

Оценка стабильности электрической дуги в системах питания с дозирующим последовательным резонансным контуром

ПЕТРОСЬЯНЦ В.В.

Во многих электротехнологиях (микродугового оксидирования [1], нанесения покрытий на подложку и т.п.) необходимо использовать электрическую дугу (плазменную струю) с малыми пульсациями и стабильными характеристиками горения при изменении ее сопротивления в динамических режимах работы. В качестве вторичных источников питания в таких электротехнологиях могут использоваться тиристорно-конденсаторные преобразова-

Предложены математические модели преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром ключевого типа с индуктивным накопителем энергии. Определены условия параметрической стабилизации горения электрической дуги в динамических режимах работы. Приведены зависимости параметрической стабилизации и пульсаций электрической дуги от параметров и режимов работы преобразователя.

Ключевые слова: электрическая дуга, преобразователь, математические модели, пульсации, параметрическая стабилизация

тели, наиболее полно исследованные в [2]. Эти же преобразователи в режиме колебательного процесса передачи энергии из источника питания в нагрузку отнесены в [3] к преобразователям с дозирующим последовательным резонансным контуром (ДПРК) ключевого типа. В таких преобразователях (рис. 1,а) элементом, ограничивающим ток электрической дуги, является последовательный резонансный контур $L_k C_k$. Для применения такого контура в качестве токоограничивающего элемента, работающего, как правило, на частотах выше частоты питающей сети, требуется согласование сопротивления электрической дуги и волнового сопротивления ДПРК.

(например при движении в гору на низкой скорости), а также класса сервоприводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник. для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1998.
2. Козаченко В.Ф., Анучин А.С., Жарков А.А., Дроздов А.В. Цифровое векторное управление вентильно-индукторными

С целью обеспечения стабильности и устойчивости процесса горения электрической дуги необходимо определить оптимальные соотношения между параметрами и режимами работы преобразователей с ДПРК ключевого типа и параметрами дуги.

На рис. 1,б приведены графики изменения тока в базовом преобразователе с ДПРК ключевого типа с индуктивным накопителем [4], полученные в результате математического (б) и электронного моде-

Mathematical models of converters containing a switch-type dosing series-resonant circuit with inductive energy storage are proposed. Conditions for parametric stabilization of electric arc in dynamic modes of operation are determined. Dependences of parametric stabilization and pulsations of electric arc on the parameters and operating modes of the converter are given.

Key words: electric arc, converter, series-resonant circuit, mathematical models, pulsations, parametric stabilization

лирования (в) для схемы с заданными параметрами.

Определим условия, при которых преобразователь с ДПРК обеспечивает параметрическую стабилизацию горения электрической дуги.

Ток в нагрузке $I_k^*[n]$ согласно [3] в виде решетчатой функции определится как

$$I_k^*[n+1] = e^{-\frac{U_{VT}[n+1]}{\sqrt{4Q^2-1}} \left| \sin \frac{\rho(n+1)}{2} \right|} \cdot \sqrt{\frac{[4Q - I_k^*[n]]^2 + I_k^{*2}[n](4Q^2-1)}{4Q^2-1}} \left| \sin \frac{\rho(n+1)}{2} \right| + I_k^{*2}[n] \left| \sin \frac{\rho n}{2} \right|$$

двигателями с независимым возбуждением. — Компоненты и технологии, 2004, № 8.

[23.04.12]

Автор: Лашкевич Максим Михайлович окончил в 2009 г. кафедру автоматизированного электропривода Московского энергетического института. Аспирант кафедры. С 2007 г. инженер-программист ООО «НПФ Вектор».

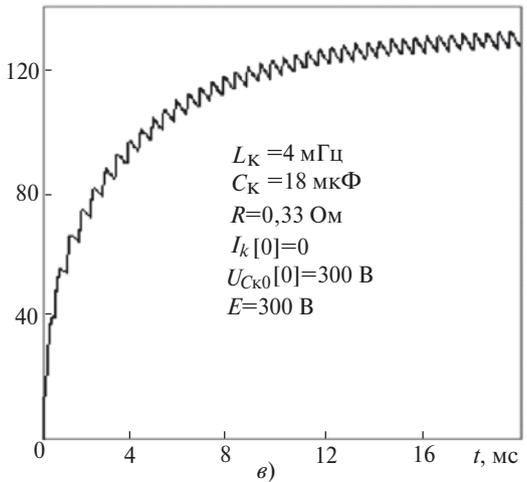
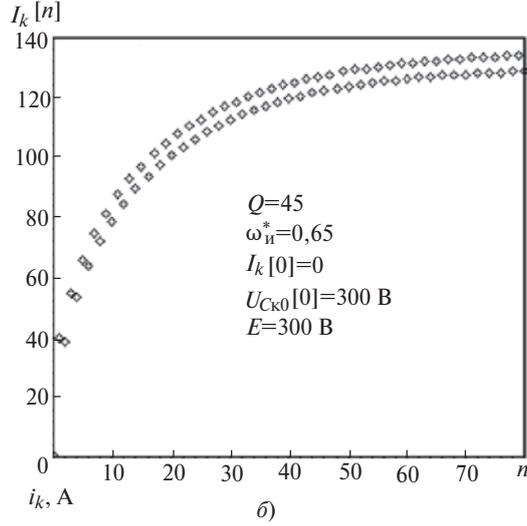
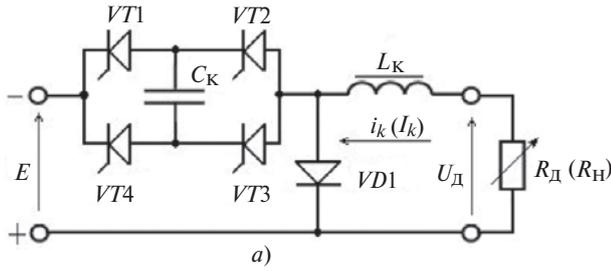


Рис. 1. Базовая схема преобразователя с ДПРК (а), зависимость тока в виде решетчатой функции $I_k[n]$ (б) и в виде мгновенных значений $i_k(t)$ (в)

$$e^{-\frac{2(u_{VT}[n] - \rho w_n^*)}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \left| \sin \frac{\rho n}{2} \right|} \cdot \frac{\sin \frac{\rho(n+1)}{2}}{e^{\arcsin \frac{I_k^*[n] \sqrt{4Q^2 - 1}}{4Q - I_k^*[n]}}}, \quad (1)$$

где $Q = r/R$ – добротность преобразователя; $r = \sqrt{L_K/C_K}$ – волновое сопротивление; $R = R_H + R_{\Pi}$; $R_H = R_D$ – сопротивление нагрузки (дуги); R_{Π} – сопротивление потерь в преобразователе и источнике питания; $Q_{К.З} = Q(1 + K_H)$ – доб-

ротность КЗ; $K_H = R_H / R_{\Pi}$ – коэффициент нагрузки; $U_{Cк0}^* = U_{Cк0} / E$ – начальное напряжение на C_K ; $I_k^*[n] = I_k[n]r / E$; $w_n^* = w_0^* / w_n$ – относительная частота инвертирования; $w_0^* = \sqrt{w_0^2 - d^2}$ – приведенная собственная частота; $w_0 = 1/\sqrt{L_K C_K}$ – собственная резонансная частота; $d = R/2L_K$ – коэффициент затухания в контуре; $u_{VT}[2n+1]$ – время включенного (проводящего) состояния тиристоров, находится из выражения

$$u_{VT}[2n+1] = - \arcsin \frac{\sqrt{4Q^2 - 1}}{Q} / (Q I_0^*[2n] - 1) \quad (2)$$

Действующее значение тока нагрузки на интервале инвертирования $u_n[m]$ ($u_n[m] = u_{VT}[2n+1] + u_{VD}[2n+1]$) в виде решетчатой функции:

$$I_k^*[m] = \sqrt{I_{VT}^{*2}[m] u_{VT}[2n+1] + I_{VD}^{*2}[m] (\rho w_n^* - u_{VT}[2n+1]) / \rho w_n^*}, \quad (3)$$

где ток тиристора

$$I_{VT}^*[m] = \sqrt{I_k^{*2}[2n] + \frac{I_k^*[2n](I_k^*[2n+1] - I_k^*[2n])}{u_{VT}[2n+1]} + \frac{(I_k^*[2n+1] - I_k^*[2n])^2}{3(u_{VT}[2n+1])^2}}, \quad (4)$$

ток диода

$$I_{VD}^*[m] = \sqrt{I_k^{*2}[2n+1] + \frac{I_k^*[2n+1](I_k^*[2n+2] - I_k^*[2n+1])}{(\rho w_n^* - u_{VT}[2n+1])} + \frac{(I_k^*[2n+2] - I_k^*[2n+1])^2}{3(\rho w_n^* - u_{VT}[2n+1])^2}}, \quad (5)$$

$u_{VD}[2n+1]$ – время проводящего состояния диода; $m = 1, 2, \dots$ – номер интервала инвертирования; $n = 0, 1, \dots$ – номер интервала преобразования.

В установившемся (стационарном) режиме работы действующее значение тока, напряжения и мощности на нагрузке:

$$I_k^* = \lim_{m \rightarrow \infty} I_k^*[m]; \quad U_H^* = I_k^* K_H / Q_{К.З}; \quad P_H^* = I_k^{*2} K_H / Q_{К.З}. \quad (6)$$

На рис. 2 приведены зависимости действующих значений тока I_k^* , напряжения U_H^* и мощности P_H^* от

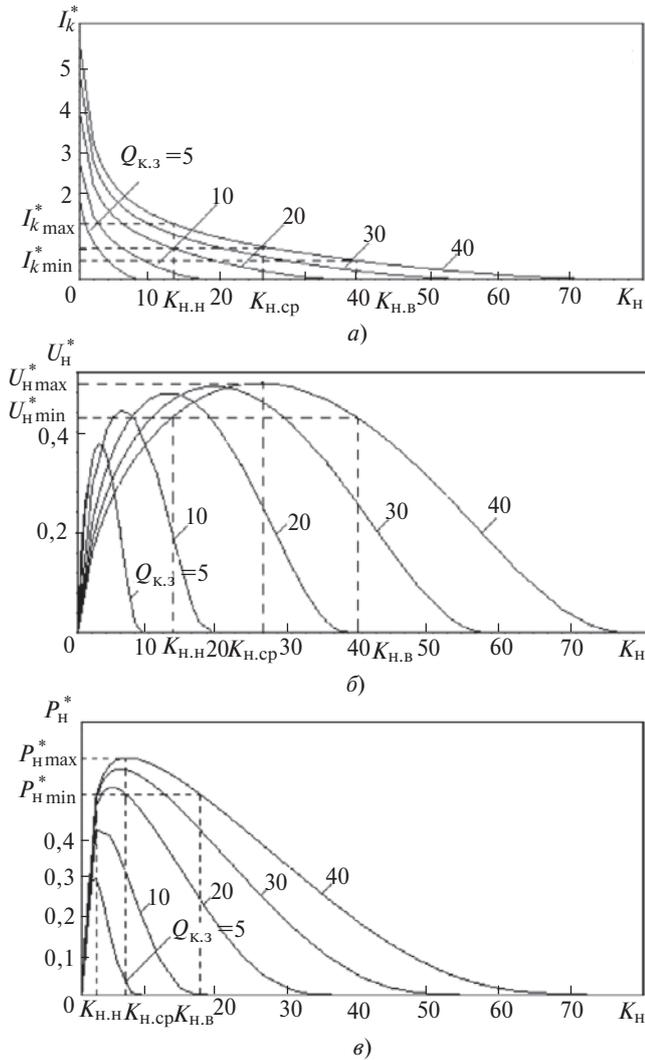


Рис. 2. Зависимости тока I_k^* (а), напряжения U_H^* (б) и мощности P_H^* (в) от коэффициента нагрузки K_H при заданной частоте инвертирования $\omega_{и}^* = 0,8$

коэффициента нагрузки K_H при различных значениях добротности КЗ $Q_{к.з.}$, рассчитанные по формулам (1)–(6).

Из графиков на рис. 2 следует, что напряжение и мощность на электрической дуге достигают максимальных значений при определенной связи между параметрами $Q_{к.з.}$ и K_H . В этом случае при заданной частоте инвертирования $\omega_{и}^*$ изменение сопротивления электрической дуги R_H (K_H), т.е. изменение длины столба дуги, в динамическом режиме работы приводит к незначительному изменению напряжения или мощности. Назовем такой, оптимальный по стабилизации, режим работы режимом параметрической стабилизации.

Для обеспечения режима параметрической стабилизации электрической дуги по напряжению U_H^* (току I_k^*) или по мощности P_H^* при заданной доб-

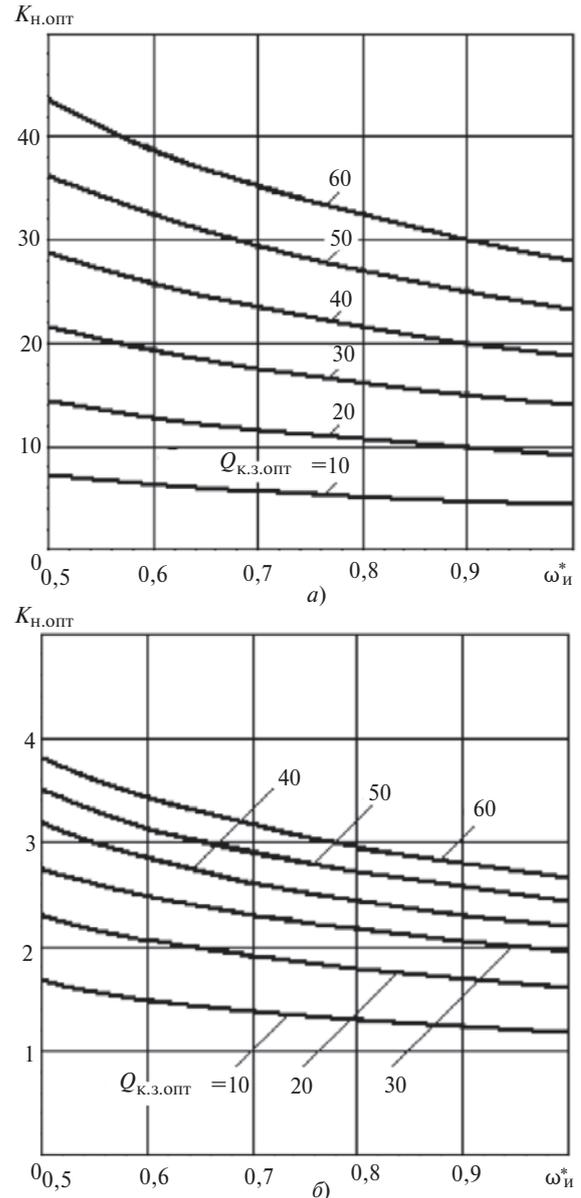


Рис. 3. Оптимальные зависимости между параметрами K_H и $Q_{к.з.}$: а — по напряжению U_H^* (по току I_k^*); б — по мощности P_H^*

ротности КЗ ДПРК $Q_{к.з.}$ необходимо обеспечить определенное соотношение между коэффициентом нагрузки K_H и частотой инвертирования $\omega_{и}^*$, как показано на рис. 3.

Стабильность горения электрической дуги при питании от преобразователя с ДПРК в режиме параметрической стабилизации и стационарном режиме работы оценим по коэффициенту параметрической стабилизации K_S/g_A и коэффициенту пульсаций тока на интервале инвертирования $K_{ДА}$. В оптимальном режиме работы (режим параметрической стабилизации) коэффициент параметрической стабилизации K_S/g_A определим как отношение относительного приращения коэффициента нагрузки K_H (изменения сопротивления дуги R_H в

динамическом режиме горения) к заданному значению относительного изменения тока (напряжения, мощности). Значение K_S/g_A при условии, что сопротивление потерь R_{Π} не зависит от сопротивления дуги R_H ($R_{\Pi} = \text{const}$), равно:

$$K_{S/g_A} = gK_H / g_A, \quad (7)$$

где $gK_H = 2(K_{H.H} - K_{H.B}) / (K_{H.H} + K_{H.B})$ — относительное отклонение коэффициента нагрузки; $K_{H.H}$, $K_{H.B}$ — нижний и верхний пределы диапазона параметрической стабилизации (см. рис. 2); $g_A = 2(A_{\max} - A_{\min}) / (A_{\max} + A_{\min})$ — относительное отклонение стабилизируемого параметра A (I , U , P) от максимального значения в пределах $K_{H.H} < K_{H.ср} < K_{H.B}$.

Эффективность параметрической стабилизации, как следует из формулы (7), тем выше, чем больше значение K_S/g_A .

При заданном сопротивлении электрической дуги R_H и сопротивлении потерь в ДПРК R_{Π} однозначно находится коэффициент нагрузки: $K_H = R_H / R_{\Pi}$. Для обеспечения режима параметрической стабилизации горения дуги в стационарном режиме работы преобразователя с ДПРК необходимо обеспечить добротность КЗ ДПРК $Q_{К.З}$ для выбранной частоты инвертирования $\omega_{и}^*$ и заданного коэффициента нагрузки K_H в соответствии с графиками на рис. 3. Обозначим добротность $Q_{К.З}$, найденную из рис. 3 для режима параметрической стабилизации как $Q_{К.З.опт}$, которой при заданной частоте инвертирования $\omega_{и}^*$ однозначно соответствует $K_{H.опт}$. Таким образом, при известном (заданном) коэффициенте нагрузки K_H однозначно находится волновое сопротивление ДПРК — $\Gamma = Q_{К.З.опт} R_{\Pi}$, обеспечивающее режим параметрической стабилизации горения дуги.

Коэффициент пульсаций K_{DA} в режиме параметрической стабилизации по напряжению (току) и мощности определится по формулам:

$$K_{DU(DI)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\hat{e} \cdot 2(I_k^*[n] - I_k^*[n+1]) \cdot \hat{u}}{\hat{e} \cdot (I_k^*[n] + I_k^*[n+1]) \cdot \hat{u}} \quad (8)$$

$$K_{DP} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\hat{e} \cdot 2(I_k^{*2}[n] - I_k^{*2}[n+1]) \cdot \hat{u}}{\hat{e} \cdot (I_k^{*2}[n] + I_k^{*2}[n+1]) \cdot \hat{u}} \quad (9)$$

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента пульсаций $K_{DU(DI)}$, K_{DP} и коэффициента параметрической стабилизации $K_S/g_A=0,15$ в зависимости от относительной частоты инвертирования $\omega_{и}^*$ для различных значений $Q_{К.З.опт}$ ($K_{H.опт}$) в режимах

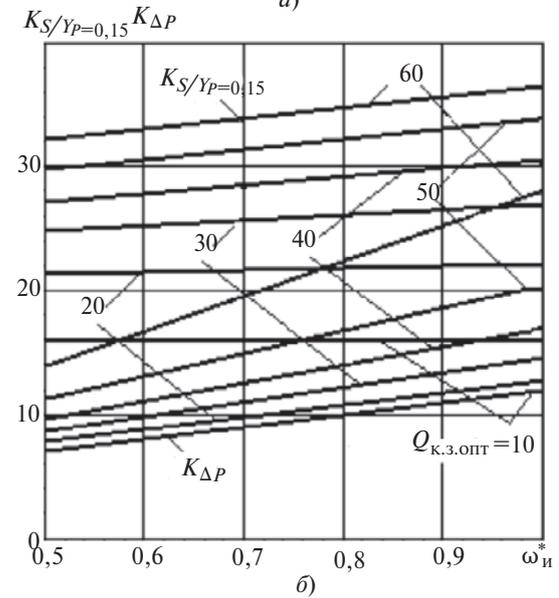
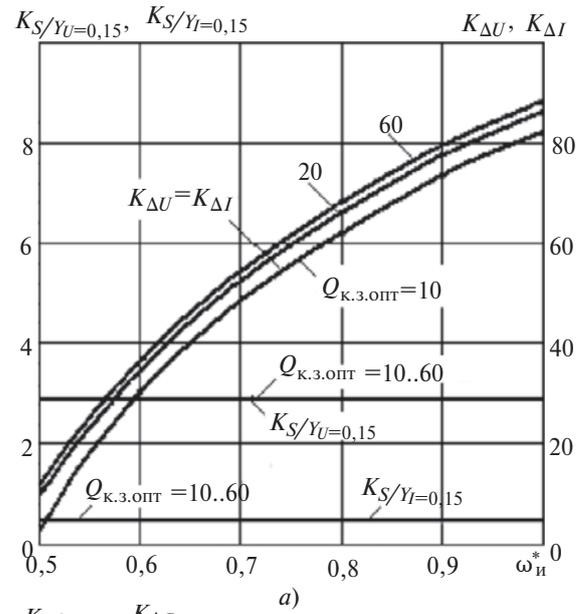


Рис. 4. Зависимости коэффициентов стабилизации $K_S/g_A=0,15$ и пульсаций K_{DA} в режимах параметрической стабилизации: а — по напряжению U_H^* (по току I_k^*); б — по мощности P_H^*

параметрической стабилизации напряжения U_H^* (тока I_k^*) (а) и мощности P_H^* (б) для стационарного режима работы.

Коэффициент пульсации K_{DA} при заданном оптимальном соотношении $Q_{К.З.опт}$ ($K_{H.опт}$) независимо от режима параметрической стабилизации (по напряжению или по мощности) полностью определяется значением $\omega_{и}^*$. В режиме параметрической стабилизации напряжения (тока) или мощности коэффициент пульсаций K_{DA} можно снизить за счет уменьшения частоты инвертирования $\omega_{и}^*$.

В режиме *параметрической стабилизации напряжения* коэффициенты стабилизации по току K_{S/g_I} и напряжению K_{S/g_U} не зависят от параметров электрической дуги ($K_{H,OPT}$), контура преобразования ($Q_{к.з.опт}$) и частоты инвертирования $w_{и}^*$ и, соответственно, равны: $K_{S/g_I=0,15} = 0,5$, $K_{S/g_U=0,15} = 3$.

В режиме *параметрической стабилизации мощности* коэффициент параметрической стабилизации $K_{S/g_A=0,15}$ тем больше, чем больше значение коэффициента нагрузки $K_{H,OPT}$ ($Q_{к.з.опт}$), но практически не зависит от частоты инвертирования $w_{и}^*$.

Приведенные на рис. 3 и 4 зависимости позволяют выбрать параметры и режим работы преобразователя с ДПРК таким образом, чтобы он работал в режиме параметрической стабилизации напряжения (тока) или мощности на нагрузке, а также оценить коэффициент параметрической стабилизации $K_{S/g_A=0,15}$ и коэффициент пульсаций K_{DP} электрической дуги.

Например, определим параметры преобразователя, при которых он будет работать в режиме параметрической стабилизации мощности электрической дуги плазматрона и при этом коэффициент пульсаций K_{DP} не превысит 20%. Предположим, что сопротивление электрической дуги плазматрона в статическом режиме работы $R_H = R_D = 1,5$ Ом, а относительная частота инвертирования $w_{и}^*$ задана и равна 0,6. Выбираем добротность КЗ $Q_{к.з.опт} = 50$. Находим оптимальное значение коэффициента нагрузки $K_{H,OPT} = 3,2$, коэффициента пульсаций $K_{DP} = 13\%$ (рис. 3,б) и коэффициента параметрической стабилизации $K_{S/g_P=0,15} = 31$ (рис. 4,б). Рассчитываем требуемое сопротивление потерь в контуре преобразования ДПРК: $R_{П} = R_H / K_{H} = 1,5/3,2 = 0,47$ Ом, откуда волновое сопротивление ДПРК $r = Q_{к.з.опт} R_{П} = 50 \cdot 0,47 = 24$ Ом.

Выводы. 1. Существует определенная связь между относительными параметрами преобразователя с

ДПРК $Q_{к.з.опт}$ и параметрами электрической дуги $K_{H,OPT}$, при которых обеспечиваются оптимальные условия параметрической стабилизации напряжения (тока) или мощности горения электрической дуги в стационарном режиме работы.

2. Предложенная дискретная математическая модель, основанная на точных описаниях процессов в преобразователе с ДПРК ключевого типа, позволяет определить наилучшие условия параметрической стабилизации электрической дуги при минимальном коэффициенте пульсаций по заданному сопротивлению дуги в рабочем режиме работы.

3. Преобразователь с ДПРК обеспечивает наилучшие показатели параметрической стабилизации мощности электрической дуги по сравнению со стабилизацией по напряжению и току.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко П.С., Руднев В.С. Электрохимическое формирование покрытий на алюминии и его сплавах при потенциалах искрения и пробоя. — Владивосток: Дальнаука, 1999.
2. Булатов О.Г., Царенко А.И. Тиристорно-конденсаторные преобразователи. — М.: Энергоиздат, 1982.
3. Петросьянц В.В. Теория и методики расчета полупроводниковых преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008.
4. Петросьянц В.В. Моделирование процессов в ключевых преобразователях с дозирующим последовательным резонансным контуром и индуктивным накопителем. — Математическое моделирование, 2006, т. 18, № 3.

[01.03.12]

Автор: Петросьянц Виктор Владимирович окончил в 1976 г. факультет радиоэлектроники и приборостроения Дальневосточного политехнического института. В 1984 г. в Московском энергетическом институте защитил кандидатскую диссертацию «Разработка, анализ и экспериментальное исследование преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром и рекуперацией энергии». Профессор кафедры электроники и средств связи инженерной школы Дальневосточного федерального университета, руководитель основной образовательной программы «Приборостроение».

* * *

Уважаемые читатели!

Номера журнала «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» за 2010–2011 гг., а также ксерокопии статей с 1917 г. можно приобрести в редакции журнала

(Москва. Красноказарменная ул. 14, комн. 3-111,
тел. (495) 362-7485)