

12
Электровзрывной размыкатель тока для быстрого вывода энергии из индуктивного накопителя в нагрузку

© А.А. Базанов,¹ А.Н. Ерофеев,¹ А.В. Ивановский,^{1,2} В.И. Мамышев,¹ Е.В. Шаповалов¹

¹ Российский Федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

² Саровский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета,

607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

e-mail: aab@elph.vniief.ru

Поступило в Редакцию 9 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 8 июня 2023 г.

Принято к публикации 12 июня 2023 г.

Приведены результаты модельной отработки электровзрывного размыкателя тока (ключа), предназначенного для использования в коммутационной системе, служащей для выведения электромагнитной энергии из индуктивного накопителя в нагрузку через замыкающий ключ-разрядник. В качестве источника энергии для индуктивного накопителя использовалась конденсаторная батарея. В экспериментах варьировался ряд особенностей исполнения размыкателя с целью повышения его надежности и быстродействия. Для оптимизированного варианта исполнения продемонстрирована возможность формирования в низкоимпедансных нагрузках индуктивных накопителей импульсов тока с субмикросекундным временем нарастания вплоть до ~ 100 ns. Указанный результат справедлив для токов мегаамперного и мультимегаамперного уровней, что позволяет применять размыкатель для коммутации источников энергии большой энергоемкости таких, например, как взрывомагнитные (магнито-кумулятивные) генераторы.

Ключевые слова: электровзрывной размыкатель тока, индуктивный накопитель энергии, время нарастания тока в нагрузке.

DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55984.76-23

Введение

В настоящее время для проведения физических экспериментов, требующих генерации большой импульсной электрической мощности, нашли широкое применение индуктивные накопители энергии (в частности, взрывомагнитные), снабженные выходной коммутационной системой, формирующей быстро нарастающий импульс тока в нагрузке [1]. Одним из возможных вариантов построения такой коммутационной системы является использование электровзрывного размыкающего ключа, разрывающего токовый контур индуктивного накопителя, в паре с последовательно подключенным к нагрузке разрядником (замыкающим ключом) [2–6]. Последний срабатывает в процессе электровзрыва проводника размыкающего ключа при достижении на нем заданного уровня напряжения (обычно близкого к максимальному). Если считать разрядник (замыкающий ключ) идеальным устройством (срабатывает мгновенно, сопротивление падает до нуля), то время нарастания тока в индуктивной нагрузке до любой заданной величины $I_W < I_\infty$ в соответствии с [7,8] определяется формулой:

$$\tau_f = \frac{L_W \cdot L_\infty}{R_{Sg} \cdot I_{ig}} \ln \left(1 - \frac{I_W}{I_\infty} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Здесь I_∞ — амплитудное значение тока в нагрузке

$$I_\infty = \frac{I_{ig} \cdot L_i}{L_i + L_W}, \quad (2)$$

I_{ig} и R_{Sg} — ток в индуктивном накопителе и сопротивление размыкателя в момент срабатывания разрядника, L_i и L_W — индуктивности накопителя и нагрузки соответственно.

Из (1) следует, что при прочих равных условиях время τ_f будет обратно пропорционально сопротивлению размыкающего ключа (напряжению на нем $U_{Sg} = R_{Sg} \cdot I_{ig}$) в момент срабатывания разрядника. Поэтому для увеличения мощности, передаваемой в нагрузку, необходимо увеличивать сопротивление R_{Sg} (напряжение U_{Sg}). Максимально достижимое в процессе электровзрыва проводников сопротивление зависит от ряда конструктивных и технологических особенностей исполнения размыкателя, например, от материала, формы и размеров проводников, а также свойств окружающей их среды. В настоящей работе ставилась задача проведения экспериментальной отработки такого исполнения электровзрывного размыкателя, которое при его использовании в паре с „идеальным“ разрядником обеспечивало бы субмикросекундное время переключения тока в низкоимпедансную нагрузку индуктивностью ~ 10 nH (вплоть до ~ 100 ns для токов порядка одного и более мегаампер).

1. Схема проведения экспериментов и протестированные варианты исполнения электровзрывных размыкателей тока

Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1.

В качестве первичного источника энергии в экспериментах использовалась конденсаторная батарея емкостью $C = 492 \mu\text{F}$, заряжаемая до напряжения 43 kV. Ее разрядный контур содержал накопитель электромагнитной энергии L_i индуктивностью 100 или 80 нН. На выходе индуктивного накопителя устанавливался электровзрывной размыкатель тока $R_S(t)$. Нагрузка L_W величиной $\sim 10 \text{ нН}$ подключалась к индуктивному накопителю через одноканальный твердотельный разрядник G , описанный в работе [8] (разрядник содержит плоские электроды 1 и 2, разделенные полиэтиленовым изолятором 3, в который вдавлен игольчатый прикатодный электрод 4). В соответствии с [8] в первом приближении такой разрядник в данном случае можно считать „идеальным“ и не учитывать рассеяние энергии в нем в процессе коммутации. Для измерения производных тока в индуктивном накопителе и нагрузке применялись индуктивные датчики.

В работах [5,6] путем расчетного моделирования показано, что при микросекундной длительности процесса накопления энергии можно достичь быстрого переключения тока из индуктивного накопителя в нагрузку за время $\sim 100 \text{ ns}$, если электровзрывной размыкатель изготавливать из медной фольги толщиной 10–14 μm . Относительно малая толщина фольги позволяет сократить время диффузии магнитного поля в проводник и, как следствие, длительность процесса электровзрыва. При указанных выше параметрах электрического контура время передачи энергии из конденсаторной батареи в индуктивный накопитель составляет несколько микросекунд, поэтому толщина проводников не должна существенно превышать верхнюю границу приведенного диапазона и была выбрана равной 15 μm .

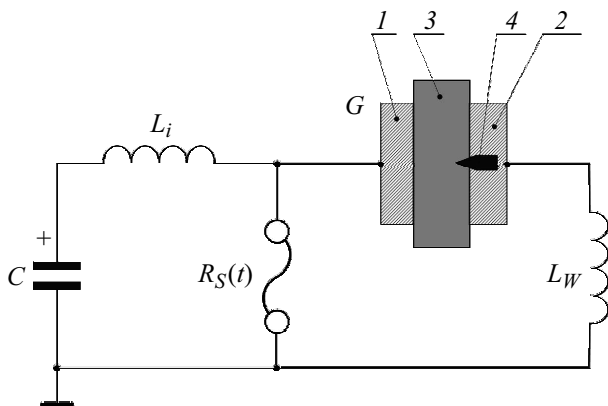


Рис. 1. Схема проведения экспериментов.

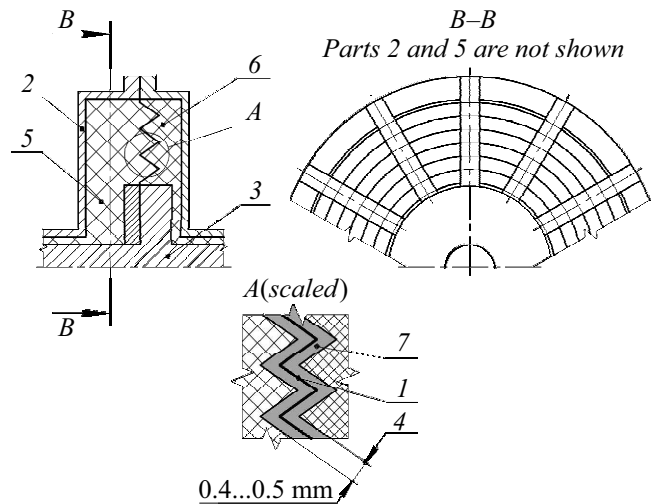


Рис. 2. Электровзрывной размыкатель тока.

Чтобы уменьшить габариты размыкателя, его конструкция была выполнена по аналогии с [9]. Размыкатель (рис. 2) изготавливался в виде медных полос 1 длиной 60 см, которые устанавливались радиально между наружным 2 (диаметр 456 мм) и внутренним 3 (диаметр 310 мм) коаксиальными электродами на выходе индуктивного накопителя и помещались в щелевое пространство 4 (узкий зигзагообразный зазор) между двумя полиэтиленовыми изоляторами ребристо-зубчатой формы 5 и 6, установленными „зуб в паз“. Форма сечения зубьев — равнобедренный треугольник с основанием 5 мм и высотой 25 мм. Зазор между стенками щели 4 составлял 0.4–0.5 мм. Щелевое пространство предварительно вакуумировалось, а затем заполнялось дугогасящей средой 7. Число полос и их ширина подбирались таким образом, чтобы для накопителя индуктивностью 100 нН их общая ширина составляла 32 см ($32 \times 1 \text{ cm}$), а для накопителя индуктивностью 80 нН — 27 см ($18 \times 1.5 \text{ cm}$).

Тестировались четыре варианта исполнения электровзрывного размыкателя.

В первом варианте электровзрывные элементы устанавливались в щелевой зазор как есть, что вызывало сложности при их монтаже, поскольку тонкие проводники легко обрывались на зубьях совмещаемых изоляторов при незначительном механическом воздействии.

Поэтому были приняты меры, облегчающие процесс сборки размыкателя и снижающие вероятность обрывов проводников путем их закрепления на упрочненной диэлектрической подложке.

Во втором и третьем вариантах медные полосы наклеивались на полипропиленовую подложку толщиной 100 μm , на другую сторону которой был приклеен армирующий слой из прочной целлюлозы толщиной 60 μm . Причем во втором варианте медные полосы располагались таким образом, что под воздействием магнитного поля они вдавливались в полипропиленовую подложку

(Н-прижатый разряд), в третьем варианте — отрывались от нее (Н-отжатый разряд).

Во всех вышеуказанных вариантах (включая первый) щелевое пространство между зубчатыми изоляторами заполнялось глицерином.

Четвертый вариант исполнения размыкателя тока совпадал со вторым за исключением того, что вместо глицерина щелевой зазор заполнялся элегазом (SF_6) под давлением 0.4 МПа.

2. Результаты экспериментов

Эксперименты проводились в два этапа.

Сначала тестировались три первых варианта исполнения размыкателя с глицерином в щелевом зазоре, чтобы выбрать из них наилучший по уровню достигаемого напряжения в процессе электровзрыва проводников.

На втором этапе отобранный вариант использовался для проведения двух экспериментов, в которых осуществлялась коммутация индуктивного накопителя разрядником G на нагрузку при напряжении на размыкателе, близком к максимальному. В одном из них щелевой зазор заполнялся глицерином, в другом — элегазом.

На рис. 3 представлены восстановленные по сигналам индуктивных датчиков кривые импульсов тока $I_i(t)$ в контуре индуктивного накопителя и напряжения $U_S(t)$ на электровзрывном размыкателе, полученные в экспериментах первого этапа. С первым и третьим вариантами исполнения размыкателя (рис. 3, *a, c*) использовался накопитель индуктивностью 100 нГн, со вторым (рис. 3, *b*) — индуктивностью 80 нГн.

Из сопоставления кривых напряжения для различных вариантов исполнения размыкателя следует, что наибольшее напряжение, равное 189 кВ на момент времени $3.9 \mu\text{s}$, было получено в случае нанесения электровзрывных элементов на подложку и реализации Н-прижатого разряда (рис. 3, *b*). Если подложка не используется, максимальное напряжение составляет 145 кВ (рис. 3, *a*). В случае Н-отжатого разряда результат (рис. 3, *c*) неудачный из-за медленного нарастания сопротивления, а значит и напряжения на размыкателе, которое к моменту времени $4.5 \mu\text{s}$ достигает лишь уровня 63 кВ.

Полученные результаты указывают, в частности, на то, что закрепление проводников на армированной диэлектрической подложке и организация Н-прижатого разряда препятствуют развитию процесса неравномерного разрушения тонких фольговых проводников под действием пространственно-неоднородного поля давлений, возникающего из-за неоднородного токораспределения. Это позволяет сократить длительность фронта нарастания напряжения на электровзрывном размыкателе и повысить его амплитуду.

Вместе с тем максимальный уровень напряжения, достигнутый в этой серии экспериментов (189 кВ), оказался примерно на 25% ниже расчетного значения (250 кВ), полученного при численном моделировании

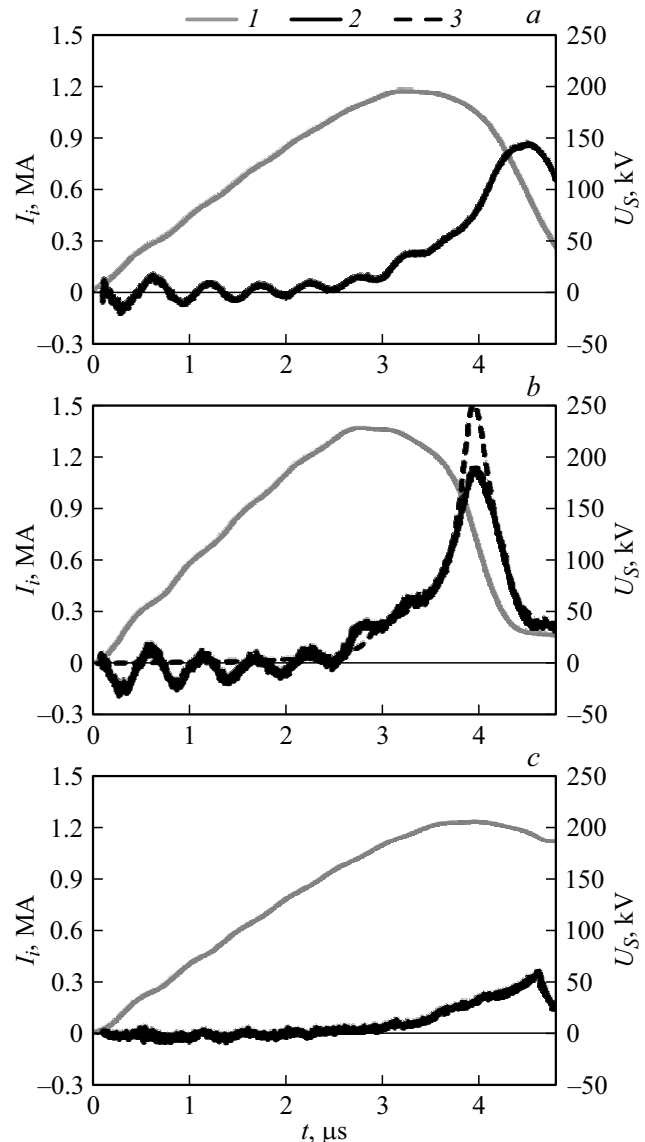


Рис. 3. Кривые импульсов тока I_i в контуре индуктивного накопителя и напряжения U_S на электровзрывном размыкателе для экспериментов первого этапа: 1 — ток, 2 — напряжение, 3 — расчетное напряжение на электровзрывном размыкателе с однородным распределением тока. Фольговые электровзрывные элементы выполнены: *a* — без армированной полипропиленовой подложки; *b* — на армированной полипропиленовой подложке, Н-прижатый разряд; *c* — на армированной полипропиленовой подложке, Н-отжатый разряд.

процесса электровзрыва в приближении азимутально-однородного распределения тока по полуму цилиндрическому проводнику с такими же длиной, толщиной и поперечным сечением, плотно зажатою (без щелевого зазора) между полиэтиленовыми изоляторами (кривая 3 на рис. 3, *b*). Методика расчета изложена в [5,6].

Вариант исполнения размыкателя с Н-прижатыми к подложке проводниками был использован для постановки экспериментов на втором этапе.

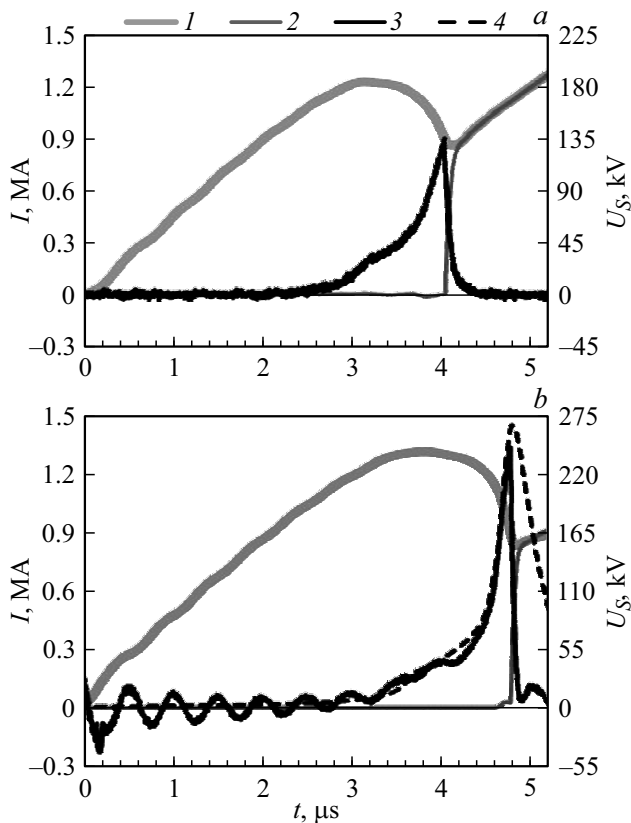


Рис. 4. Кривые импульсов напряжения на электровзрывном размыкателе и токов в индуктивном накопителе и в нагрузке для экспериментов второго этапа при использовании глицерина (а) и элегаза (b): 1 — ток I_i в контуре индуктивного накопителя, 2 — ток I_W в нагрузке, 3 — напряжение U_S на электровзрывном размыкателе, 4 — расчетное напряжение U_S на электровзрывном размыкателе с однородным распределением тока.

Эксперименты второго этапа проводились с накопителем индуктивностью 100 нГн. Их задача состояла в том, чтобы получить эмпирические данные о характерном времени нарастания тока в нагрузке, а также сравнить уровни генерируемого напряжения в случае заполнения щелевого зазора глицерином и элегазом.

При использовании глицерина для заполнения щелевого зазора разрядник G настраивался на пробой при напряжении 135–140 кВ (толщина полиэтилена между острием игольчатого электрода 4 и анодом 1 составляла 0.7 мм), чтобы заведомо обеспечить коммутацию индуктивного накопителя на нагрузку до момента достижения напряжением на размыкателе амплитудного значения 189 кВ.

При использовании элегаза пробивное напряжение на разряднике выставлялось на уровне 240–250 кВ, близком к расчетному максимальному значению 264 кВ для указанного выше „идеального“ исполнения размыкателя с азимутально однородным распределением тока (кривая 4 на рис. 4, b). Предполагалось, что при электровзрыве в среде элегаза напряжение на размыкателе может

подрасти до этого уровня, поскольку элегаз в меньшей степени, чем плотная жидкая среда, препятствует расширению продуктов электровзрыва, в процессе которого снижается их проводимость. При этом он обладает относительно высокой электропрочностью, что препятствует развитию пробоя, шунтирующего размыкатель. Соответственно толщина полиэтилена между острием игольчатого электрода 4 и анодом 1 была увеличена до 1.1 мм.

На рис. 4 приведены восстановленные по сигналам индуктивных датчиков кривые импульсов напряжения $U_S(t)$ на электровзрывном размыкателе и токов в индуктивном накопителе $I_i(t)$ и в нагрузке $I_W(t)$, полученные в этих двух экспериментах. Коммутация разрядника при электровзрыве проводников размыкателя в глицерине произошла при напряжении, близком к 137 кВ (рис. 4, a), при электровзрыве в элегазе — при напряжении около 245 кВ (рис. 4, b). Характерное время нарастания тока в нагрузке до уровня 0.8 МА составило для глицерина около 110 нс, для элегаза — 90 нс.

Из сопоставления расчетных и экспериментальных графиков на рис. 4, b и 3, b следует, что наилучшее совпадение эксперимента с „идеализированным“ расчетом имеет место при заполнении щелевого зазора, в котором расположены электровзрывные элементы, элегазом. При этом для элегаза полученное на электровзрывном размыкателе напряжение оказалось не более чем на 7% ниже максимума расчетного значения против 25% отклонения от расчета для глицерина (отметим, что фактически достигаемый уровень напряжения для элегаза мог превышать значение 245 кВ, заданное настройкой разрядника).

Таким образом, предложенный электровзрывной размыкатель способен обеспечивать относительно высокое быстродействие и эффективность коммутации тока. При этом он обладает тем преимуществом, что за счет радиальной компоновки и гофрированной формы проводников создает возможность низкоиндуктивного подключения к нагрузке [5,6].

Из формул (1), (2) следует, что при фиксированном отношении I_W/I_∞ увеличение коммутируемого тока не влечет изменения характерного времени τ_f его нарастания в нагрузке, если при этом сохраняется отношение $L_i/R_{Sg}(L_i + L_W)$ за счет соответствующего выбора параметров R_{Sg} , L_i и L_W . Это позволяет наращивать емкость источника (коммутируемые токи) без потери быстродействия коммутационной системы. В частности, применять взрывомагнитные генераторы.

Представленные выше модельные эксперименты с электровзрывом в глицерине были выполнены в 2017 и 2018 гг., в элегазе — в 2021 г.

В 2019 г. электровзрывной размыкатель рассматриваемого типа с глицериновым наполнением в паре с твердотельным разрядником [8] был использован для коммутации на нагрузку индуктивного накопителя емкостью 2.4 МДж ($L_i = 75$ нГн), запитываемого от спирального взрывомагнитного генератора. Детали

эксперимента и результаты изложены в статье [10], представленной группой сотрудников РФЯЦ-ВНИИЭФ. В этом эксперименте в нагрузке индуктивностью 10 нН был сформирован импульс тока, нарастающий до 5 МА за 120 ns. Таким образом, была продемонстрирована возможность формирования в низкоимпедансных нагрузках индуктивных накопителей импульсов тока мультимегаамперного диапазона с субмикросекундным временем нарастания.

Заключение

Представленные результаты служат экспериментальным подтверждением теоретически обоснованной в работах [5,6] возможности формирования с помощью электровзрывных размыкателей, работающих в паре с низкоиндуктивными замыкающими ключами, быстро нарастающих импульсов тока мегаамперного и мультимегаамперного диапазонов (с характерным временем нарастания вплоть до 100 ns) в низкоимпедансных нагрузках индуктивных накопителей электромагнитной энергии.

Применительно к использованной конструкции размыкателя, заимствованной из [9], наилучший результат (минимальное характерное время нарастания тока в нагрузке) достигается при одновременной выполнении следующих условий:

- исполнении электровзрывных элементов размыкателя тока в виде тонких полос медной фольги, закрепленных на упрочненной армирующей лентой подложке из полипропилена (использовались материалы толщиной: фольга — 15 μm , полипропиленовая подложка — 100 μm , армирующая лента из целлюлозы — 60 μm);
- реализации Н-прижатого разряда (проводники электровзрывного размыкателя вдавливаются в полипропиленовую подложку при протекании тока);
- заполнении щелевого зазора, в котором между двумя полиэтиленовыми изоляторами устанавливаются электровзрывные элементы, глицерином или элегазом.

В условиях проведенных экспериментов применение элегаза позволило достичь большего уровня напряжения на размыкателе (его максимального сопротивления) по сравнению с электровзрывом в глицерине (245 kV против 189 kV).

Финансирование работы

Организация, финансировавшая выполнение работы: Госкорпорация РОСАТОМ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Демидов, Л.Н. Пляшкевич, В.Д. Селемира (ред.). *Магнито-кумулятивные генераторы — импульсные источники энергии* (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2019), с. 6–97.
- [2] H.C. Early, F.J. Martin. *Rev. Sci. Instrum.*, **36** (7), 1000 (1965).
- [3] J.N. DiMarco, L.C. Burkhardt. *J. Appl. Phys.*, **41** (9), 3894 (1970).
- [4] Г.А. Месяц. *Импульсная энергетика и электроника* (Наука, М., 2004), с. 322–324.
- [5] A.V. Ivanovsky. *Explosive PW-power Current Source — Myth or Reality*, Proceedings of the XIII International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Suzhou, 2010. P. 32–43.
- [6] S.G. Garanin, A.V. Ivanovsky, L.S. Mkhitarayan. *Nucl. Fusion*, **51** (10), 103010 (2011). DOI: 10.1088/0029-5515/51/10/103010
- [7] Г. Кнопфель. *Сверхсильные импульсные магнитные поля* (Мир, М., 1972), с. 165. [H. Knoepfel. *Pulsed High Magnetic Fields* (North-Holland, Amsterdam, 1970), chap. 6.]
- [8] А.А. Базанов, В.Ш. Шайдуллин, А.Н. Ерофеев. *ЖТФ*, **92** (6), 867 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52517.241-21
- [9] V.K. Chernyshev, A.I. Kucherov, A.I. Mezhevov, V.V. Vakhrushev. *Electroexplosive foil 500 kV Current Opening Switch Characteristics Research*. Digest of Technical Papers: 11-th IEEE International Pulsed Power Conference, Baltimore, Maryland, USA. V. II, 1997, p. 1208–1212.
- [10] А.А. Базанов, Е.И. Бочков, С.Г. Гаранин, П.В. Дудай, А.А. Зименков, А.В. Ивановский, К.Н. Климушкин, В.М. Комаров, А.И. Краев, В.Б. Куделькин, В.И. Мамышев, И.В. Морозов, С.М. Полошко, А.Н. Скобелев, З.С. Цибилов, Е.В. Шаповалов. *ДАН*, **489** (4), 355 (2019). DOI: 10.31857/S0869-56524894355-357