заставляют по-новому, комплексно решать вопросы разработки систем электропитания технологических установок, уделяя существенное внимание формированию требуемых выходных характеристик, обеспечивающих устойчивую работу системы источник питания – нагрузка.

Наиболее характерный способ построения источников питания средней и большой мощности – это компенсационная стабилизация построением замкну-

тых систем регулирования по току [3] (создание источников тока на основе управляемого преобразователя напряжения). При большом коэффициенте усиления замкнутой системы можно с заданной точностью поддерживать требуемое значение выходного тока при любых внешних воздействиях (изменение параметров нагрузки, напряжения питания и т.д.), а при моделировании импульсного источника питания с управлением по току рассматривать выходную индуктивность как управляемый источник тока и использовать усовершенствованную усреднённую модель источника тока [10], [14]. Это является основой широко используемых моделей [10], [14]. Подчеркнём, что в некоторых приложениях при определённых режимах работы система становится неустойчивой, а простая модель [11]-[14] не предсказывает колебания.

Анализ устойчивости в цепях с электрической дугой можно осуществлять двумя различными способами. В одном случае для дуги можно применять дифференциальное уравнение [13], [14], а для остальной электрической цепи выводить дифференциальные уравнения по общим законам электротехники или же, в другом случае, представить дугу в виде эквивалентной схемы [14]-[16], а цепь в целом рассматривать как некоторую структуру, состоящую из ёмкостей, индуктивностей и сопротивлений. Оба пути могут приводить в разных случаях к наглядному представлению проблем.

## II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В целом по проблеме устойчивости имеется большое число публикаций как отечественных, так и зарубежных авторов. Так, например, в отечественной литературе широко известны работы Б.Е. Патона, И.В. Волкова, И.В. Пентегова, В.К. Лебедева и др. Интересны работы Г.А. Белова, В.И. Мелешина, О.Г. Булатова. В этих работах заложены теоретические основы проблемы устойчивости преобразователей, работающих на существенно нелинейную нагрузку с резкопеременными параметрами.

Проблема устойчивости системы источник питания – дуга по отношению к малым возмущениям напряжения (тока) неоднократно исследовалась [5]-[9], [11], [12]. При этом большинство известных работ, связанных с расчётом устойчивости, основано на применении статической вольт-амперной характери-

стики дуги [5]-[7]. Такой подход к решению задачи устойчивости не учитывает динамические свойства электрической дуги. Учитывая вышесказанное, остановимся теперь более подробно на устойчивом и неустойчивом состоянии электрической дуги с учётом её динамического состояния и её влияния на электрическую цепь. При этом основные условия с  $\theta = 15$  мкс,  $R_{дф0} = -0,49$  Ом и  $C = C_{сп}$  выбираем так, чтобы могли возникать неустойчивости.

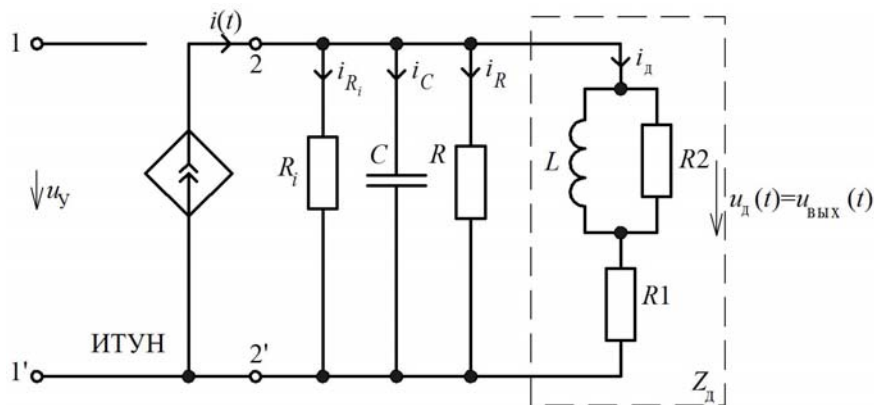
## III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Решение многогранной и весьма сложной проблемы устойчивости системы «источник питания – дуга» в предположении о малости внешних возмущений и допустимости линеаризации. Оценка точности выполняемых расчётов для принятия ответственных инженерных решений.

## IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поэтому с целью исследования влияния неустойчивости дуги на электрическую цепь рассмотрим цепь, изображённую на рис. 1. Последняя в данном случае состоит из источника тока управляемого напряжением (ИТУН), сопротивления  $R$  и ёмкости  $C$ , соединённых параллельно с электрической дугой  $Z_d$ .

На рис. 1 изображена схема силовой части преобразователя [11], [12], где для общности показано сопротивление  $R$ , включенное параллельно конденсатору  $C$ .



**Рисунок 1.** Схема замещения цепи «источник тока - дуга» (эквивалентная схема с разомкнутой цепью обратной связи): ИТУН – источник тока, управляемый напряжением;  $R_1 = R_{дф0}$ ;  $R_2 = R_{ст0} - R_{дф0}$ ;  $L = \theta(R_{ст0} - R_{дф0})$

Так как рабочая точка находится на падающем участке ВАХ дуги в расчётной схеме – схеме замещения для исследования устойчивости она имитирована в соответствии с [3] дифференциальным сопротивлением  $R_{дф0}$  и последовательно с ним включенной паразитной индуктивностью  $L$ , зашунтированной активным сопротивлением  $R_2$ .

Составив эквивалентную схему замещения для электрической цепи со сварочной или плазменной

дугой, возбуждаемой током в неразветвленной части цепи (рис. 1), замечаем, что роль частотного коэффициента передачи системы играет комплексное сопротивление (входное сопротивление на переменном токе), включенное параллельно источнику тока:

$$K(j\omega) = Z(j\omega) = \frac{k_0 [j\omega(L/R_{1эк}) + 1]}{A + j\omega B}, \quad (1)$$

где  $A = [1 + R_1/R_{ЭК} - \omega^2(1 + R_1/R_2)LC]$  ;  
 $B = \{R_1C + [1/R_2 + (1 + R_1/R_2)/R_{ЭК}]L\}$  ;  
 $R_{ЭК} = R_1 \parallel R = R_1R / (R_1 + R)$ ;  $R_{1ЭК} = (-R_{ДФ0}) \parallel R_2 \square 0$ ;  
 $R_{ЭК} \gg |R_1|$ ;  $K(0) = k_0 = |R_1|$  – модуль коэффициента передачи на нулевой частоте или динамические свойства цепи с потерями можно описать, задав её полную проводимость

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{R_i} + j\omega C + \frac{1}{R} + \frac{j\omega\theta + 1}{j\omega R_{CT0}\theta + R_{ДФ0}}$$

На нулевой частоте частотная передаточная функция (1) отрицательна:  $K(0) = -k_0$ . Отрицательный знак указывает на то, что при увеличении напряжения на входе ток  $i$  возрастает и выходное напряжение уменьшается. Наличие резистора  $R_{ЭК}$  учитывает все виды потерь в системе – неидеальность реактивных элементов, конечное (хотя и достаточно большое) выходное сопротивление источника тока, а также влияние внешних цепей.

Обратим внимание, что в цепи, изображенной на рис. 1, могут возникать периодические автоколебания и хаотические, мало отличающиеся от периодических [8].

Равенство  $U_d(s) = Z(s)I(s)$  указывает на то, что передаточной функцией (ПФ) в данном случае служит операторное сопротивление контура.

Для определения характера переходного процесса и записи уравнения свободной составляющей независимой (динамической) переменной  $u_{вых}(t) = u_d(t)$  необходимо располагать характеристическим уравнением цепи. Это уравнение может быть получено из анализа её операторной проводимости относительно зажимов источника тока  $Y_{\Sigma}(s) = I(s)/U_{вых}(s) = 1/Z(s)$ . Последнее может быть получено, если в уравнении для комплексной проводимости цепи  $Y_{\Sigma}(j\omega)$  сделать подстановку  $j\omega = s$  и приравнять его к нулю.

Для цепи, изображенной на рис. 1, имеем

$$(1 + R_1/R_2)LCs^2 + \{R_1C + [1/R_2 + (1 + R_1/R_2)/R_{ЭК}]L\}s + 1 + R_1/R_{ЭК} = a_0s^2 + a_1s + a_2 = 0.$$

Через  $a$  обозначены коэффициенты, зависящие от параметров системы и её режима:

$$a_0 = (1 + R_1/R_2)LC ;$$

$$a_1 = R_1C + [1/R_2 + (1 + R_1/R_2)/R_{ЭК}]L ; a_2 = 1 + R_1/R_{ЭК}.$$

Легко видеть, что поскольку  $R_{ЭК} \gg |R_{ДФ0}|$  (в частности  $R_{ЭК}$  отсутствует, т.е.  $R_{ЭК} \rightarrow \infty$ ) и поэтому свободный член положителен. Из условия  $\text{Re}Z(j\omega) > 0$  при  $\omega \rightarrow \infty$  следует, что  $R_2 > |R_1|$  ( $R_{CT0} - R_{ДФ0} > |R_{ДФ0}| > 0$ ), поэтому коэффициент при  $s^2$  тоже положителен. Система будет устойчивой, если

$$a_1 = R_{ДФ0}C + (1 + R_{CT0}/R_{ЭК})\theta > 0,$$

откуда следует

$$|R_{ДФ0}| < \theta(1 + R_{CT0}/R_{ЭК})/C. \quad (2)$$

Иными словами, условие, при котором состояние равновесия будет устойчивым сводится к требованию  $C < \theta/|R_{ДФ0}|$ . Величина  $C$  должна иметь значение, тем меньше, чем больше  $|R_{ДФ0}|$ . Нарушение условия  $a_1 > 0$  приводит к нарушению устойчивости системы, имеющему характер самораскачивания. Очевидно, что рассматриваемая система будет самопроизвольно возбуждаться, если имеющееся в ней отрицательное сопротивление  $-R_{ДФ0} > -R_{ДФ0\text{кр}}$ . Отсюда находим критическое значение отрицательного сопротивления:

$$R_{ДФ0\text{кр}} = -(\theta/C)(1 + R_{CT0}/R_{ЭК}) \approx -\theta/C.$$

В этом случае система находится на границе колебательной устойчивости (корни чисто мнимые). При этом собственные колебания есть гармонические функции вида

$$u_{\text{соб}}(t) = \frac{\sin(\omega_0 t)}{\cos(\omega_0 t)}.$$

Из основного дифференциального уравнения свободного движения для малых колебаний данной цепи, составленного относительно напряжения на дуге  $u_d(t)$

$$(1 + R_1/R_2)LCd^2u_d/dt^2 + \{R_1C + [1/R_2 + (1 + R_1/R_2)/R_{ЭК}]L\}du_d/dt + (1 + R_1/R_{ЭК})u_d = 0 \quad (3)$$

можно определять частоту колебания дуги.

Если учесть, что коэффициент при  $s$  в начальной точке неустойчивости становится равным нулю, то уравнение (3) даёт уравнение колебания с частотой

$$\omega = \sqrt{1/(R_{CT0}C\theta)}.$$

Подставив сюда  $\frac{1}{C} = \frac{|R_{ДФ0}|}{\theta}$ , получим

$$\omega = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{|R_{ДФ0}|}{R_{CT0}}}. \quad (4)$$

В частном случае, когда статическая ВАХ (СВАХ) дуги описывается уравнением [8]

$$U(i_{\theta}) = U_0 \left( \frac{i_{\theta}}{I_0} \right)^n,$$

либо

$$U(i_{\theta}) = P_0/i_{\theta},$$

где  $U_0$  и  $I_0$  – координаты одной из фиксированных точек СВАХ дуги;  $n = -1 \dots 0$ ;  $i_{\theta}$  – ток состояния дуги;  $P_0$  – константа, то, например, для дуги постоянной мощности ( $n = -1$ )

$$|R_{ДФ0}|/R_{CT0} = 1.$$

Так что уравнение (4) даёт

$$\omega = 1/\theta.$$

Следовательно, напряжение дуги с постоянной времени 15 мкс [5], [6] колебалось бы в случае неустойчивости приблизительно с частотой 10 кГц. Однако это верно только для начальной точки неустойчивости, а в дальнейшем может изменяться как частота, так и форма кривой колебаний [5], [6].

Условие неустойчивости цепи (2) можно записать в приведённом виде

$$-dy/dz = -R_{дф0*} > C_*^{-1}, \quad (5)$$

$$\text{где } y = u/U_0; \quad z = i_0/I_0; \quad R_{дф0*} = \frac{R_{дф0}I_0}{U_0};$$

$$C_* = \frac{CU_0}{\theta I_0}.$$

Начиная с момента, когда крутизна динамической характеристики становится настолько большой, что выполняется неравенство (5), нарушается устойчивость. Возникающая неустойчивость приводит к колебаниям как напряжения, так и тока дуги [8].

Очевидно, что наилучшую устойчивость система при данном поддержании тока будет иметь тогда, когда самораскачивание будет устранено.

Из (3), полагая, что внутреннее сопротивление источника  $R_i \rightarrow \infty$  и не учитывается влияние внешних цепей, получим

$$R_{ст0}C\theta s^2 + (R_{дф0}C + \theta)s + 1 = 0 \quad (6)$$

или

$$T_1T_2s^2 + \left(T_1 + \frac{R_{дф0}}{R_{ст0}}T_2\right)s + 1 = 0,$$

$$\text{где } T_1 = \theta; \quad T_2 = R_{ст0}C.$$

Введём два обобщенных безразмерных параметра

$$m = T_1 / T_2; \quad b = R_{дф0} / R_{ст0}.$$

Тогда характеристическое уравнение системы (6) приобретает вид

$$T_1T_2s^2 + T_2(m+b)s + 1 = 0, \quad (7)$$

а два его корня имеют значения

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{-\left[\frac{m}{T_1^2} - \left(\frac{m+b}{2T_1}\right)^2\right]} + \frac{-(m+b)}{2T_1} = \pm \gamma_D + \alpha,$$

$$\text{где } \alpha = -\frac{(m+b)}{2T_1} \text{ – коэффициент затухания;}$$

$$\gamma_D = \sqrt{\frac{m}{T_1^2} - \alpha^2} \text{ – частота колебаний.}$$

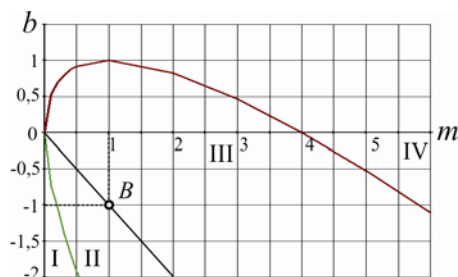
Колебательный характер переходных процессов в цепи соответствует комплексным значениям корней, что, в свою очередь, справедливо при

$$(m+b)^2 - 4m < 0. \quad (8)$$

Условие (8) выполняется, если выполняются неравенства

$$b > -m - 2\sqrt{m}; \quad b < -m + 2\sqrt{m},$$

что в плоскости параметров  $b$  и  $m$  соответствует внутренней области, ограниченной кривой на рис. 2. Вне этой области и на её границе корни характеристического уравнения действительные, а переходные процессы имеют аperiodический характер. Коэффициент при втором члене равенства (7) превращается в нуль, если  $b = -m$  или  $b/m = -1$ . Это означает: система консервативна, если значения параметров  $b$  и  $m$  определяются точками, которые принадлежат прямой  $OB$ .



**Рисунок 2.** Протекание процесса в системе  $u_d = f(t)$  после отклонения напряжения на дуге на  $\dot{y}_0$ : I, II – неустойчивость системы; III, IV – при демпфировании

Кривая разбивает плоскость на четыре области – I, II, III и IV. Особые прямые:

а)  $\omega = 0$ ; отсутствует;

б)  $\omega = \infty$ ;  $m = 0$ .

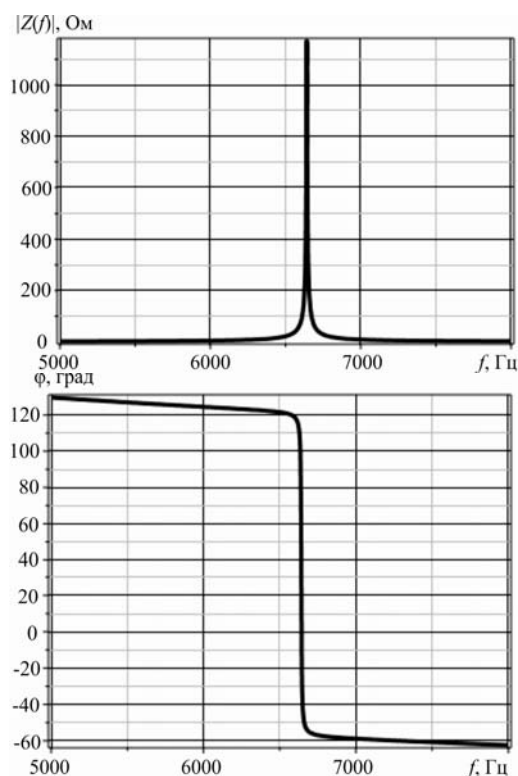
При отрицательных вещественных корнях или отрицательных вещественных частях комплексных корней возмущения, характеризующиеся  $\dot{y}$ , с налагающимися на них колебаниями затухают и дуга остаётся устойчивой. Для области колебательных режимов такие процессы имеют место при условии, что  $m+b > 0$  или  $b/m > -1$ , т.е. когда точка статического равновесия, обусловленная параметрами  $b$  и  $m$ , лежит правее от прямой  $OB$  (область III). Левее от прямой  $OB$  лежит область расходящегося колебательного процесса – II (самораскачивания). Возмущения со временем усиливаются, дуга отклоняется от квазиустойчивой характеристики и становится неустойчивой. Область IV является действительно областью устойчивости, а область I соответствует расходящимся аperiodическим процессам.

**Характер процессов в системе.** Возвращаясь к

рассмотрению уравнения системы (3) заметим, что система, определяемая исключительно статическими характеристиками всегда будет собственно статически (апериодически) устойчива. В такой системе малые возмущения не приводят к прогрессирующему изменению (сползанию) параметров её режима. Нарушение устойчивости будет в этом случае носить лишь колебательный характер и определяться из условия:  $\theta > -\frac{C}{s_{дф}}$  ( $s_{дф} = 1/R_{дф0}$ ) и только колебатель-

ная устойчивость может иметь самостоятельное прикладное значение.

Применение логарифмических частотных характеристик позволяет внести существенные упрощения при конкретных исследованиях устойчивости. На рис. 3 изображены амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики для рассматриваемой системы.



**Рисунок 3.** Диаграммы Бode:  $L = 0,261 \cdot 10^{-4}$  Гн;  $R_2 = 1,74$  Ом;  $R_1 = -0,49$  Ом;  $R = 1000$  Ом;  $C = 0,3061 \cdot 10^{-4}$  Ф

Вариация элемента автоматической системы приводит к изменению его передаточной функции, а это в свою очередь вызывает изменение ПФ всей автоматической системы, а значит в конечном итоге, и изменение величин, характеризующих её состояние. Для количественного учёта всех этих изменений служат функции чувствительности [11], [12]. Нетрудно видеть, что чувствительность ПФ (1), например, по параметру  $C$  равна

$$S_{\dot{C}}^Z(s) = \frac{\partial Z(s)}{\partial C} \frac{C}{Z(s)} = -\frac{s^2(1+R_1/R_2)LC + sR_1C}{D+E+1+R_1/R_{\text{эКВ}}},$$

$$\text{где } D = s^2(1+R_1/R_2)LC,$$

$$E = s[R_1C + L/R_2 + L(1+R_1/R_2)/R_{\text{эКВ}}].$$

На рис. 4 приведены характеристики  $S_{x_j}^Z(s)$ .

В цепях, содержащих электрическую дугу, как отмечалось выше, возможно возникновение автоколебаний. Первая причина их возникновения – многозначность ВАХ дуги [3]. Её можно исключить, если нагрузочная прямая источника питания будет пересекать ВАХ дуги только в одной режимной точке, т.е. при крутой внешней характеристике источника питания, что соответствует как известно [3], [8], неравенству (критерий собственно статической (апериодической) устойчивости):

$$k_c = R_{дф0} - (\partial U / \partial I)_0 > 0, \quad (9)$$

где  $\partial U / \partial I = R_{дфн}$  – дифференциальное сопротивление источника питания;  $k_c$  – коэффициент сопротивления и по нему можно судить об устойчивости

или в безразмерных переменных  $R_{дфн}^* = (dU/dI)_0 / |R_{дф0}| \ll -1$  ( $R_{дф0} < 0$ ).

Выше показано, что условие (9) заведомо выполняется.

Второе условие принимает вид

$$-R_{дф0}^* < \theta^* \quad (\theta^* = \frac{\theta I_0}{CU_0}).$$

Диаграмма устойчивости показанная на рис. 2 позволяет на этапе проектирования прогнозировать качество функционирования и выбирать соотношения параметров системы для обеспечения устойчивости работы транзисторного преобразователя напряжения.

Заметим, что ответ на вопрос, останется ли процесс хаотическим или установятся периодические субгармонические автоколебания имеет чисто теоретическое значение, поскольку оба этих режима должны быть исключены при расчёте контура.

## V. ВЫВОДЫ

Рассматривая структуру свободного члена (3), можно видеть, что режим рассматриваемой системы всегда апериодически (собственно статически) устойчив, т.е. процесс нарушения, имеющий апериодический характер, отсутствует.

Нарушение устойчивости будет в этом случае носить лишь колебательный характер. Если медленное апериодическое нарушение устойчивости в системе невозможно, то достаточно ограничиться только одним этапом в решении полной задачи устойчивости и тем самым сократить объём вычислений.

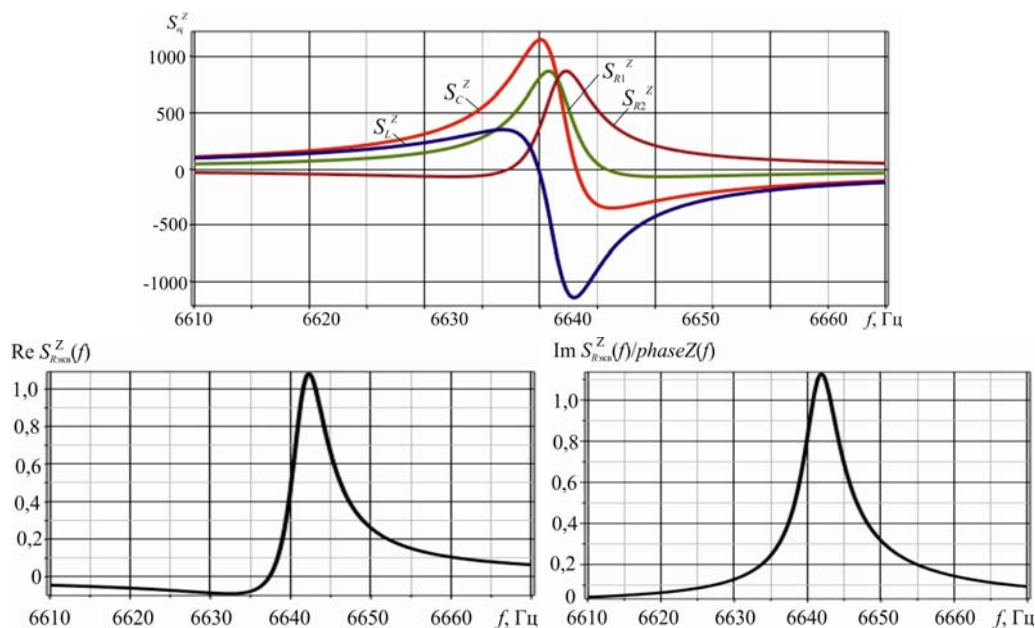


Рисунок 4. Чувствительность передаточной функции к параметрам элементов

Простое дополнение к обычным моделям может значительно улучшить точность и полноценность моделирования управления по току. Это позволяет проектировать источники питания с наивысшими параметрами.

Динамический режим системы «источник питания - дуга» определяется совокупностью значений двух обобщённых параметров:  $b$  (отношением дифференциального сопротивления дуги к сопротивлению дуги постоянному току) и  $m$  (отношением постоянной времени дуги к электромагнитной).

В пространстве обобщённых параметров  $b$  и  $m$  в общем случае существуют четыре характерных области динамических режимов (две колебательных и две аperiodических).

В работе предложен простой способ графической оценки области устойчивости системы «источник питания - дуга».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Верещаго, Е.Н. Квазирезонансные инверторы в устройствах электропитания для воздушно-плазменной резки [Текст] / Е.Н. Верещаго, И.Ф. Фельдшер, В.И. Костюченко // Технічна електродинаміка. - 2007. Ч. 4. С. 8-11.
- [2] Верещаго, Е.Н. Анализ электромагнитных процессов в FB-ZVS-PS DC-DC конвертере с LCC-контурами [Текст] / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко, И.Ф. Фельдшер // Вісник Хмельницького національного університету. - 2007. - № 2. - Т. 1. - С. 225-229.
- [3] Верещаго, Е.Н. Схемотехніка інверторних джерел живлення для дугової навантаження: [учеб. пособие] / Е.Н. Верещаго, В.Ф. Квасницький, Л.Н. Мирошниченко, и др. - Николаев: УГМТУ, 2000. - 283 с.
- [4] Костюк, О.М. Элементы теории устойчивости энергосистем [Текст] / О.М. Костюк. - Киев: Наукова думка, 1983. - 296 с.
- [5] Корсунов, К.А. Анализ динамических условий устойчивости электрической дуги в канале плазмотрона / К.А. Корсунов, Г.С. Калюжный, Е.Ю. Лыштван // Успехи прикладной физики. Москва. 2015. - Т.3. - №3. - С. 250-253.
- [6] Устойчивость горения электрической дуги [Текст]. - Новосибирск: Ин-т теплофизики АН СССР, 1973. - 151 с.
- [7] Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга [Текст] / Г.И. Лесков. - М.: Машиностроение, 1970. - 335 с.
- [8] 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.
- [9] Mayr O. Uber die Stabilitatsgrenze des Schaltlichtbogens. Report of the international symposium on electrical discharges in gases. Delft, 1955, pp. 1-64.
- [10] Heuvel W.M.C. van den. Interruption of small inductive currents in A.C. circuits. - Diss., Eindhoven, 1966. pp. 99-122.
- [11] Vereshchago Y.N., Kostyuchenko V.I. A physical-mathematical model of the power circuit of a plasma torch. Welding International. 2014. Vol. 28. № 2. Pp. 133-139. DOI: 10.1080/09507116.2013.796664
- [12] Vereshchago E.N., Kostyuchenko V.I. A Simulation Model of Electric Arc. Russian Electrical Engineer-

- ing. 2014. Vol. 85. № 6. Pp. 376-381. DOI: 10.3103/S106837121406011X
- [13] Deisch C.W. Simple switching control method changes power converter into a current Source. IEEE Power Electronics Specialist Conf. 1978 Record. – PP. 300-306.
- [14] Ridley R.B. New Small-Signal Model for Current-Mode Control PhD Diss. Virginia Polytechnic Inst. And State Univ. November, 1990. – 325 p.
- [15] Horowitz I.M. Synthesis of Feedback Systems, Academic Press, 1963. – 740 p.
- [16] Wildrick C.M., Lee F.C., Cho B.M., Choi B. A method of defining the load impedance specification for stable distributed power system // IEEE Transactions on power electronics. – 1995. – Vol.10. – №3. – P. 280-284.

Стаття надійшла до редакції 14.10.2019

## АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ І ПЛАЗМОВОЇ ДУГИ

- 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 питань, що стосуються проблеми стійкості системи «джерело живлення - електрична дуга» при малих збуреннях і її вирішення в рамках методу малих коливань. Обговорення вибору математичної моделі, викладення ефективного підходу до вирішення завдань стійкості, основного на використанні для аналітичного опису ланцюгів змінного струму загальних рівнянь квазістаціонарних режимів.

**Методи дослідження.** У методологічному плані стаття базується на відомих класичних положеннях загальної теорії стійкості. В основному розглядається стійкість при малих збуреннях і використовуються методи, які базуються на аналізі диференціальних рівнянь першого (лінійного) наближення, які отримали плідне застосування і розвиток у теорії автоматичного регулювання.

**Отримані результати.** Приклади розв'язання конкретних завдань стійкості в аналітичній, а також в графічній або графоаналітичній формі мають важливе значення в становленні і затвердженні теоретичних положень. На відміну від числових рішень вони більш наочно ілюструють всі характерні сторони проблеми. Зокрема, вони є хорошою ілюстрацією тієї відмінної сторони завдання про аперіодичну стійкість, що його рішення залежить виключно від статичних характеристик елементів системи і може бути отримано в рамках лише кінцевих рівнянь, а в якості критерію стійкості можна використовувати коефіцієнт опору.

**Наукова новизна.** Отримав подальший розвиток відомий метод стосовно нового об'єкту дослідження - перетворювача з м'яким перемиканням, що працює на електричну дугу. Приділено окрему увагу більш чіткій постановці завдання і більш диференційованій оцінці її прийнятності для заданої технічної системи.

**Практична цінність.** У зв'язку з безперервним розвитком окремих систем електроживлення значення проблеми їх стійкої роботи ще більше зростає. Стаття може служити реальною основою для конструктивного вирішення питань загальної теорії стійкості нових джерел живлення технологічних навантажень, сприяти створенню сприятливих умов для подальшого плідного її розвитку, а також для розробки нових ефективних методів вирішення конкретних завдань, що цікавлять фахівців в області систем електроживлення електротехнологічних установок.

**Ключові слова:** стійкість; система електроживлення; електрична дуга; інертність дуги.

## ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEM OF THE WELDING ELECTRIC AND PLASMA ARC

- VERESHCHAKHO YE.M. PhD in technical sciences, associate professor, associate professor of the Marine Instrument Department of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: venmkua@gmail.com;
- KOSTIUCHENKO V.I. PhD in technical sciences, associate professor of the Marine Electric Power Systems Department of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: vikmkua@gmail.com;

**Purpose.** Consideration of issues related to the stability problem of the "power source - electric arc" system with



small disturbances and its solution in the framework of the method of small oscillations. Discussion of the choice of a mathematical model, the presentation of an effective approach to solving stability problems, based on the use of general equations of quasistationary modes for the analytical description of AC circuits.

**Methodology.** In methodological terms, the article is based on the well-known classical principles of the general theory of stability. Basically, stability under small perturbations is considered and methods are used that are based on the analysis of differential equations of the first (linear) approximation, which have received fruitful application and development in the theory of automatic control.

**Findings.** Examples of solving specific problems of stability in analytical, as well as in graphic or graphoanalytic form, are important in the formation and approval of theoretical principles. Unlike numerical solutions, they illustrate more clearly all the characteristic aspects of the problem. In particular, they are a good illustration of the distinctive side of the aperiodic stability problem that its solution depends solely on the static characteristics of the system elements and can be obtained within the framework of only finite equations, and the resistance coefficient can be used as a stability criterion.

**Originality.** The well-known method was further developed in relation to a new object of study - a soft-switching converter operating on an electric arc. Special attention has been paid to a clearer formulation of the problem and a more differentiated assessment of its acceptability for the given technical system.

**Practical value.** In connection with the continuous development of individual power supply systems, the importance of the problem of their sustainable operation is growing even more. The article can serve as a real basis for a constructive solution to the problems of the general theory of stability of new power supplies for technological loads, contribute to the creation of favorable conditions for its further fruitful development, as well as for the development of new effective methods for solving specific problems of interest to specialists in the field of power supply systems of electrotechnological installations.

**Keywords:** stability; power supply system; electric arc; the arc inertia

## REFERENCES

- [1] Vereshhago, E.N., Fel'dsher, I.F., Kostjuchenko, V.I. (2007). Kvazirezonsantnye invertory v ustrojstvah jelektropitanija dlja vozdušno-plazmennoj rezki [Quasiresonant inverters in power-supply devices for air-plasma cutting]. *Technical electrodynamic*. Ch. 4, 8-11.
- [2] Vereshhago, E.N., Fel'dsher, I.F., Kostjuchenko, V.I., (2007). Analiz jelektromagnitnyh processov v FB-ZVS-PS DC-DC konvertore s LCC-konturami [Analysis of electromagnetic processes in FB-ZVS-PS DC-DC converter with LCC circuits]. *Bulletin of Khmelnytsky National University*. 2 (1), 225-229.
- [3] Vereshhago, E.N., Kvasnickij, V.F., Miroshnichenko, L.N., Pentegov, I.V. (2000). Shemotehnika invertornyh istochnikov pitaniya dlja dugovoj nagruzki. Nikolaev: UGMTU, 283.
- [4] Kostjuk, O.M. (1983). Jelementy teorii ustojchivosti jenergosistem. Kiev. Naukova dumka, 296.
- [5] Korsunov, K.A., Kaljuzhnyj, G.S., Lyshtvan, E.Ju. (2015). Analiz dinamicheskij uslovij ustojchivosti jelektricheskij dugi v kanale plazmotrona [Analysis of the dynamic stability conditions of the electric arc in the plasma torch channel]. *Advances in Applied Physics*. Moscow. Ch. 3, 3, 250-253.
- [6] Ustojchivost' gorenija jelektricheskij dugi (1973). Novosibirsk: In-t teplofiziki ANSSR, 151.
- [7] Leskov, G.I. (1970). Jelektricheskaja svarochnaja duga. Moscow. Mashinostroenie, 335.
- [8] Sidorec, V.N., Pentegov, I.V. (2013). Determinirovannyj haos v nelinejnyh cepjah s jelektricheskij dugoj. Kiev. Mezhdunarodnaja asociacija «Svarka», 272.
- [9] Mayr, O. (1955). Uber die Stabilitatsgrenze des Schaltlichtbogens. Report of the international symposium on electrical discharges in gases. Delft, 1-64.
- [10] Heuvel, W.M.C. (1966). Interruption of small inductive currents in A.C. circuits. Diss., Eindhoven, 99-122.
- [11] Vereshhago, 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
- [12] Vereshhago, E.N., Kostyuchenko, V.I. (2014). A Simulation Model of Electric Arc. *Russian Electrical Engineering*. 85, 6, 376-381. DOI: 10.3103/S106837121406011X
- [13] Deisch, C.W. (1978). Switching control method changes power converter into a current source. *IEEE Power Electronics Specialist Conf.*, 300-306.
- [14] Ridley, R.B. (1990). New Small-Signal Model for Current-Mode Control PhD Diss. *Virginia Polytechnic Inst. And State Univ.*, November, 325.
- [15] Horowitz, I.M. (1963). Synthesis of Feedback Systems, Academic Press, 740.
- [16] Wildrick, C.M., Lec, F.C., Cho, B.M., Choi, B., (1995). A method of defining the load impedance specification for stable distributed power system. *IEEE Transactions on power electronics*. 10, 3. 280-284.