

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА МЕГАДЖОУЛЬНОГО ДИАПАЗОНА С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ

Досліджено необхідні для розробки імпульсних джерел енергії електричні і енергетичні характеристики розряду у контурі з уніполярними генераторами і двохступінчастим розмикачем, що забезпечує стискання імпульсу у часі і збільшення потужності у навантаженні до тераватного рівня.

Исследованы необходимые для разработки импульсных источников энергии электрические и энергетические характеристики разряда в контуре с униполярными генераторами и двухступенчатым размыкателем, обеспечивающим сжатие импульса во времени и повышение мощности в нагрузке до тераваттного уровня.

Electrical and power discharge characteristics, necessary for pulsed source design, are investigated pertaining to the circuit with homopolar generators and two-stage opening switch providing pulse temporal compression and increase in power in the load up to the level of TW.

Расширение областей применения разрядно-импульсных технологий обуславливает необходимость создания импульсных источников энергии (ИИЭ) с улучшенными техническими характеристиками. Такие источники находят применение в импульсных генераторах плазмы, источниках генерации сильных электрических и магнитных полей, ускорителях пучков заряженных частиц, источниках мощного микроволнового и лазерного излучения [5].

Особенно сложна разработка компактных импульсных источников, в которых необходима одновременная реализация высоких уровней запасаемой энергии мегаджоульного диапазона, больших значений мощности разряда в нагрузке (порядка тераватт и выше) и удельных характеристик при заданном ресурсе циклов заряд – разряд.

Удельные характеристики ИИЭ определяются значениями удельных характеристик входящих в их состав компонентов и, в первую очередь, накопителя энергии, зарядного устройства и коммутационной аппаратуры. Широко используемые в разрядно-импульсных технологиях импульсные источники с емкостными накопителями [7] из-за низких

удельных характеристик в мегаджоульном диапазоне запасаемой энергии от 0,05 до 0,2 МДж·м⁻³ при ресурсе до 10³ импульсов) имеют неудовлетворительные массогабаритные характеристики, дороги по капитальным затратам и в обслуживании, имеют недостаточную надежность.

В работе [8] в качестве импульсного источника энергии мегаджоульного диапазона применен взрывомагнитный генератор, в котором химическая энергия взрывчатого вещества преобразуется в электрическую. Такой источник имеет высокие удельные характеристики, однако является разрушаемым и из-за использования больших масс взрывчатого вещества его технологическое применение ограничено.

В работах [11, 14] в качестве импульсного источника разработаны и применены ударные униполярные генераторы (УУГ) с удельной запасаемой энергией на уровне 20 МДж/м³, работающие в режиме динамического торможения. Это значение, по крайней мере, на два порядка выше удельного значения запасаемой энергии в емкостных накопителях большой энергоемкости. Успешное применение УУГ в импульсных системах стало возможным благодаря решению проблем токосъема [14] за счет обеспечения

малого сопротивления (на уровне единиц микроом) и достаточной механической прочности щеток при большой окружной скорости якоря (до $250 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$). Существенно также и то, что при малых продолжительностях динамического торможения (до $0,1 \text{ с}$) реакция якоря практически не влияет на процесс импульсного преобразования энергии, поскольку ее действие почти полностью компенсируется возникающими в якоре вихревыми токами [11].

Следует отметить, что для реализации разряда при нагрузке на тераваттном уровне в рассматриваемой электромеханической системе, так же как в импульсных системах с емкостным накопителем или взрывомагнитным генератором, необходимо решение проблемы обострения импульса в нагрузке, т.е. его временного сжатия при соответствующем увеличении мощности. Это достигается коммутацией тока из цепи накачки индуктивного накопителя энергии [12, 13], включенного в цепь разряда УУГ, в нагрузку. В работах [4, 10] изучалась проблема увеличения мощности импульса в импульсных источниках энергии для плазменных ускорителей со скоростью энерговода до 100 ГВт . В рассматриваемом случае мощность разряда на один-два порядка выше, а длительность коммутации, соответственно, короче и составляет $\sim 10 \text{ мкс}$. При этом величина переключаемого тока находится на мегаамперном уровне. Таким образом, возникает необходимость в выборе иных технических решений, а также в согласовании параметров размыкающей аппаратуры с параметрами накопителя энергии и нагрузки.

В этой связи целью настоящей работы являлся анализ процессов в импульсном источнике с электромеханическим накоплением энергии для обоснования выбора параметров размыкателя и оценки удельных характеристик установки в режимах разряда мегаджоульного диапазона со скоростью выделения энергии в нагрузке $0,1 - 1 \text{ ТВт}$.

Электрическая схема разрядного контура установки представлена на рис.1,а. В состав установки входит два параллельно соединенных ударных униполярных генератора

(УУГ1 и УУГ2), включаемых в контур замыкающими коммутаторами S1 и S2, индуктивный накопитель энергии (ИНЭ) и двухступенчатый размыкающий коммутатор. Первая ступень коммутатора (S3) представляет собой коммутатор взрывного типа, второй ступенью (S4) является электровзрывной коммутатор. Характерной нагрузкой Н генератора может служить, например, высоковольтный диод с взрывоэмиссионным многоострийным катодом [1], генерирующий пучок электронов при напряжении на нем, превышающем $0,3 \text{ МВ}$. Нагрузка включается в разрядный контур высоковольтным газоразрядным коммутатором S6 при возникновении перенапряжения на нем в процессе размыкания цепи. Во избежание излишнего тепловыделения в нагрузке предусмотрена возможность ее шунтирования коммутатором S5, в процессе разряда.

Схема замещения разрядного контура установки представлена на рис.1,б. В ней учтены параметры входящих в ее состав компонентов: генераторов, индуктивного накопителя, ступеней размыкателя, шин разрядного контура, а также паразитная емкость ($50 - 90 \text{ нФ}$), шунтирующая нагрузку. Паразитные значения активных сопротивлений и индуктивностей шин ветвей разрядного контура, замыкающих коммутаторов включены в состав значений компонентов в этих ветвях.

Для обеспечения общности анализа в работе использована модификация формализованного метода расчета электрических цепей [6]. В соответствии с ним система уравнений, описывающая работу импульсного источника, составлена на основании первого закона Кирхгофа и разрешается относительно узловых потенциалов. Для получения решения используется узловый метод, согласно которому каждая ветвь схемы в общем случае включает последовательно соединенные источник ЭДС E_j , сопротивление R_j , индуктивность L_j (установленную или паразитную), емкость C_j (ветвь должна содержать хотя бы индуктивность). В расчетах полагается, что ток j -й ветви совпадает по

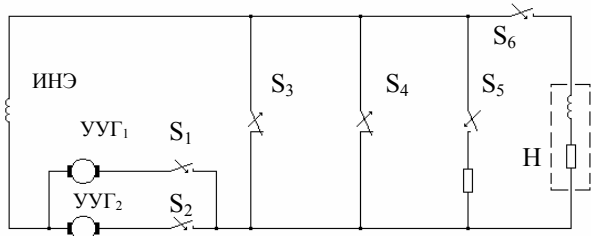
направлению с ЭДС E_j , а узел, имеющий нулевой потенциал, обозначается последним по счету.

$$-M_2 - M_{cm2} = J \frac{d\omega_2}{dt}, \quad W_2 = J \frac{\omega_2^2}{2}, \quad (6)$$

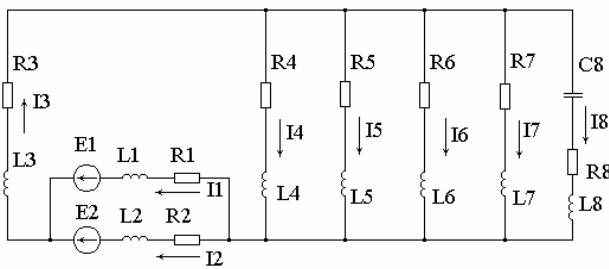
где $E_1, E_2, \omega_1, \omega_2, I_1, I_2, k_1, k_2, M_1, M_2, M_{cm1}, M_{cm2}$ – ЭДС на валу первого и второго униполярного генератора: соответствующие круговые частоты, токи, коэффициенты момента сопротивления, электромагнитный момент и момент сопротивления; $c=1/2\pi$ – конструктивный коэффициент униполярного генератора; Φ – магнитный поток; B – магнитная индукция; r – радиус якоря генератора.

Проблемы решения задачи прерывания зарядного тока ИИЭ изложены в работе [2]. В ней также сформулированы требования к размыкателям: длительное время пребывания и малые потери времени в проводящем состоянии, быстрое возрастание сопротивления при размыкании, большое сопротивление после коммутации, высокое допустимое напряжение после отключения, возможность работы в частотном режиме, большой ресурс. Несмотря на значительный прогресс в разработке коммутационной аппаратуры за последние пятнадцать лет, в настоящее время нет размыкателя, который бы удовлетворял всем перечисленным требованиям. Поэтому при высокой мощности разряда (0,01 – 1 ТВт) и больших значениях вводимой в нагрузку энергии (1 – 10 МДж) необходимо применение двухступенчатых устройств коммутации [10, 14]. В таких устройствах размыкатель первой ступени обеспечивает длительное протекание тока и, следовательно, зарядку индуктивного накопителя до заданного энергозапаса благодаря большой массе проводящих ток элементов, а значит, и термической устойчивости. При срабатывании размыкателя первой ступени ток переключается в параллельную ему вторую ступень, представляющую собой размыкатель с более высоким быстродействием и имеющий меньшую массу контактной системы.

Требование сокращения времени отключения тока сопряжено с необходимостью обеспечения высокой электрической прочно-



а



б

Рис. 1. Электрическая схема разрядного контура (а) и схема его замещения (б)

$$\sum_{j=1}^m \frac{dI_j}{dt} = 0, \quad \frac{dI_j}{dt} = \frac{1}{L_j} (\Delta\phi_j + U_j), \quad (1)$$

$$U_j = E_j - R_j I_j - P_{cj} Q_{cj}, \quad \frac{dQ_j}{dt} = I_j, \quad (2)$$

где m – количество ветвей схемы замещения; $\Delta\phi_j$ – разность потенциалов между узлами j -й ветви схемы; P_{cj} – коэффициент учитывающий наличие емкости в ветви причем, $P_{cj} = 1/C_j$, если емкость в ветви имеется, при отсутствии емкости $P_{cj} = 0$; Q_{cj} – электрический заряд емкости в ветви схемы.

Уравнения (1,2) дополняются уравнениями электромеханики для УУГ (3)-(6):

$$E_1 = c\Phi\omega_1, \quad M_1 = c\Phi I_1, \quad M_{cm1} = k_1 M_1, \quad (3)$$

$$E_2 = c\Phi\omega_2, \quad M_2 = c\Phi I_2, \quad M_{cm2} = k_2 M_2, \quad (4)$$

$$\Phi = B\pi r^2, \quad -M_1 - M_{cm1} = J \frac{d\omega_1}{dt}, \quad W_1 = J \frac{\omega_1^2}{2}, \quad (5)$$

сти размыкателя и достижения большой скорости восстановления напряжения. В этой связи в качестве первой ступени хорошо зарекомендовали себя взрывные размыкатели. Их принцип действия основан на многократном разрушении проводника ударной волной и продуктами детонации взрывчатого вещества на ребристой преграде [8,9]. В таких размыкателях цилиндрический заряд взрывчатого вещества малой массы инициируется по оси, а токопровод перерезается одновременно во многих сечениях кумулятивными диэлектрическими струями.

В работе [9] показано, что изменение сопротивления R_4 взрывного размыкателя количественно описывается экспоненциальной зависимостью

$$R_4(t) = R_4(0) \exp(\alpha t), \quad (7)$$

где α - конструктивный коэффициент, определяющий скорость увеличения сопротивления взрывного размыкателя. Значение $\alpha = (2...3) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ обеспечивает реально достижимую в экспериментах скорость переключения тока в заданном диапазоне времен коммутации [2].

Принцип действия размыкателя второй ступени основан на быстрой потере проводимости металла в результате изменения его физического состояния при протекании тока большой плотности (явление электрического взрыва). Причем, в [2] экспериментально показано, что на характер отключения тока влияет тот факт, что сопротивление проводника неоднозначно зависит от скорости ввода в него электрической энергии. Экспериментальные результаты исследования электрического взрыва проводников в различных дугогасящих средах, обобщенные в этой работе, свидетельствуют о том, что наилучшими коммутационными характеристиками обладают проводники, помещенные в пылевидный кварц. Такие размыкатели обладают высокой разрывной мощностью 0,1 – 1 ТВт, малым временем коммутации тока 0,1 – 1 мкс, высокой электрической прочностью 8·МВ/м). Электровзрывной размыкатель в кассетном исполнении [2] приспособлен для взрыва фольги различных размеров

(длиной до 1 м и шириной до 0,3 м). В таком устройстве получены импульсы напряжения до 900 кВ при коммутации тока 150 кА за 0,1 мкс. Конструкция размыкателя допускает его использование для переключения мегаамперных токов. Так, на установке с энергозапасом 680 кДж шесть параллельно включенных размыкателей позволили переключить в индуктивный накопитель ток 3 МА за времена от 0,2 до 0,5 мкс при мощности обрыва 0,5 ТВт.

Таким образом, изменение сопротивления фольги электровзрывного коммутатора при диссипации в нем энергии определяется соотношениями

$$R_5 = R_5(j_{5m}, W_5, dW_5/dt), \quad (8)$$

$$j_{5m} = I_{5m}/S_0, \quad W_5 = \int I_5(t)^2 \cdot R_5 dt, \quad (9)$$

где W_5 - энергия, выделившаяся в размыкающем коммутаторе; S_0 - начальная площадь поперечного сечения фольги; I_{5m} - j_{5m} амплитудные значения тока и его плотности в фольге электровзрывного коммутатора.

Аппроксимация экспериментально полученных зависимостей (8) в виде аналитических выражений в широком диапазоне изменения характеристик разряда рассмотрена в [2].

Уравнения (1)-(9) представляют собой математическую модель генерации импульсов в разрядном контуре установки с ударными униполярными генераторами в режиме двухступенчатой коммутации тока в нагрузку.

В расчетах параметры компонентов импульсной энергетической установки задавались соответствующими реальным и представлены в таблице. Условные обозначения, принятые в таблице, соответствуют обозначениям на схеме замещения (рис.1,б).

Полагалось, что после разворота якорей УУГ до заданной скорости вращения замыкающие коммутаторы S1 и S2 включают генераторы в контур. При достижении током в индуктивном накопителе максимального значения размыкатели S3 и S4 срабатывают последовательно и переключают ток в нагрузку по-

сле превышении на разряднике S6 значения пробивного напряжения.

При заданных параметрах контура максимальное значение тока в индуктивном накопителе $I_4 = 1,75 \cdot \text{МА}$ и оно достигается за время динамического торможения $0,1 \text{ с}$ (рис.2,а). В течение этого временного интервала униполярные генераторы отдают в разрядный контур энергию $8,56 \cdot \text{МДж}$. При этом скорость вращения якоря каждого из них снижается с 628 до 341 рад/с .

На рис.2,б представлены электро-энергетические характеристики разряда за время динамического торможения. Согласно расчету из $8,56 \cdot \text{МДж}$, отданных генераторами в контур, в индуктивном накопителе запасается энергия $4,6 \cdot \text{МДж}$. Остальная энер-

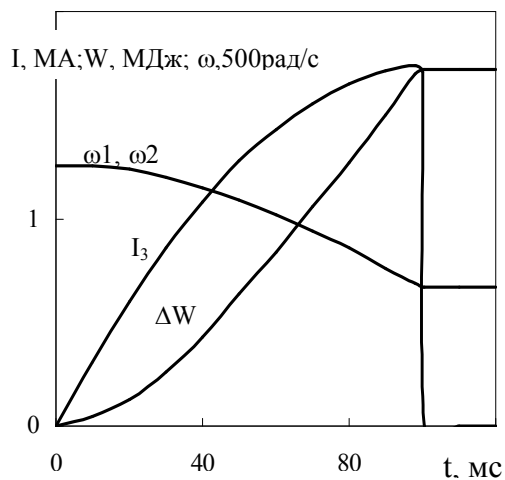
гия диссипируется на активных сопротивлениях элементов цепи: в индуктивном накопителе ($0,61 \cdot \text{МДж}$) в якорных цепях генераторов ($0,39 \cdot \text{МДж}$), на сопротивлении шин цепи накачки индуктивного накопителя ($0,92 \cdot \text{МДж}$), во взрывном размыкателе ($2,04 \cdot \text{МДж}$).

На рис.3,а показано переключение тока из первой ступени размыкателя во вторую при увеличении сопротивления первой ступени. Здесь же изображено изменение сопротивления электровзрывного размыкателя за время переключения в него тока. При заданных параметрах контура время коммутации тока из первой ступени во вторую составляет приблизительно $2,5 \cdot \text{мкс}$.

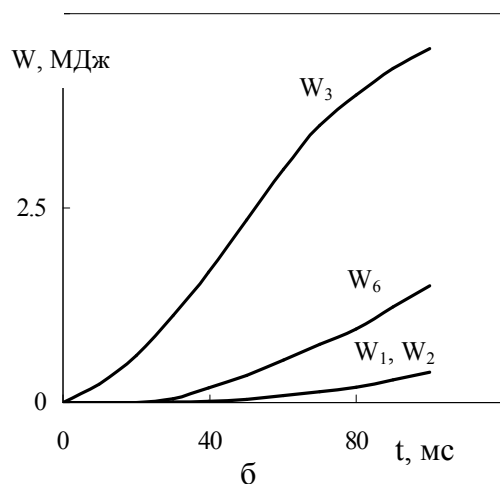
Параметры компонентов импульсного источника энергии

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Униполярный генератор [11]			
Сопротивление якоря	R_1, R_2	мкΩ	12
Индуктивность	L_1, L_2	нГн	30
Радиус якоря	r	м	0,29
Момент инерции	J	кг·м ²	32
Магнитная индукция	B	Тл	1,75
Круговая частота	ω_1, ω_2	с ⁻¹	628
Запасенная энергия	W_1, W_2	МДж	6,3
Индуктивный накопитель [13]			
Сопротивление (без криогенного охлаждения)	R_3	мкΩ	30
Индуктивность	L_3	мкГн	3
Размыкающий коммутатор. Ступень 1 [2]			
Тип	взрывной		
Начальное сопротивление	$R_4(0)$	мΩ	0,6
Индуктивность	L_4	нГн	75
Размыкающий коммутатор. Ступень 2 [8,9]			
Тип	электровзрывной		
Материал	алюминиевая фольга		
Начальное сопротивление	R_5	мΩ	9
Индуктивность	L_5	нГн	55
Нагрузка [1]			
Напряжение пробоя газового разрядника	U	кВ	300
Сопротивление	R_7	Ω	0,5
Индуктивность	L_7	нГн	50

На рис.3,б проиллюстрированы процессы на второй стадии коммутации тока во время его переключения из электровзрывного коммутатора в нагрузку. При максимальном значении тока электровзрывного размыкателя 1,7·МА амплитуда тока в нагрузке составляет 1,35·МА. Переключение тока на уровне от 90 до 10 % заканчивается за мкс, а скорость обрыва тока в фольге размыкателя достигает значения 1,5·ТА/с. При этом амплитуда мощности в нагрузке находится, практически, на тераваттном уровне.



а

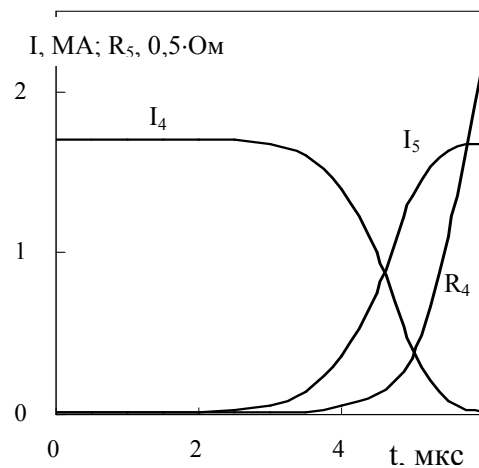


б

Рис. 2. Режим динамического торможения генераторов: а -отдача энергии в контур торможения генераторов; в - диссипация энергии в элементах контура

На рис. 4,а показано изменение во времени сопротивления фольги R_5 и напряжения

на электровзрывном размыкателе U_5 , энерговклада в фольгу W_5 , а также энергии, выделившейся в нагрузке W_7 . За время разряда в нагрузке выделяется энергия 3,74·МДж, что составляет 43 % от количества энергии, отданной генераторами в разрядный контур или 80 % от значения запасенной энергии в индуктивном накопителе. Причем, первый мегаджоуль энергии вводится в нагрузку за 1,1·мкс с.



а

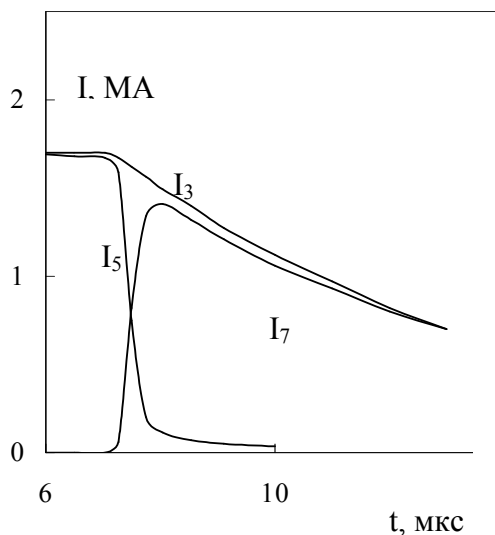
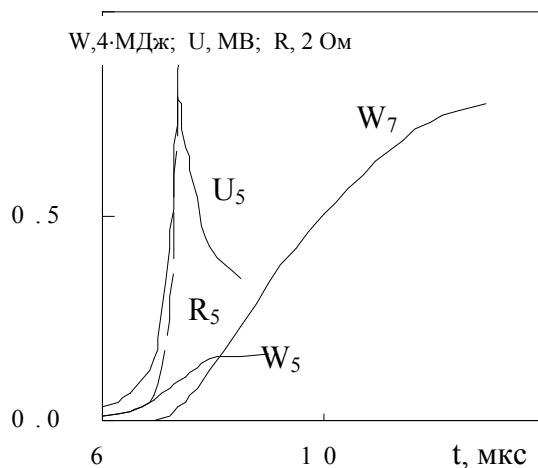


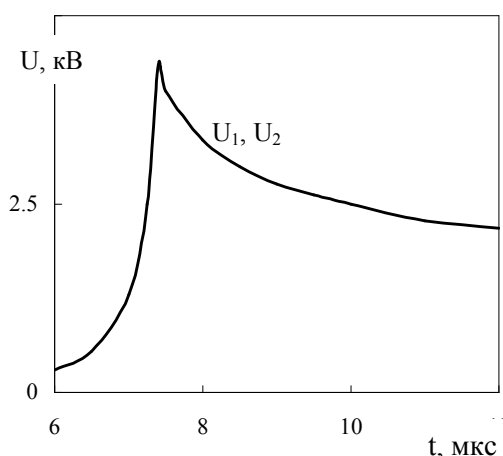
Рис. 3. Переключение тока из первой ступени размыкателя во вторую (а) и из второй ступени в нагрузку (б)

Расчетная временная зависимость напряжения на униполярном генераторе представлена на рис. 4,б. Амплитудное значение перенапряжения составляет 4,3 кВ. В связи с

тем, что оно относительно мало, режим закорачивания генераторов перед началом коммутационных процессов не рассматривался.



а



б

Рис. 4. Характеристики разряда в течение времени выделения энергии в нагрузку

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что быстрый режим коммутации электровзрывной ступени, начинающийся всего через 1 мкс после переключения в нее тока из ступени со взрывным размыкателем, накладывает чрезвычайно жесткие условия на обеспечение электрической прочности первой, взрывной ступени, находящейся под воздействием перенапряжения второй. В случае необходимо обеспечить такой режим

работы взрывной ступени, при котором участки проводника взрывного размыкателя под действием кумулятивных струй на ребристой преграде уменьшали бы свое поперечное сечение настолько, чтобы на этих участках происходил бы электрический взрыв и потеря электрической проводимости аналогично тому, как это происходит во второй ступени.

Численный расчет с использованием удельных характеристик компонентов импульсного источника, близких реальным, также позволяет сделать вывод о том, что его полезный объем составит 9-10 м³. При этом возможно размещение установки на транспортных средствах, что расширяет область технологического применения таких разрядно-импульсных систем.

Список использованной литературы

1. Акапьев Г.Н., Корнев С.А. Взрывоэмиссионный катод, изготовленный с помощью трековой методики // Приборы и техника эксперимента.- 1989.- № 4. - С. 155-157.
2. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990. –432 с.
3. Дубовенко К.В., Каменская Л.А., Косенков В.М. Упругое деформирование ротора униполярного генератора в режиме динамического торможения // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. – К.: Наук. думка. – 1995. – Вып. 2. – С. 90 – 93.
4. Дубовенко К.В. Преобразование энергии ударного униполярного генератора в контуре с индуктивным накопителем и плазменной нагрузкой // Техн. электродин. - 1991. - № 5. – С.25 – 30.
5. Импульсные системы большой мощности. Под ред. Э.И. Асиновского. – М.: Мир. – 1981. – 248 с.
6. Кутковецкий В.Я. Формализация расчета процессов в вентильных цепях узловым методом переключающих функций // Электричество.-1989. - № 5. – С.72-74.

7. Кучинский Г.С., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Генераторы больших импульсных токов // Физика и техника мощных импульсных систем. – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – С. 127 – 164.

8. Чернышев В.К., Волков Г.И., Иванов В.А. Взрывные открывающие ключи с регулируемым временем нарастания тока в нагрузке // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения. – Саров: ВНИИЭФ. – 1997. – С. 365 – 366.

9. Chernyshev V.K., Vakhrushev V.V., Volkov G.I. The Operation of Explosive Current Peaker with Ribbed Barrier at Wide Variation of the Breaking Circuit Inductance in Constant Magnetic Flux // Proc. 4th Intl Conf. Megagauss Magn. Field Generat. and Relat. Top.– New York; London. – 1987. – PP. 525 – 529.

10. Dubovenko K.V., Chemerys V.T. Performance Simulation of Pulsed Power Supply System for Electrothermal Launcher // IEEE Trans. on Magnetics. – 1999. – Vol. 35, № 1. – PP. 328 – 333.

11. Gully J.H., Aanstoos T.A., Nalty K. HPG Operating Experience at CEM-UT// IEEE Trans. on Magnetics. – 1986. – Vol. 22, N 6. – PP. 1489 – 1494.

12. Gully J.H., Pretap S.B., Spann M.S. Design of a Compact Inductor Matched to a Homopolar Generator // Proc. IEEE Intl. Pulsed Power Conf, IEEE Cat. No. 83CH1908-3. – 1993. – PP. 427 – 431.

13. Hackworth D.T., Deis D.W., Eskels P.W. A 10 MJ Cryogenic Inductor // IEEE Trans. on Magnetics. – 1986. – Vol. 22, N 6. – PP. 1495- 1498.

14. Lauhlin R.L., Gully J.H., Nalty K.E. System Design of the Ultrahigh Velocity GEDI Experiment // Item. – PP. 1578- 1583.



Дубовенко Костянтин Вікторович
канд. техн. наук
Миколаївський навч.-наук. ін-т Одеськ. нац.
ун-ту ім. І.І. Мечникова
Зав.каф.обчислювальної техніки
(8-0512)-56-03-38 (дом.),
(8-0512)-34-60-15 (роб.)
E-mail: ppps@mksat.net

Получено 07.06.06