

УДК 537:621.3

В. М. КУЛЯПИН, Р. Р. БАДАМШИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ И СИСТЕМАХ

Совершенствование электротехнических комплексов и систем зачастую сопровождается широким применением в качестве плазменных источников электронов и ионов различных видов разрядов (дуга, тлеющий разряд, полярный катод и т. д.). Стоит вопрос разработки теории сложных взаимосвязанных процессов термоэлектронной эмиссии и задач нестационарной теплопроводности с фазовыми превращениями и уносом массы испарением. Эти процессы происходят в области катодного падения потенциала, имеющую высокую концентрацию энергии. В настоящей статье изложены результаты исследований взаимосвязанных теплофизических и эмиссионных процессов и определены значения параметров импульсных и стационарных электрических разрядов. Рассматриваются процессы получения паров металлов с помощью электрической дуги. *Электрический разряд; скорость электрической эрозии; электротехнические комплексы и системы*

1. ИМПУЛЬСНЫЕ РАЗРЯДЫ

При подаче сигнала на поджигающий электрод импульсом высокого напряжения пробивается лампа и происходит разряд первоначально заряженной до напряжения E емкости. Все дуги являются короткими и имеют постоянное напряжение дуги, равное U_M .

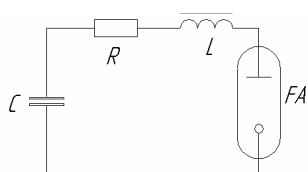


Рис. 1. Эквивалентная схема

Расчетная эквивалентная схема представлена на рис. 1. Схема содержит активное сопротивление R , индуктивность L , которая всегда имеется из-за неизбежных петель в схеме.

Исследуем, как меняются напряжение U на конденсаторе C и ток цепи I за время горения дуги между электродами. Мгновенный заряд на конденсаторе C обозначим Q [4].

Начальные условия таковы: $t = 0$ (момент пробоя лампы) загорается дуга, $U = U_M$ и $I = I_M$ (минимальный ток дуги). Для упрощения полагаем $I_M = 0$. Напряжение на конденсаторе выражается уравнением

$$U = \frac{Q}{C} = L \frac{dI}{dt} + RI + U_M. \quad (1.1)$$

Так как

$$I = -C \frac{dU}{dt}, \quad (1.2)$$

то уравнение (1) можно преобразовать

$$\frac{d^2}{dt^2}(U - U_M) + \frac{R}{L} \frac{d}{dt}(U - U_M) + \frac{1}{CL}(U - U_M) = 0. \quad (1.3)$$

Это уравнение затухающих синусоидальных колебаний. При принятых начальных условиях и обозначениях имеем

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{L}{CR^2}; \gamma_1 = \sqrt{\beta - \frac{1}{4}}; \gamma_2 = \sqrt{\frac{1}{4} - \beta}, \\ \varepsilon &= \frac{R}{2L}; \omega = 2\pi\nu = \sqrt{\frac{1}{CL} - \varepsilon^2} = \frac{R}{L}\gamma_L; \\ m &= \sqrt{\varepsilon^2 - \frac{1}{CL}} = \frac{R}{L}\gamma_2; I_0 = \frac{E - U_M}{R}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где I_0 – начальный ток, который протекал бы через дугу, если бы $L = 0$; t_M – время, при котором ток достигает своего максимума $I = I_M$.

Для периодических колебаний ($\beta > 1/4$)

$$\begin{aligned} U - U_M &= \frac{E - U_M}{\omega\sqrt{CL}} e^{-\varepsilon t} \cos\left(\omega t - \arctg \frac{\varepsilon}{\omega}\right), \\ I &= \frac{E - U_M}{\omega L} e^{-\varepsilon t} \sin \omega t = \frac{I_0}{\gamma_1} e^{-\frac{1}{2\beta} \frac{t}{CR}} \sin \frac{\gamma_1}{\beta} \frac{t}{CR}; \\ I_M &= \frac{I_0}{\sqrt{\beta}} e^{-\frac{\arctg 2\gamma_1}{2\gamma_1} t} \quad \text{для} \quad \frac{t_M}{CR} = \frac{\beta}{\gamma_1} \arctg 2\gamma_1, \end{aligned} \quad (1.5)$$

Таблица 1.1

$C \cdot 10^{-6} \Phi$	$R_{кр}$	$\tau \cdot 10^{-6} \text{ с}$	$R \cdot \tau / 4L$	$I_M, \text{ А}$	$\exp(R / 4L \cdot \tau)$	$Q, \text{ Дж}$
$U = 1,5 \text{ кВ}, L = 52 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, R = 8,32 \text{ Ом}$						
		расчет	эсп.		расчет	эсп.
400	0,36	0,98		- 0,392	281	0,675
200	0,506	0,979		- 0,392	199	0,675
100	0,625	0,978		- 0,392	141	0,675
50	0,72	0,9781		- 0,391	99,5	0,676
25	0,805	0,977		- 0,391	70,4	0,6764
12,5	0,87	0,976		- 0,391	49,8	0,6766
6,25	0,95	0,975		- 0,39	35,2	0,6767
						7,031

Осциллограмма разряда представлена на рис. 2. Результаты расчетов и экспериментов представлены в табл. 1.1. Как видно из осциллограмм, разряд предварительно заряженной емкости сопровождается колебаниями с последующими повторными пробоями промежутка. Результаты расчета процессов с напряжением 3 кВ и емкостью 0,25–400 мкФ хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями при индуктивности контура 52 мкГн.

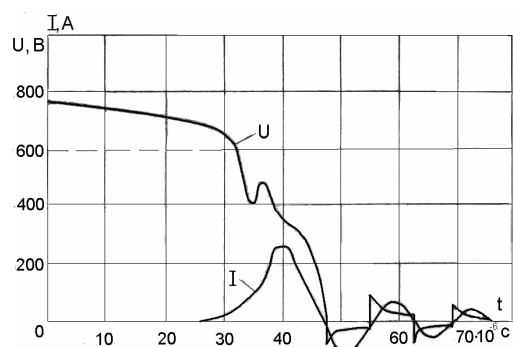


Рис. 2. Осциллограмма разряда

2. ДУГОВЫЕ РАЗРЯДЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Наиболее существенную роль в исследовании электрических разрядов следует отдать катодным процессам по следующим причинам:

- малая область катодного потенциала;
- хорошо разработана теория термоавтоэлектронной эмиссии;
- имеется решение задачи нестационарной теплопроводности с фазовыми превращениями и уносом массы испарением.

Рассмотрены процессы получения паров металла с помощью вакуумной дуги. Источник паров, ионного и электронного тока – катодные процессы.

Среди большого количества методов ионизации наибольшее распространение получили

ионизация атомов щелочных металлов на нагретых поверхностях (контактная ионизация) и ионизация атомов электронным ударом.

Например, поверхностная ионизация на вольфраме возможна для атомов цезия, калия, рубидия, у которых потенциал ионизации меньше работы выхода вольфрама и практически невозможна для других элементов.

Для материалов с высоким потенциалом ионизации используется принцип ионизации электронным ударом. Паровая фаза поступает в камеру и проходит через пространство между термоавтоэмиссионным катодом и анодом. В этой зоне под действием радиального электрического поля движутся свободные электроны, в результате соударений которых с атомами происходит ионизация. Образовавшиеся вторичные электроны разгоняются в поле ионизационной камеры и участвуют в ионизации атомов, а ионы диффундируют в сторону ускоряющего электрода. Поле ускоряющего электрода вытягивает ионы из камеры и ускоряет их в промежутке между катодом и анодом.

Во избежание выхода в ускоряющий промежуток нейтральных атомов давление рабочего тела в камере должно быть низким – порядка 10^{-4} мм рт. ст. (10 Па). Коэффициент ударной ионизации $\beta_i = 0,8–0,85$.

2.1. Скорость электрической эрозии

Проведенные исследования микроскопических процессов в элементарном катодном пятне позволяют рассчитать другие параметры электрических разрядов в вакууме: скорость электрической эрозии и скорость самопроизвольного хаотического перемещения катодных пятен. В основу анализа взяты положения количественной теории катодных процессов.

1. Элементарное катодное пятно неподвижно в течение времени своего существования. Плотность распределения вероятностей продолжительности существования пятна оп-

ределяется функцией $g(\bar{t}_b) = 0,1/\bar{t}_b$ со средним значением $\bar{t}_{bmid} = 0,2$ в относительных единицах или в секундах

$$t_{bmid} = \frac{0,2\lambda(T_0 - T_m)[L_0 + c(T_0 - T_m)]\rho}{q_0^2} \times \left[1 + \frac{L_0 + c(T_0 - T_m)}{L + c(T_m - T)} \right] \quad (2.1)$$

2. Объемный источник резистивного нагрева методом конформных отображений преобразован в поверхностный. Тепловой поток на поверхности $q_0 = q_i - q_e$, плотность тока $j_0 = j_i + j_e$ и температура постоянны по всему сечению катодного пятна.

3. Эрозионный след представляет сферическую лунку. Радиус пятна равен глубине плавления металла в момент распада $r_0 = X(\bar{t}_b)$, при распаде элементарного пятна с катода удаляется весь расплавленный металл.

4. Паровая фаза эродированного вещества определяется объемом шарового сегмента с хордой, равной величине перемещения поверхности испарения катодного пятна к моменту распада $h_b = X_0(\bar{t}_b)$.

5. После распада пятна разряд перемещается в близлежащую точку, находящуюся на расстоянии двух радиусов элементарного катодного пятна.

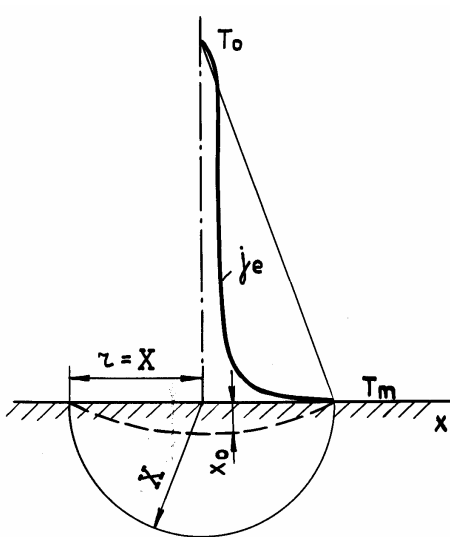


Рис. 3. Пространственное распределение температуры в точке привязки разряда на катоде

При распаде катодных пятен часть металла остается на катоде, поэтому расчетные значения скорости эрозии будут несколько завышены. С другой стороны, пренебрежение влияни-

ем внешних сил на перемещение катодного пятна должно привести к получению заниженных скоростей самопроизвольного перемещения разряда по поверхности катода. Так как внешние условия разряда не учитываются, результаты расчета непосредственно применимы к вакуумным разрядам.

Плотность распределения вероятности радиуса катодного пятна $g(r) = 0,2 / g$, средний радиус равен

$$r_{mid} = \frac{0,7\lambda(T_0 - T_m)}{q_0} \cdot \frac{L_0 + c(T_0 - T_m)}{L + c(T_m - T)} \quad (2.2)$$

Масса металла, удаляемая с электрода при распаде элементарного катодного пятна, равна $\Delta m = 2\pi r^3 / 3 \rho$. В единицу времени происходит $1 / t_b$ актов распада, тогда скорость эрозии катода в г/с равна $m' = 2\pi r^3 / 3 t_b \rho$. Плотность распределения вероятности скорости электрической эрозии $g(m') = 0,2 / m'$.

Среднее значение скорости эрозии

$$m' = 34\pi \frac{q_0^3 \cdot t_{bmid}^2}{\rho^2 [L_0 + L + c(T_0 - T)]^3} \quad (2.3)$$

2.2. Скорость испарения катода

Аналогично выводится соотношение для скорости эрозии катода в паровой фазе. Масса металла, испарившегося с поверхности элементарного катодного пятна за время $t = t_{bmid}$:

$$h_b(t) = \frac{0,2\lambda_1(T_0 - T_m)}{q_0} \left[\frac{L_0 + c(T_0 - T_m)}{L + c(T_m - T)} - 2,5 \right]; \quad (2.4)$$

средняя скорость эрозии катода в паровой фазе равна

$$m'_0 = 13,7\pi \frac{q_0^3 \cdot t_{bmid}^2}{\rho [L + L_0 + c(T_0 - T)]^3} \times \left\{ 1 - \frac{2,5 [L + c(T_m - T)]}{L_0 + c(T_0 - T_m)} \right\} \quad (2.5)$$

Скорость электрической эрозии в жидкой фазе

$$m'_l = 34\pi \frac{q_0^3 \cdot t_{bmid}^2}{\rho^2 [L + L_0 + c(T_0 - T)]^3} \times \left\{ 0,6 + 2,5 \left[\frac{L + c(T_m - T)}{L_0 + c(T_0 - T_m)} \right] \right\} \quad (2.6)$$

Доля паровой фазы в общем количестве эродированного материала составляет

$$\frac{m'_0}{m'} = 0,405 \left\{ 1 - 2,5 \left[\frac{L + c(T_m - T)}{L_0 + c(T_0 - T_m)} \right] \right\}. \quad (2.7)$$

Для различных металлов соотношение между ионной и электронной составляющим тока в катодном пятне изменяется незначительно и находится в пределах $\psi = j_i / j_e = 0,25$. Это позволяет установить соотношение для электрической эрозии в функции количества электричества, перенесенного дугой. Ток на одно катодное пятно определяется уравнением

$$I_p = \pi r^2 j,$$

где $j = j_i + j_e$ – плотность тока в катодном пятне.

Тогда масса эродированного металла на единицу количества электричества равна

$$M' = m' / I_p = 2pr / 3jt_b. \quad (2.8)$$

Вводя выражения для r_{mid} и t_{bmid} , получаем соотношение для средней скорости электрической эрозии на единицу количества электричества (г/к)

$$M' = \frac{2,5q_0}{[L_0 + L + c(T_0 - T)]}.$$

Скорость эрозии в паровой фазе

$$M'_0 = \frac{q_0}{[L_0 + L + c(T_0 - T)]} \times \left\{ 0,8 - 0,5 \left[\frac{L + c(T_m - T)}{L_0 + c(T_0 - T_m)} \right] \right\}. \quad (2.9)$$

Скорость эрозии в жидкой фазе

$$M'_l = \frac{2,5q_0}{[L_0 + L + c(T_0 - T)]} \times \left\{ 0,8 - 0,5 \left[\frac{L + c(T_m - T)}{L_0 + c(T_0 - T_m)} \right] \right\}. \quad (2.10)$$

Из анализа полученных соотношений видно, что электрическая эрозия носит тепловой характер и определяется величиной энергии, передаваемой разрядом металлу. Основным источником энергии является энергия бомбардировки катода ионным током. Как следует из решения уравнения баланса энергии, на теплофизические процессы расходуется лишь часть энергии, поступающей на катод при бомбардировке поверхности ионным током $j_i U_k$. Примерно половина энергии отводится термоэмиссией электронов, так что отношение q_0 / j находится в пределах 1,05–3,35.

2.3. Эрозионные ряды

Учитывая, что соотношение между тепловым потоком в электроде ($q_i - q_e$) и плотностью тока изменяется в ограниченных пределах, можно скорость эрозии определять на единицу количества электричества. Скорость эрозии обратно пропорциональна сумме приращения энтропий фазовых превращений и затрат энергии на нагрев металла до температуры T_0 . При проведении расчетов можно принять за температуру T_0 температуру кипения металла. Расчетные эрозионные ряды для металлов периодической системы представлены в табл. 2.1–2.3, где указаны относительные коэффициенты объемной скорости эрозии (см³/Кл), скорости эрозии в единицу времени (см³/с) и массовой скорости эрозии (г/с). При построении полного эрозионного ряда отношение воздействующего теплового потока к плотности тока принято постоянным и равным $q_0 / j = 1,8$.

Уравнения устанавливают общие соотношения в функции теплофизических постоянных материала катода и позволяют непосредственно рассчитать скорость электрической эрозии. В табл. 2.4 приведены расчетные и экспериментальные значения скорости эрозии в вакууме. Величины q_0 и t_{bmid} взяты из расчета баланса энергии на катоде. Соответствие рассчитанных и экспериментальных значений скорости эрозии удовлетворительное.

Расчет скорости эрозии по формулам (2.3) и (2.6) затруднителен, так как для определения q_0 и t_{bmid} необходимо решить уравнение теплового баланса на катоде. Кроме того, незначительные ошибки в определении плотности теплового потока и длительности существования катодного пятна приводят к большим ошибкам в определении скорости эрозии. Однако выражение (2.6) можно использовать для оценки эрозионной стойкости различных материалов в данных условиях разряда на основании экспериментов для одного металла. Например, для меди экспериментальное значение $m'_{Cu} = 0,165$ г/с.

Из уравнения (2.6) имеем:

$$\begin{aligned} q_0^3 \cdot t_{bmid} &= \\ &= \frac{m'_{Cu} \rho^2 [L_0 + L + c(T_0 - T)]^3}{34\pi} = \\ &= 2 \cdot 10^{10} \left[\frac{\text{Вт}^3 \times \text{с}^2}{\text{см}^6} \right]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Таблица 2.1

Расчетные значения скорости электрической эрозии см³/Кл

Металл	Cs	Rb	K	Li	Hg	Na	Bi	Ba	Pb	Te	Li
10 ⁻⁴ см ³ /Кл	33,5	31,7	23,7	15,8	14,78	10,1	4,9	4,9	4,3	4,1	4,07
Металл	Tl	Sr	Cd	Mg	Sb	In	Zn	Sn	Al	Ag	Mn
10 ⁻⁴ см ³ /Кл	4,05	4,0	3,95	3,95	3,8	3,0	3,0	2,97	1,82	1,81	1,32
Металл	Ge	Au	U	Ga	C	Zr	B	Cu	Ti	Cr	Be
10 ⁻⁴ см ³ /Кл	1,23	1,13	1,11	1,1	0,95	0,93	0,92	0,92	0,88	0,84	0,83
Металл	V	Fe	Pt	Hf	Co	Ni	Nb	Ta	Mo	Re	W
10 ⁻⁴ см ³ /Кл	0,8	0,77	0,76	0,706	0,65	0,61	0,61	0,57	0,55	0,53	0,41

Таблица 2.2

Расчетная скорость электрической эрозии, см³/с

Металл	Cs	Rb	K	Hg	Na	Bi	Pb	Te	Li
см ³ /с	1,35·10 ³	765	319	231	24,2	2,72	1,675	1,64	1,6
Металл	Cd	In	Zn	Mg	Sn	Tl	Ga	Al	Ag
см ³ /с	1,456	0,645	0,645	0,63	0,183	0,156	0,151	0,102	0,1
Металл	Mn	Au	Zr	Cu	B	Ti	Cr	Be	Fe
см ³ /с	0,055	0,034	0,019	0,018	0,017	0,016	0,014	0,013	0,01
Металл	Pt	Ni	V	Co	Mo	Nb	Ta	Re	W
см ³ /с	0,01	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,0035	0,0017

Таблица 2.3

Расчетная скорость эрозии, г/с

Металл	Hg	Cs	Rb	K	Bi	Na	Pb	Tl	Cd
г/с	3,16·10 ³	2,52·10 ³	1,17·10 ³	278	26,6	23,5	19	18,5	12,6
Металл	Te	Li	In	Zn	Sn	Mg	Ag	Ga	Au
г/с	10,2	5,26	4,69	4,6	1,34	1,09	1,05	0,901	0,658
Металл	Mn	Al	Pt	Cu	Zr	Cr	Ni	Fe	Ti
г/с	0,396	0,274	0,228	0,165	0,123	0,102	0,083	0,083	0,074
Металл	Re	Ta	Co	V	Nb	Mo	B	W	Be
г/с	0,073	0,065	0,063	0,049	0,046	0,041	0,033	0,031	0,025

Таблица 2.4

Металл	$\rho \cdot 10^6$	$L_0 + L + c(T_0 - T)$	$q \cdot 10^{10}$	$t_{b \text{ mid}} \cdot 10^{-5}$	$m \cdot 10^{-3}$, г/с	
	кг/м ³	кДж/кг	Вт/м ²	с	Расчет	Экспер.
Ag	10,5	2665	3,4	1,96	770	–
Cu	8,9	5390	1,03	5,36	270	165
Fe	7,8	7510	2,41	2,7	42	48
Ni	7,8	8280	3,22	0,94	75	75

Таблица 2.5

Сравнение расчета с экспериментом

Металл	$m' \cdot 10^{-3}$, г/с	
	Расчет	Эксперимент
Молибден	22,1	21
Ниобий	25,4	30
Железо	42	48
Никель	41,5	75

Тогда для различных металлов скорость электрической эрозии в данных условиях ряда равна:

$$m' = 34\pi \frac{2 \cdot 10^{10}}{\rho^2 [L_0 + L + c(T_0 - T)]^3}. \quad (2.12)$$

Результаты расчета по уравнению (12) и экспериментальные значения скорости эрозии в вакууме приведены в табл. 2.5.

Из табл. 2.5 видно, что соответствие расчета и эксперимента удовлетворительное. Как следует из уравнений (2.3–2.4), масса металла, эродированного на единицу количества электричества, пропорциональна величине воздействующего теплового потока и обратно пропорциональна приращению энтальпии фазовых превращений. Известно, что основная масса металла эродирует в жидкой фазе, а определяющим параметром в уравнении является скрытая теплота парообразования. Кажущееся противоречие объясняется тем, что и расплавленная зона металла определяется энергией поверхностного источника, которая распределяется пропорционально теплофизическим постоянным материала. Большая часть энергии идет на испарение, а остальная расходуется на плавление металла и теплопередачу в электрод.

В табл. 2.6 приведены результаты расчета по (2.8) и экспериментальные значения скорости эрозии в вакууме. Для Ag, Cu, Fe значения j , q_0 взяты из расчета. Уравнения позволяют проводить расчет скорости электрической эро-

зии различных металлов без определения плотности теплового потока и плотности тока в катодном пятне.

Как видно из результатов сравнения, соответствие расчета и экспериментов удовлетворительное, лишь для серебра расчетное значение превышает экспериментальное значение скорости эрозии. В зависимости от внешних условий сильно изменяется и скорость электрической эрозии.

Таблица 2.6

Сравнение расчета и эксперимента

Металл	$M \cdot 10^{-4}$, г/к			
	Расчет	Эксперимент		Среднее
		Максимум	Минимум	
Олово	10	12	5,3	8
Алюминий	4,4	11	5,0	9,5
Серебро	15,2	6,0	4,2	5,0
Медь	4,8	6,7	1,3	3,0
Железо	4,5	6,0	1,8	3,0
Титан	4,0	3,5	0,9	2,1
Молибден	5,8	2,7	1,5	2,0
Вольфрам	7,9	5,3	1,2	3,6

Как видно из приведенных результатов экспериментов, снижение давления приводит к значительному увеличению скорости эрозии. При снижении давления до 10^{-4} Па скорость электрической эрозии увеличивается в 14 раз, доля паровой фазы возрастает до 35%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что неустойчивость катодных процессов определяется микропроцес-

сами в элементарном катодном пятне, перегревом и распадом точки привязки разряда.

2. Определены мгновенные и средние значения параметров области катодного падения потенциала: скорости электрической эрозии, скорости самопроизвольного перемещения разряда, частоты колебаний потенциала.

3. Рассчитаны эрозионные ряды для сорока четырех элементов периодической таблицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Месяц Г. А.** Электронная эмиссия из сегнетоэлектрических плазменных катодов // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 1. С.86–108.

2. **Месяц Г. А., Яландин М. И.** Пикосекундная электроника больших мощностей // УФН. 2005. Т. 175, № 2. С. 225–245.

3. **Куляпин В. М.** Теоретические основы проектирования электрических систем зажигания: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1985. 92 с.

4. **Хольм Р.** Электрические контакты. М.: Иностранная литература, 1961. 464 с.

ОБ АВТОРАХ



Куляпин Владислав Максимилианович, проф., каф. электрооборуд. ЛА. Дипл. инж.-электромех. (Новосиб. электротехн. ин-т, 1958). Д-р техн. наук по эл-там и уст-вам систем упр-я (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. систем упр-я с электр. разрядами.



Бадамшин Руслан Раилевич, дипл. магистр техники и технологии по электротехн., электромех. и электротехнологиям (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. систем упр-я с электр. разрядами.