

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ И ИНДУКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Проведено аналіз методів енергоефективного регулювання режимів технологічних систем обробки металів, зокрема установок об'ємного електроіскрового диспергування металевих гранул у рідині та двоіндукторних магнітодинамічних установок. Розвинено теорію перехідних процесів у колах заряду й розряду конденсаторів електроімпульсних установок у частині застосування цілеспрямованої зміни умов заряду й розряду та розробки рекомендацій щодо підвищення енергетичних характеристик таких кіл і зменшення тривалості імпульсних струмів у навантаженні й перехідних процесів у розрядному колі. Створено нові методи й засоби одержання субмікронних і наноструктурних іскроерозійних частинок.

Проведен анализ методов энергоэффективного регулирования режимов технологических систем обработки металлов, в частности установок объемного электроискрового диспергирования металлических гранул в жидкости и двухиндукторных магнитодинамических установок. Развита теория переходных процессов в цепях заряда и разряда конденсаторов электроимпульсных установок в части применения целенаправленного изменения условий заряда и разряда и разработки рекомендаций по повышению энергетических характеристик таких цепей и уменьшению длительности импульсных токов в нагрузке и переходных процессов в разрядной цепи. Созданы новые методы и средства получения субмикронных и наноструктурных искроэрозионных частиц.

Введение. Наиболее прогрессивными подходами при решении проблемы энергосбережения в электротехнологических системах является разработка таких методов и средств энергоэффективного регулирования их режимов, которые направлены в первую очередь на повышение эффективности процессов преобразования электрической энергии в другие виды энергии непосредственно в технологической нагрузке и получение продукции с более высокими эксплуатационными характеристиками [1–4]. Важным является также уменьшение потерь электроэнергии при преобразовании и стабилизации параметров электрической энергии для реализации необходимых законов и диапазонов регулирования как электрических, так и технологических режимов. Поэтому эффективность новых электротехнологий во многом определяется результатами исследований прямых и обратных зависимостей между электрическими и технологическими параметрами [5–7], выявлением электрофизических закономерностей изменения электротехнологических режимов и возможностью разработки быстродействующих методов их регулирования с учетом выявленных закономерностей [8].

В системах объемного электроискрового диспергирования металлов (ОЭИД) в жидкости эффективным является использование выявленной зависимости электрического сопротивления электроискровой нагрузки от величины и длительности протекаемого в ней разрядного тока [6, 8]. Если разряд на нагрузку конденсатора является колебательным и он частично перезарядается, то в системе реализуют отрицательную обратную зависимость напряжения последующего заряда конденсатора от напряжения его перезаряда, а если разряд является аperiodическим – то положительную. По сути, в таких системах реализуют быстродействующее регулирование и параметрическую стабилизацию электротехнологических режимов [9]. В то же время неполный разряд конденсатора на нагрузку вызывает необходимость проведения достаточно сложного анализа переходных процессов в его цепях с учетом возможных случайных скачкообразных увеличений электрического сопротивления нагрузки [6, 9]. При этом неизменно возникает и задача определения энергоэффективных режимов заряда конденсаторов при ненулевых начальных напряжениях [9, 10].

При разработке методов стабилизации процессов электроимпульсной и индукционной обработки металлов необходимо учитывать электрофизические закономерности влияния на них вторичных электрофизических процессов [11], высокочастотной электровибрации техно-

логического аппарата (используемой для получения ультрадисперсных электроэрозионных частиц и коллоидных растворов [12–15]), а также влияния параметров питающих напряжений на режимные характеристики магнитодинамических установок [7].

Поэтому целью данной работы была разработка энергоэффективных методов и средств быстродействующего регулирования и стабилизации режимов технологических систем электроимпульсной и индукционной обработки металлов на основании параметрического изменения условий переходных процессов, а также создание электрооборудования для реализации прогрессивных технологий обработки токопроводящих материалов и сред.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- развить теорию переходных процессов в цепях электроимпульсных установок в части анализа влияния изменения начальных и конечных условий таких процессов, а также импульсного увеличения сопротивления нагрузки на энергоэффективность таких установок;
- разработать критерии оценки энергетических характеристик апериодического и колебательного зарядов конденсаторов от формирователя постоянного напряжения при изменении начального напряжения на конденсаторе;
- установить закономерности изменения КПД, дозы энергии, поступающей в конденсатор, и напряжения его заряда при изменении начальных условий переходного процесса;
- исследовать процессы разряда конденсатора на нагрузку при скачкообразном изменении ее сопротивления на временных интервалах, близких к окончанию разряда;
- определить условия регулирования отрицательной и положительной обратных связей напряжения заряда конденсатора от характера его разряда в предыдущем цикле;
- разработать рекомендации по определению энергетически целесообразного временного интервала для шунтирования тиристорным коммутатором электроискровой нагрузки с целью стабилизации длительности в ней импульсных токов;
- исследовать влияние электрических параметров разрядных импульсов и технологических условий процесса ОЭИД на дисперсность получаемых искроэрозионных частиц;
- создать электротехнические системы, обеспечивающие необходимые параметры разрядных импульсов за счет реализации разработанных методов и алгоритмов.

Влияние начальных напряжений на конденсаторе на энергетические характеристики при апериодическом заряде. Энергетические процессы в цепях заряда конденсатора емкостью C от формирователя постоянного напряжения (ФПН) $U_{ФПН}$ через резистор R и индуктивность L в большинстве публикаций анализируются при нулевых начальных условиях $U_C(t=0)=0$ и $i(t=0)=0$ [16–18]. При таких условиях коэффициент полезного действия (КПД) апериодического заряда (определяемый как отношение дозы электрической энергии W_C , поступающей в конденсатор, к энергии $W_{ФПН}$, отбираемой от ФПН за все время заряда конденсатора) $\eta_a = 0,5$ при любых значениях линейных элементов цепи R , L и C . В работе [17] показано, что и при колебательном заряде КПД $\eta_k = 0,5$ при любых линейных R , L и C . Но в публикациях [9,10] уточнено, что при наличии в зарядной цепи вентильных элементов КПД заряда конденсатора может существенно повышаться, особенно при ненулевых начальных напряжениях.

На рис. 1 представлена схема формирователя разрядных импульсов (ФРИ) с промежуточным конденсатором емкостью C , который апериодически заряжается от ФПН при изменении начальных на нем напряжений в диапазоне $-U_{ФПН} < U_{0C} < U_{ФПН}$. Начальные и конечные условия по току были нулевыми $i(t=0)=i(t=\infty)=0$. Принималось, что тиристор VT является идеальным коммутатором, который мгновенно отключается при токе, меньшем тока удержания тиристо-

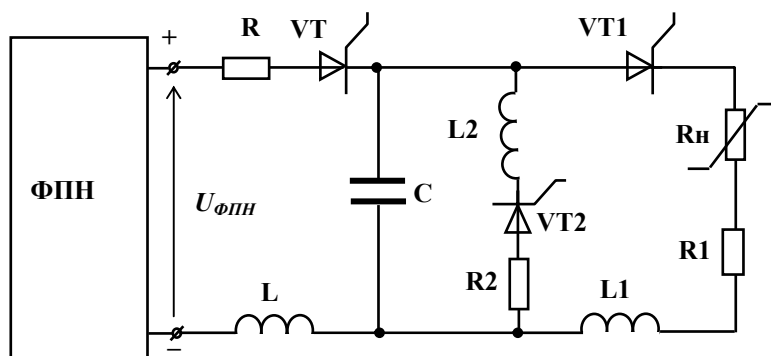


Рис. 1

ров типа ТБ353-10 $i_{y0}=0,5A$, и в зарядной цепи выполняется условие $\sqrt{L}/(\sqrt{CR})=Q \leq 0,5$, где Q – добротность цепи.

При $U_{0C} \neq 0$ для напряжения на конденсаторе и тока в цепи верны уравнения [9,10]

$$u_c(t) = U_{\Phi ПН} + \frac{(U_{\Phi ПН} - U_{0C})}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}); \quad (1)$$

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} = \frac{C(U_{\Phi ПН} - U_{0C})}{p_1 - p_2} p_1 p_2 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (2)$$

где $p_{1,2} = -R/2L \pm \sqrt{R^2/4L^2 - 1/LC}$.

Были введены характеристики: доза энергии, отбираемая от ФПН:

$$W_{\Phi ПН} = C U_{\Phi ПН} (U_{\Phi ПН} - U_{0C}); \quad (3)$$

- доза энергии, поступающая в конденсатор, за время его заряда:

$$W_C = \frac{CU_{\Phi ПН}^2}{2} - \frac{CU_{0C}^2}{2} = \frac{C(U_{\Phi ПН}^2 - U_{0C}^2)}{2}; \quad (4)$$

- энергия потерь в зарядной цепи: $W_{потерь} = W_{\Phi ПН} - W_C = \frac{C}{2}(U_{\Phi ПН} - U_{0C})^2$;

- КПД заряда конденсатора $\eta = \frac{W_C}{W_{\Phi ПН}} = \frac{U_{\Phi ПН} + U_{0C}}{2U_{\Phi ПН}}$.

На рис. 2 показаны зависимости этих характеристик (приведенных к величине $W_{0\Phi ПН} = CU_{\Phi ПН}^2$) от начального напряжения на конденсаторе (приведенного к значению $U_{\Phi ПН}$).

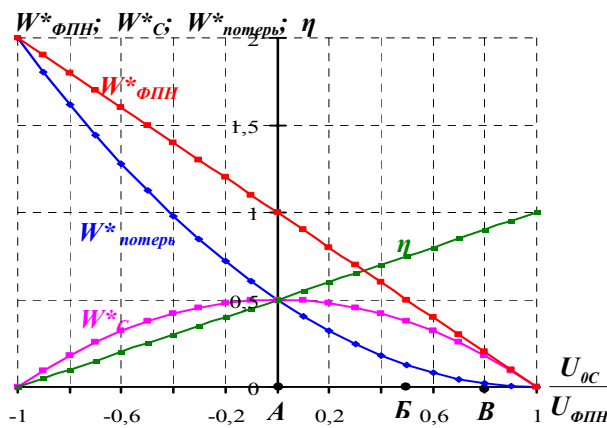


Рис. 2

Таблица 1

$\frac{U_{0C}}{U_{\Phi ПН}}$	0	0,5	0,8
$W_{потерь}^*$	0,5	0,125	0,02
W_C^*	0,5	0,375	0,18
КПД, η	0,5	0,75	0,9
$W_{\Phi ПН}^*$	1	0,5	0,2

В табл. 1 приведены дозы энергии, поступающие в конденсатор; энергия потерь в цепи; дозы энергии, отбираемые от ФПН, и КПД при наиболее характерных значениях начальных напряжений U_{0C} на конденсаторе.

Влияние начальных напряжений на конденсаторе на энергетические характеристики при колебательном заряде. Изменения напряжений колебательного заряда конденсатора, тока и энергетических характеристик зарядной цепи при разных начальных напряжениях на конденсаторе представлены выражениями (5)...(9):

$$u_c(t) = U_{\Phi ПН} - (U_{\Phi ПН} - U_{0C}) \cdot e^{\frac{-\omega_0 t}{2Q}} \cdot \left(\frac{1}{2Q\sqrt{1-1/4Q^2}} \sin \omega_0 \sqrt{1-1/4Q^2} t + \cos \omega_0 \sqrt{1-1/4Q^2} t \right); \quad (5)$$

$$i(t) = \frac{(U_{\Phi ПН} - U_{0C})}{L \omega_0 \sqrt{1-1/4Q^2}} e^{\frac{-\omega_0 t}{2Q}} \cdot \sin \omega_0 \sqrt{1-1/4Q^2} t, \quad (6)$$

где $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$; $Q = \sqrt{L/C}/R$.

Были определены энергетические характеристики зарядной цепи за время заряда конденсатора до момента отключения тока тиристорным коммутатором ($t = t_{U_{\max}} = \pi/\omega_0$):

$$W_{\text{ФПН}} = CU_{\text{ФПН}}(U_{\text{ФПН}} - U_{0C}) \left(1 + e^{\frac{-\pi}{2Q}} \right); \quad (7)$$

$$W_C = \frac{CU_{\text{ФПН}}^2}{2} \left\{ \left[1 + \left(1 - \frac{U_{0C}}{U_{\text{ФПН}}} \right) e^{\frac{-\pi}{2Q}} \right]^2 - \frac{U_{0C}^2}{U_{\text{ФПН}}^2} \right\}; \quad (8)$$

$$\eta = \frac{W_C}{W_{\text{ФПН}}} = \left[1 + \left(1 - \frac{U_{0C}}{U_{\text{ФПН}}} \right) \cdot e^{\frac{-\pi}{2Q}} \right]^2 - \frac{U_{0C}^2}{U_{\text{ФПН}}^2} \Bigg/ 2 \left(1 - \frac{U_{0C}}{U_{\text{ФПН}}} \right) \left(1 + e^{\frac{-\pi}{2Q}} \right). \quad (9)$$

На рис. 3 показаны зависимости этих энергетических характеристик (приведенных к $CU_{\text{ФПН}}^2$) от $U_{0C}/U_{\text{ФПН}}$ при $Q = 2$ и $Q = 20$.

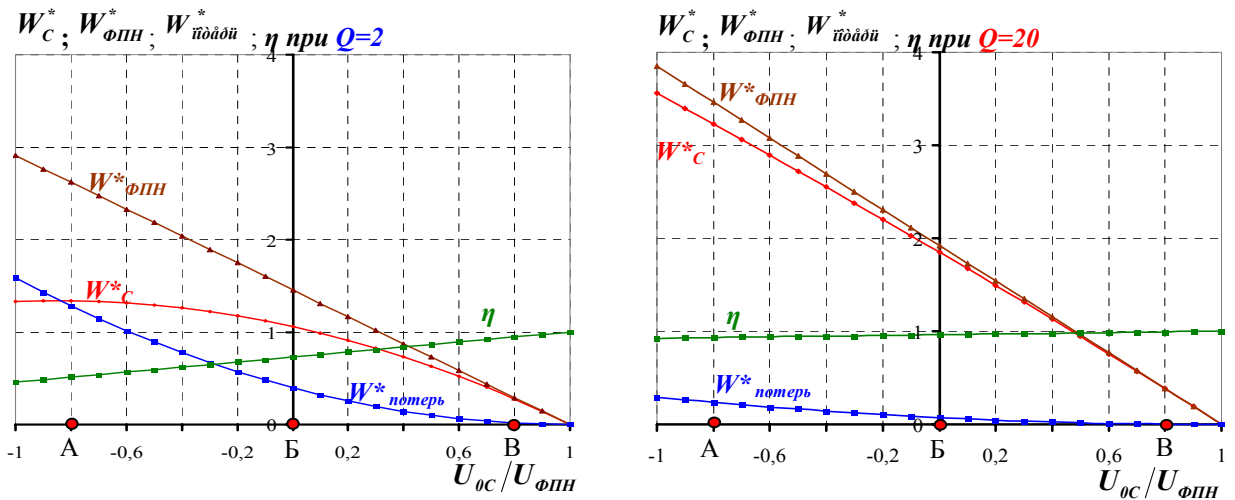


Рис. 3

Таблица 2

	$Q_1=2$			$Q_5=20$		
	A	Б	В	A	Б	В
$U_{0C}/U_{\text{ФПН}}$	-0,8	0	+0,8	-0,8	0	+0,8
W_C^*	1,34	1,06	0,28	3,23	1,85	0,382
$W_{\text{ФПН}}^*$	1,28	0,4	0,02	0,24	0,07	0,003
$W_{\text{ФПН}}^*$	2,62	1,46	0,3	3,47	1,92	0,385
η	0,51	0,73	0,95	0,93	0,96	0,99

Результаты анализа изменения дозы энергии, поступающей в конденсатор, энергии потерь в цепи, дозы энергии, отбираемой от ФПН и КПД в зависимости от изменения начального напряжения U_{0C} на конденсаторе при его колебательном заряде, приведены в табл. 2. На рис. 4 показаны зависимости $U_{\text{Сmax}}^*/U_{\text{ФПН}}$ от $U_{0C}/U_{\text{ФПН}}$ при $Q_1 = 2; 5; 30$, определяемые из формулы

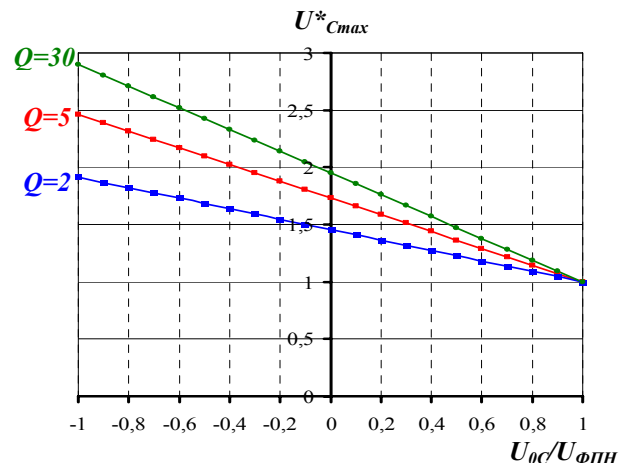


Рис. 4

$$U_{C_{max}} = U_{ФПН} + (U_{ФПН} - U_{0C}) \cdot \exp(-\pi/2Q) . \quad (10)$$

Таким образом, КПД η апериодического и колебательного зарядов конденсатора от ФПН увеличивается пропорционально увеличению начального напряжения на конденсаторе U_{0C} . При увеличении напряжения U_{0C} в диапазоне от 0 до $+U_{ФПН}$ и апериодическом заряде конденсатора отношение W_C^* к $W_{потерь}^*$ возрастает. При колебательном заряде конденсатора отношение W_C^* к $W_{потерь}^*$ возрастает при увеличении напряжения U_{0C} в диапазоне от $-U_{ФПН}$ до $+U_{ФПН}$, причем чем выше добротность Q зарядной цепи, тем больше это возрастание. Таким образом, для цепей с высокой добротностью ($Q > 10$) КПД велико ($\eta > 0,9$) на всем интервале изменения U_{0C} , а использование отрицательных начальных напряжений на конденсаторе позволяет повысить напряжение его заряда до значений $U_{C_{max}}^* > 2U_{ФПН}$.

Энергетические процессы в цепях разряда конденсатора. Известно, что в электроискровой нагрузке к окончанию разрядного тока возможно скачкообразное увеличение в несколько раз электрического сопротивления нагрузки [8, 9], вызывающее новый переходной процесс при ненулевых напряжении на конденсаторе и токе в индуктивности цепи. Для такого случая в работе получены выражения для напряжения на конденсаторе и тока в цепи:

– при апериодическом разряде конденсатора ($Q_1 < 0,5$):

$$u_C = \frac{e^{-\frac{R}{2L_1}t}}{2Ca} \cdot \left[e^{at} \cdot \left(U_0 C \left(a + \frac{R}{2L_1} \right) - I_0 \right) + e^{-at} \cdot \left(U_0 C \left(a - \frac{R}{2L_1} \right) + I_0 \right) \right], \quad (11)$$

$$i_1 = \frac{e^{-\frac{R}{2L_1}t}}{2a} \cdot \left[e^{at} \cdot \left(\frac{U_0}{L_1} + \left(\frac{R}{2L_1} - a \right) I_0 \right) + e^{-at} \cdot \left(-\frac{U_0}{L_1} + \left(a + \frac{R}{2L_1} \right) I_0 \right) \right], \quad (12)$$

где $a = \sqrt{\frac{R^2}{4L_1^2} - \frac{1}{L_1 C}}$;

– при критическом (предельном) апериодическом разряде ($Q_1 = 0,5$):

$$u_C = e^{-\frac{R}{2L_1}t} \left(U_0 - t \cdot \left(\frac{I_0}{C} - \frac{U_0 R}{2L_1} \right) \right), \quad (13)$$

$$i_1 = -C e^{-\frac{R}{2L_1}t} \left(-\frac{U_0 R}{2L_1} - \left(\frac{I_0}{C} - \frac{U_0 R}{2L_1} \right) \left(1 - t \frac{R}{2L_1} \right) \right); \quad (14)$$

– при колебательном разряде ($Q_1 > 0,5$):

$$u_C = e^{-\frac{R}{2L_1}t} \left[\frac{1}{b} \left(\frac{U_0 R}{2L_1} - \frac{I_0}{C} \right) \sin(b \cdot t) + U_0 \cos(b \cdot t) \right], \quad (15)$$

$$i_1 = e^{-\frac{R}{2L_1}t} \left[\frac{1}{b} \cdot \left(\frac{U_0}{L_1} - \frac{I_0 R}{2L_1} \right) \cdot \sin(b \cdot t) + I_0 \cdot \cos(b \cdot t) \right], \quad (16)$$

где $b = \sqrt{\frac{1}{L_1 C} - \frac{R^2}{4L_1^2}}$, $R = R_n + R_l$, а Q_1 – добротность разрядной цепи.

Исследования выражений (11)...(16) показали, что даже после уменьшения разрядного тока до 40...60 % от своего максимального значения скачкообразное увеличение сопротивления нагрузки $R_{н0}$ в 5, 10 и 20 раз может увеличить длительность разрядного импульса $\tau_{РИ}$ соответственно в 7, 13 и 23 раза. Из рис. 5 видно, что при добротностях разрядного контура $Q_1=0,3-1,5$ к указанному времени 77...95 % энергии конденсатора уже рассеяно в нагрузке. Время такого рассеяния энергии в нагрузке в 6–12 раз меньше длительности последующего слабotoчного разряда без искрений, что обосновывает целесообразность прерыва-

ния разрядного процесса с целью уменьшения длительности импульсного тока в электро-
кровой нагрузке.

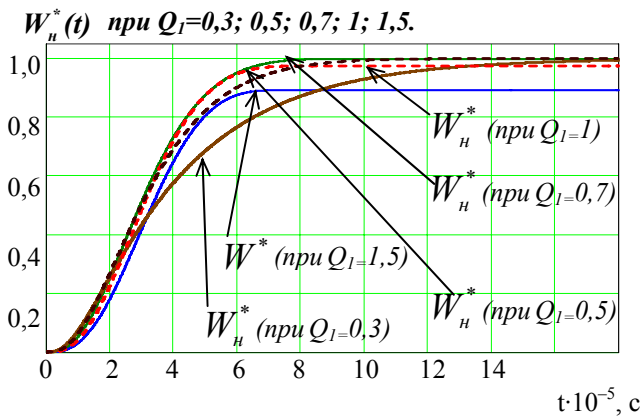


Рис. 5

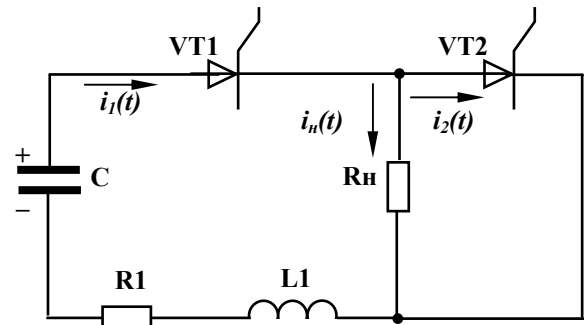


Рис. 6

Исследование возможности регулирования и стабилизации длительности импульсных токов в нагрузке за счет включения шунтирующего тиристора. Подключение шунтирующего тиристора VT_2 к нагрузке R_n представлено на рис. 6, а на рис. 7 показаны зависимости: а) тока $i_n(t)$, протекающего через сопротивление нагрузки R_n , и б) тока $i_1(t)$ через тиристор VT_1 при начальной добротности разрядной цепи $Q_I = 0,3$, но увеличенной в 10 раз

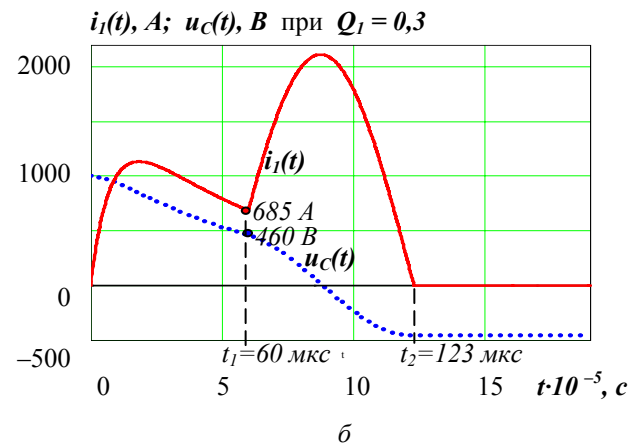
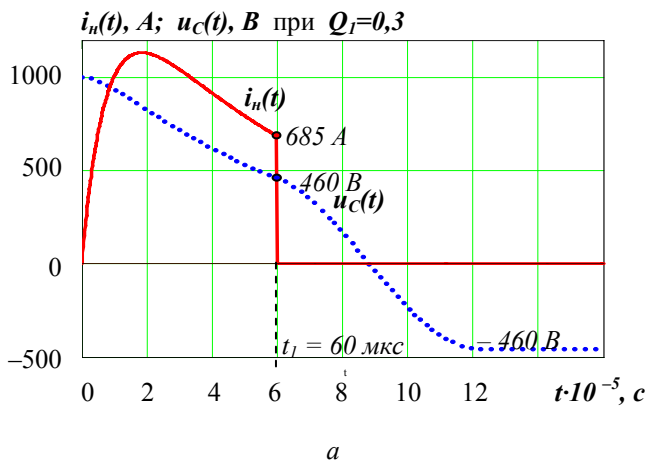


Рис. 7

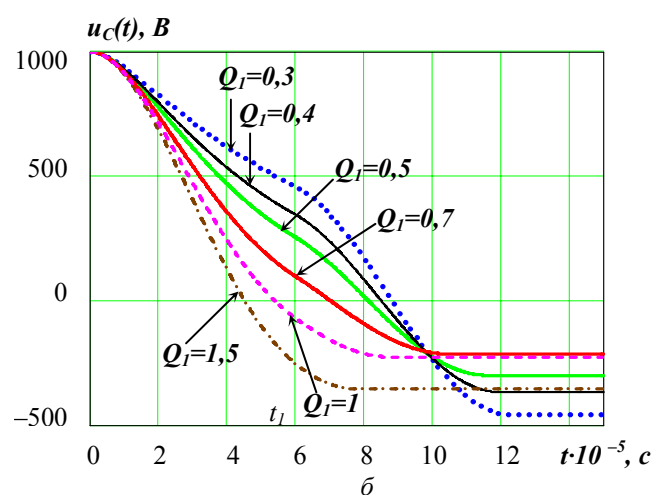
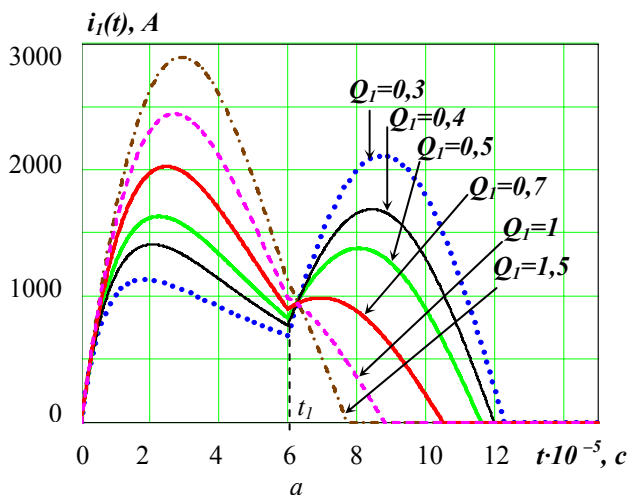


Рис. 8

после включения тиристора VT_2 . На рис. 8 при начальной добротности $0,3 < Q_1 < 1,5$ представлены изменения: а) тока $i_1(t)$ в цепи конденсатора и б) напряжения на конденсаторе $u_c(t)$ в течение времени, равного сумме длительностей обоих переходных процессов (первого – от включения VT_1 до включения VT_2 и второго – от включения VT_2 до выключения VT_1).

В табл. 3 приведены результаты анализа длительности разряда конденсатора с использованием тиристорного ключа VT_2 , шунтирующего нагрузку (и без его использования), значение остаточного напряжения на конденсаторе после окончания разрядного процесса и приведенных энергий $W_n(t=60 \text{ мкс})/W_{c0}$ и $W_c(t_2)/W_{c0}$ (где t_2 – время окончания разрядного процесса) для разных начальных добротностей разрядной цепи Q_1 , равных 0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,5.

Таблица 3

Q_1	τ_{PH} без включения VT_2 , мкс	τ_{PH} при включении VT_2 , мкс	$U_{\text{перез}}$, В	$\frac{W_n(60 \text{ мкс})}{W_{c0}}$, %	$\frac{W_c(t_2)}{W_{c0}}$, %
0,3	522	123	- 460	77	21
0,5	252	116	- 300	90	9
0,7	100	105	- 215	95	4,6
1	81	88	- 227	95	5
1,5	74,5	77,25	-352	88	12,4

Изменение времени задержки включения шунтирующего тиристора VT_2 после включения разрядного тиристора VT_1 возможно независимо от стохастического изменения сопротивления нагрузки регулировать длительность протекания в ней разрядного тока и регулировать таким образом дисперсность электроэрозионных порошков [5, 6].

С использованием выражений (1)...(16) разработана методика расчета энергетических и временных характеристик переходных процессов в цепях ФРИ, которая по исходным данным позволяет определить рациональные частоту разрядных импульсов, мощность и энергоэффективность ФРИ. Учет нелинейности электрического сопротивления нагрузки при разряде на нее конденсатора проводился с использованием пакета MATLAB/ SIMULINK/SPS (Personal licence's password 16-11194-26164-52495-54221-19414). При моделировании нагрузки линейным сопротивлением ошибка не превышала 0,5 %, при моделировании нелинейным сопротивлением – 3,1 %, а при сравнении с экспериментальными результатами – 5,6 %.

В работе было исследовано влияние амплитуды напряжения, длительности и частоты разрядных импульсов, а также емкости конденсатора и частоты принудительной механической активации слоя гранул Al , Cu и Ag на производительность и гранулометрический состав искроэрозионных порошков, полученных электроискровым диспергированием указанных гранул в дистиллированной воде. Для разрядных камер с шириной межэлектродного расстояния 24 и 142 мм были установлены оптимальные режимные параметры снижения среднего размера крупной фракции алюминиевых частиц в 1,7 раза, а их массовой доли в 1,8 раза без существенного уменьшения производительности процесса. При производстве седиментационно устойчивых гидрозолей электроискровым диспергированием шара гранул Cu и Ag в воде применение принудительной механической активации слоя гранул обеспечило снижение максимального размера искроэрозионных частиц до 1 мкм [2, 12–15].

Получены экспериментальные зависимости эквивалентного электрического сопротивления слоев гранул алюминия от разрядного тока во время их диспергирования в воде, которые использовались при анализе переходных процессов в цепях ФРИ в среде MathLab для уточнения оптимальных диапазонов изменения режимных параметров для получения субмикронных искроэрозионных частиц. Для получения субмикронных порошков металлов с низкой химической активностью предложено использовать высокочастотную модуляцию длительности разрядных импульсов. Для анализа указанных режимов получения субмикронных порошков была разработана модель генератора модулированных разрядных импульсов в среде OrCad. Создана лабораторная установка ОЭЭД в различных жидкостях, обеспечиваю-

щая широкодиапазонное регулирование параметров разрядных импульсов и получение опытных партий седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов *Ag, Cu, Zn, Fe, Mn, Co, Mo* с максимальным размером частиц дисперсной фазы меньше 1 мкм для дальнейшего использования в растение- и животноводстве.

Технология и технологическое оборудование производства седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов объемным электроискровым диспергированием их гранул в деионизованной воде с применением принудительной механической активации процессов ОЭЭД внедрены в Национальном университете биоресурсов и природопользования Украины (г. Киев). На МПП "АВА" (г. Киев) внедрены методика получения и экспериментальное оборудование для электроискрового диспергирования отходов лент магнитомягких сплавов на основе *Fe-B-Si-Nd* в насыщенных углеводородах с получением мелкодисперсных порошков с аморфизированной поверхностью. В Институте металлофизики НАН Украины внедрены методика и экспериментальная установка производства искроэрозийных порошков с памятью формы *Zr-Ni-Hf-Ti, Ni-Mn-Ga* и *Ni-Al* в криогенных жидкостях. В ООО "Экспертроник Украина" (г. Киев) внедрено технологическое оборудование переработки отходов производства запорной арматуры нефтепроводов с целью получения дисперсных порошков сверхтвердых сплавов *Cr-C-Ni* их ОЭЭД в насыщенных углеводородах.

В работе развиты также принципы построения систем электропитания энергоемких магнитодинамических установок, в частности магнитодинамических насосов и индукционных плавильных печей, которые являются не только мощными потребителями электрической энергии, но и предъявляют жесткие требования к обеспечению их индукторов и электромагнитов напряжениями с задаваемым фазовым сдвигом. Необходимость решения задач их электромагнитной совместимости с питающей трехфазной сетью существенно усложняет оптимизации режимов магнитодинамических и их систем электропитания, особенности которых зависят от назначения и конструктивного исполнения МДУ и способа преобразования электрической энергии. Исследования в этом направлении были направлены на получение энергоэффективных режимов за счет использования в системах электропитания индуктивных, емкостных и полупроводниковых преобразователей, а также комбинированных систем преобразования энергии [1–7]. В частности, были исследованы электротехнологические режимы индукционных плавильных печей и установок на основе двухиндукторных МДУ со сдвоенными индукционными единицами (СИЕ), которые широко используются в металлургии и литейном производстве для реализации технологий сквозного течения расплава через канал. При реализации таких технологий применяют как различное включение индукторов, так и наложение на отдельные участки канала внешнего магнитного поля. Интенсивность транзитного течения металла в каналах двухиндукторной МДУ с СИЕ зависит от силы тока, индуцируемого в ветвях канала, и характера его растекания между устьями канала. От силы тока зависит и величина электромагнитной энергии, передаваемой в металл, а следовательно, интенсивность его нагревания и плавления.

Результаты исследования электромагнитных процессов и параметров двухиндукторных установок указывают на то, что фазовые соотношения питающих напряжений существенно влияют на электрические параметры МДУ. В частности, при наличии сдвига фазы между одинаковыми по величине напряжениями, приложенными к разным индукторам, в одноименных ветвях каналов, охватываемым разными индукторами, протекают токи разной величины и возникают разные полные электрические сопротивления (проводимости) [7]. В индукторах возникают различные магнитные потоки и энергия, передаваемая индукторами МДУ в металл, также будет разной, что существенно влияет на температуру расплавленного металла на отдельных участках канала. Указанное различие энергетических параметров может достигать двукратных значений [7].

Полученные результаты позволяют оценить влияние амплитудно-фазовых соотношений питающих напряжений на энергетические параметры двухиндукторных МДУ с СИЕ. Впервые получены аналитические выражения, связывающие амплитудно-фазовые соотношения питающих напряжений с выравниванием температуры в каналах МДУ и электромаг-

нитной совместимостью индукторов МДУ с питающей трехфазной сетью, которые совместно с приведенными в [7] выражениями для определения собственной и взаимной проводимости составляют методику расчета режимов МДУ со сдвоенными индукционными единицами. Основные положения этой методики могут быть успешно использованы при анализе режимов амплитудно-фазозависимых двух- и трехиндукторных установок. Результаты расчета направлены на создание систем электропитания с расширенными фазопреобразовательными возможностями и многофункциональным использованием индуктивных и емкостных элементов электрооборудования МДУ.

Выводы

1. В работе получила дальнейшее развитие теория переходных процессов в цепях электроимпульсных систем в части использования целенаправленного изменения условий заряда и разряда емкостных накопителей энергии, а также разработки рекомендаций по повышению энергоэффективности исследуемых систем и регулированию длительности переходных процессов в цепях электроимпульсных систем.

2. Установлены закономерности изменения КПД, дозы энергии, поступающей в конденсатор, и напряжения его заряда от формирователя постоянного напряжения при изменении начальных условий переходного процесса, что обеспечивает выбор оптимальных интервалов и закономерностей изменения начальных и конечных напряжений на конденсаторе с повышением КПД зарядных цепей и дозы энергии в конденсаторе при его зарядке.

3. Определены условия регулирования отрицательной и положительной обратных связей напряжения заряда конденсатора от характера его разряда в предыдущем цикле, что позволило разработать метод быстродействующей параметрической стабилизации оптимальных режимов объемного электроискрового диспергирования слоя гранул в жидкости и рекомендации по выбору энергетически целесообразного временного интервала при шунтировании тиристором электроискровой нагрузки для ограничения длительности импульсных токов.

4. Исследовано влияние напряжения, длительности и частоты разрядных импульсов, а также емкости конденсатора и частоты принудительной механической активации слоя гранул *Al*, *Cu* и *Ag* на производительность и гранулометрический состав получаемых искроэрозийных порошков, что позволило определить условия и закономерности производства субмикронных порошков и седиментационно устойчивых гидрозолей.

5. Получены аналитические выражения, связывающие амплитудно-фазовые соотношения напряжений, питающих индукторы, с выравниванием температуры в каналах МДУ и электромагнитной совместимостью индукторов МДУ с питающей трехфазной сетью, которые совместно с приведенными в [7] выражениями для определения собственной и взаимной проводимости составляют методику расчета режимов МДУ со сдвоенными индукционными единицами. Основные положения этой методики могут быть успешно использованы при анализе режимов амплитудно-фазозависимых двух- и трехиндукторных установок.

1. Борисов Б.П., Зубюк Ю.П., Шнурко В.К. Системы электропитания магнетодинамических установок. – Киев: Наук. думка, 1994. – 248 с.
2. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г. Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 22. – С. 74–79.
3. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Кучерявая И.Н., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г. Анализ методов повышения эффективности электроэрозионной коагуляции при очистке водных сред // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”. – 2008. – Ч.2. – С. 120–125.
4. Berkowitz A.E., Harper H., Smith D.J., Hao Yu, Jiang Q., Solomon V.C., Radousky H.B. Hollow metallic microspheres produced spark erosion // Applied Physics Letters. – 2004. – V. 95. – P. 940.
5. Захарченко С.Н., Шевченко Н.И., Яцюк С.А., Шевченко С.Н. Влияние параметров генератора и технологических условий получения искроэрозионных порошков на их характеристики и стабильность процесса. // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 20. – С. 54–55.
6. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизации параметров полупроводниковых электроимпульсных систем электроискрового диспергирования слоя токопроводящих материалов // Стабилизация параметров электрической энергии. – Киев: ИЭД НАН Украины, 1991. – С. 12–30.

7. Щерба А.А., Шнурко В.К., Ломко Н.А., Зубюк Ю.П. Исследование влияния параметров питающих напряжений на режимные характеристики магнитодинамических установок // Техн. електродинаміка. – 2003. – №1. – С. 68–71.
8. Супруновская Н.И. Переходные процессы при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку и ограничении длительности протекающих в ней импульсных токов // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 5. – С. 20–26.
9. Щерба А.А. Тиристорные системы электропитания технологических установок с параметрической стабилизацией выходных характеристик // Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии. – Киев: ИЭД НАН Украины, 1996. – С. 18–27.
10. Супруновская Н.И. Энергетические характеристики при изменении начальных условий колебательного заряда конденсатора от источника постоянного напряжения // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 27–33.
11. Щерба А.А., Дубовенко К.В. Высоковольтные электроразрядные компактные системы. – К.: Наук. думка. – 2008. – 260 с.
12. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Лопатько К.Г., Афтанділянц Е.Г., Святненко В.А. Развитие систем получения ультрадисперсных искроэрозионных порошков: влияние вибрации на параметры разрядных импульсов и характеристики продукции // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2008. – Ч.4. – С. 107–112.
13. Щерба А.А., Лопатько К.Г., Захарченко С.Н., Афтанділянц Е.Г., Зазимко О.В., Яцюк С.А., Нікітенко Ю.С. Вплив вібрації на параметри розрядних імпульсів та дисперсність порошків біогенних металів // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2008. – № 1(22). – С. 21–29.
14. Пат. 38458 Україна, МПК (2006) В22F 9/08. Спосіб отримання ультрадисперсного порошку / К.Г. Лопатько, Є.Г. Афтанділянц, А.А. Щерба, С.М. Захарченко, С.А. Яцюк. – Опубл. 12.01.2009. – Бюл. № 1.
15. Пат. 38461 Україна, МПК (2006) В22F 9/08. Пристрій для отримання колоїдних розчинів ультрадисперсних порошків металів / К.Г. Лопатько, Є.Г. Афтанділянц, А.А. Щерба, С.М. Захарченко, С.А. Яцюк. – Опубл. 12.01.2009. – Бюл. № 1.
16. Волков И.В., Вакуленко В.М. Источники электропитания лазеров. – К.: Техніка, 1976. – 176 с.
17. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
18. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – К.: Наук. думка. – 1982. – 424 с.
19. Щерба А.А., Михайленко В.В., Захарченко С.Н. Математичне моделювання перехідних процесів в напівпровідникових перетворювачах параметрів електроенергії розрядно-імпульсних електротехнологічних систем // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2008.– Ч.3.– С. 115–120.
20. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Zakharchenko S.N., Kucherjavaya I.N., Shevchenko N.I., Suprunovskaya N.I. Progress in spark-eroded particle production: Development of technological system for high-yield electrical-spark dispersion of metal granules in liquid // Техн. електродинаміка. – 2005. – №6. – С. 3–13.