

01;12

Магнитодинамический размыкатель тока с субмикросекундным временем переключения

© А.А. Базанов, А.В. Ивановский, В.Ш. Шайдуллин

Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: aab@elph.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 9 ноября 2010 г.)

Рассматривается возможность применения для коммутации мультимегаамперных импульсов тока магнитодинамических размыкателей, принцип действия которых основан на использовании эффекта быстрого развития краевых неустойчивостей. Предложено техническое решение и представлен прогноз характеристик размыкателя при его использовании в качестве второго каскада обострения тока спиральных взрывомагнитных генераторов и конденсаторных батарей. Методом компьютерного моделирования показано, что размыкатель способен работать в субмикросекундном временном диапазоне и обеспечивать коммутацию токов в десятки мегаампер, причем быстродействие размыкателя возрастает с ростом линейной плотности тока. Предельное время срабатывания размыкателя может достигать ~ 100 ns. Приводятся результаты экспериментальной отработки модели размыкателя на конденсаторной установке при коммутации токов амплитудой 4.3–4.5 МА.

Введение

В настоящее время существует потребность в разработке размыкателей тока субмикросекундного диапазона, предназначенных для выведения энергии в нагрузку из накопительных индуктивных контуров энергоемких конденсаторных батарей и взрывомагнитных генераторов (ВМГ). Это связано с тем, что для источников мультимегаамперных импульсов тока такая задача в полной мере не решена [1]. Одним из основных факторов, ограничивающих быстродействие размыкателей, является возникновение неустойчивостей, нарушающих процесс коммутации. Поэтому традиционно принимаются меры для их подавления. Авторы решили избрать иной путь и рассмотреть возможность создания субмикросекундного размыкателя на принципе искусственного инициирования краевых магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей на локальных неоднородностях шунтирующего проводника, находящегося под воздействием сильного магнитного поля. Цель — добиться того, чтобы быстро нарастающие неустойчивости за короткое время разрезали проводник.

Конструкция размыкателя и качественные закономерности его работы

Конструкция размыкателя схематично представлена на рис. 1 в двух вариантах исполнения. Как видно из рисунка, в обоих случаях шунтирующий проводник размыкателя расположен между коаксиальными шинами 1 и 2 передающей линии и представляет собой ряд последовательно установленных полых цилиндрических элементов (лайнеров) 3 с кольцевыми проточками 4 по

краям, разделенных торцевыми стенками 5. Местоположение проточек совпадает с местами локальных неоднородностей, по которым происходит рассечение проводника. В одном из вариантов конструкции ускорение лайнеров осуществляется радиально внутрь (рис. 1, а), а в другом — наружу (рис. 1, б).

Лайнерные элементы такого размыкателя имеют ряд особенностей:

— короткие (единицы миллиметров), что повышает число разрушаемых сегментов шунтирующего проводника и увеличивает его сопротивление в момент разрыва;

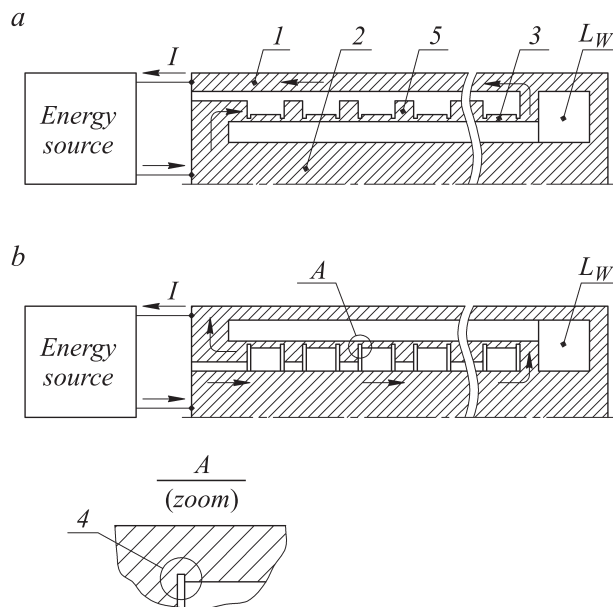


Рис. 1. Варианты исполнения размыкателей.

— размещены на минимально возможном по физическим и конструктивным ограничениям радиусе, обеспечивающем высокий уровень давления магнитного поля;
 — имеют небольшую пролетную базу, сравнимую с толщиной лайнеров, вследствие быстрого развития краевых неустойчивостей;
 — ускоряются в конденсированном состоянии.

Чем больше напряженность магнитного поля (линейная плотность тока), тем выше быстродействие размыкателя, поскольку это ускоряет процесс развития краевых неустойчивостей. Однако очевидно, что существует критический уровень напряженности магнитного поля, превышение которого приводит к нарушению работы размыкателя из-за чрезмерного энерговыделения в шунтирующей цепи. Минимально возможный радиус установки лайнерных элементов определяется этим критическим уровнем. Для грубой оценки разумно полагать минимальный радиус таковым, чтобы напряженность магнитного поля на поверхности лайнера существенно не превышала границу электровзрыва проводника. Для меди эта граница — $H_{\max} \approx 160 \text{ MA/m}$ (2 МОе), т.е. $I_m/r \approx 1 \text{ MA/mm}$, где I_m — амплитуда тока. Более точные данные для каждой конкретной геометрии размыкателя можно получить численным моделированием.

Учитывая, что лайнеры ускоряются в конденсированном состоянии, несложно найти приближенную аналитическую связь между толщиной лайнеров и параметрами электрического импульса на входе размыкателя. Пусть импульс тока поступает на вход размыкателя при разрыве контура индуктивного накопителя энергии, например ВМГ (рис. 2). В этом случае импульс тока на входе размыкателя с достаточной точностью можно представить в форме:

$$I_T(t) = I_m \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{t_f} \right)^2 \right] \right), \quad (1)$$

где

$$I_m = \frac{\Phi_G}{L_G + L_T}; \quad t_f = \sqrt{\frac{2L_G L_T}{(L_G + L_T)R_t}};$$

t_f — постоянная времени; $R_t = \left\langle \frac{dR}{dt} \right\rangle$ — средняя скорость нарастания сопротивления; Φ_G — начальный маг-

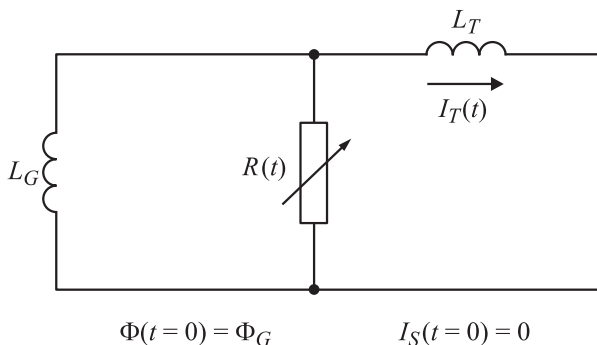


Рис. 2. Контур индуктивного накопителя энергии с узлом разрыва тока $R(t)$.

нитный поток в индуктивном накопителе L_G ; L_T — индуктивность входного контура размыкателя.

Процесс рассеяния шунтирующего проводника должен быстро завершаться после образования тонкой перетяжки в момент смещения лайнеров на расстояние Δr , сопоставимое с его начальной толщиной δ . Полагая $\Delta r/\delta = \varepsilon$, нетрудно убедиться, используя законы классической механики, что начальная толщина лайнера, необходимая для того чтобы размыкание произошло в момент t_c , определяется выражением:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \frac{\sqrt{\mu_0}}{2} \frac{H_m}{\sqrt{\rho}} t_c F_\delta \left(\frac{t_c}{t_f} \right), \quad (2)$$

при этом его скорость в момент размыкания составляет:

$$v = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\mu_0} \frac{H_m}{\sqrt{\rho}} F_v \left(\frac{t_c}{t_f} \right), \quad (3)$$

а достигаемый к моменту размыкания интеграл действия тока, усредненный по сечению проводника, оказывается равным:

$$J(t_c) = \frac{1}{(2\pi r \delta)^2} \int_0^{t_c} I_S^2(t) dt = \varepsilon \frac{4}{\mu_0} \frac{\rho}{t_c} F_j \left(\frac{t_c}{t_f} \right), \quad (4)$$

где $H_m = I_m/(2\pi r)$ — напряженность магнитного поля, соответствующая амплитудному значению тока I_m ; r — радиус установки лайнерных элементов размыкателя; ρ — плотность материала.

Графики безразмерных функций $F_v(t_c/t_f)$, $F_\delta(t_c/t_f)$, $F_j(t_c/t_f)$ представлены на рис. 3. Из графика $F_v(t_c/t_f)$ видно, что при $t_c/t_f > 2$ лайнер набирает более чем 90% от максимально возможной скорости. Полагая для оценки, что лайнеры медные, $t_c/t_f = 2.3$, $\varepsilon = 1.1$ и $H_m \approx 160 \text{ MA/m}$ (2 МОе), находим характерную для этих условий толщину лайнера $\delta \approx 1.4 \text{ mm}$. Усредненный по толщине лайнера интеграл действия тока составляет $J(t_c) \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ A} \cdot \text{sm}^{-4}$, что действительно указывает на конденсированное состояние лайнера [2].

Схему коммутации многоэлементного магнитодинамического размыкателя можно представить в виде, показанном на рис. 4. Здесь функция $\Omega(t)$ описывает изменение эффективного сопротивления цепи на участке разрыва тока с одним лайнерным элементом; n — количество лайнеров; L_Ω — индуктивность в выходном контуре размыкателя, приходящаяся на один лайнерный элемент; L_G — индуктивность источника энергии; L_T — индуктивность входного контура размыкателя; Φ_G — начальный магнитный поток во входном контуре размыкателя; t_c — момент начала срабатывания размыкателя; L_W, I_W — индуктивность и ток в нагрузке.

Если $\Omega_t = \left\langle \frac{d\Omega}{dt} \right\rangle$ — средняя скорость нарастания сопротивления при разрыве лайнерного элемента, то ток в нагрузке магнитодинамического размыкателя по

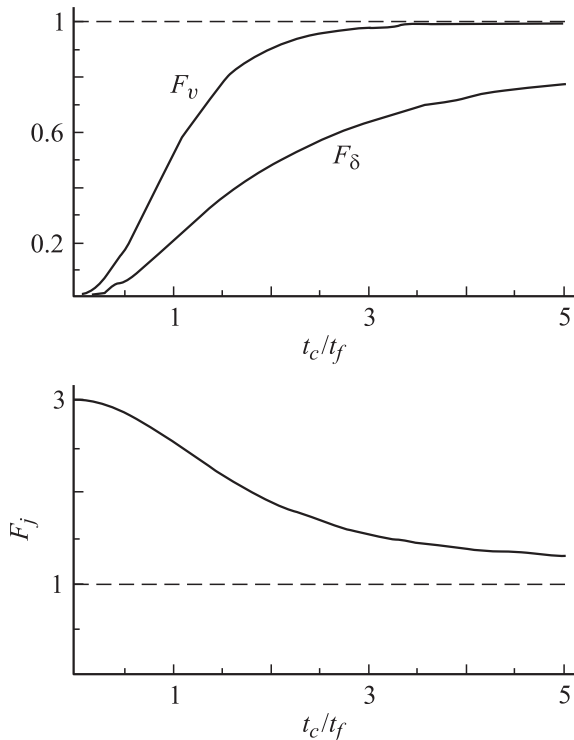


Рис. 3. Графики безразмерных функций $F_v(t_c/t_f)$, $F_\delta(t_c/t_f)$, $F_j(t_c/t_f)$.

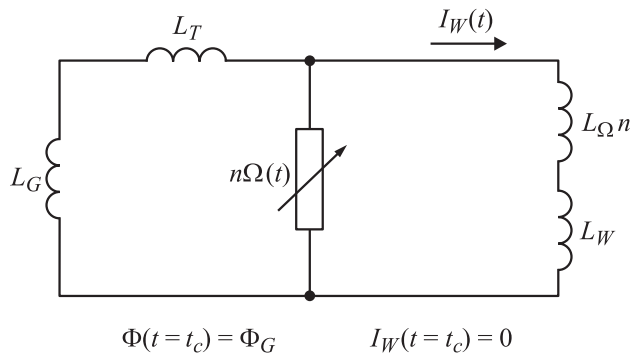


Рис. 4. Контур магнитодинамического размыкателя.

аналогии с (1) задается приближенным выражением:

$$I_W(t) = \frac{\Phi_G}{L_G + L_T + nL_\Omega + I_W} \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_c}{t_f} \right)^2 \right] \right), \quad (5)$$

а для характерного времени нарастания тока справедлива формула:

$$t_f(n) = \sqrt{\frac{2(L_G + L_W n^{-1})}{\Omega_t} \frac{k}{k+1}}, \quad (6)$$

где

$$k = \frac{L_G + L_T}{nL_\Omega + L_W}. \quad (7)$$

Из (6) следует, что при увеличении числа лайнерных элементов n и уменьшении их индуктивности L_Ω

фронт нарастания тока сокращается, причем предельное быстродействие размыкателя определяется значением

$$t_{f \min} = \sqrt{\frac{2L_\Omega}{\Omega_t}} \sqrt{\frac{k}{k+1}}. \quad (8)$$

Отметим, что параметр t_f и характерное время нарастания тока τ по уровню 0.1–0.9 от максимального значения I_m связаны соотношением $\tau \approx 1.193 t_f$.

Если при изменении радиуса линейная плотность тока $I(t)/r$, протекающего через лайнер, и толщина лайнеров сохраняются, то можно ожидать, что величина Ω_t будет обратно пропорциональна радиусу, поскольку сохраняются неизменными условия, определяющие динамику развития краевой неустойчивости. Индуктивность L_Ω также обратно пропорциональна радиусу при условии, что $\Delta r \ll r$:

$$L_\Omega \sim \ln \frac{r}{r - \Delta r} \approx \frac{\Delta r}{r}, \quad (9)$$

где Δr — зазор между лайнерным элементом и шиной передающей линии. Поэтому в соответствии с (8) быстродействие размыкателя остается постоянным.

При росте линейной плотности тока быстродействие размыкателя возрастает до тех пор, пока не превышено предельное значение напряженности магнитного поля.

Рассмотрим случай, интересный с точки зрения экспериментальной отработки размыкателей. Пусть внешняя нагрузка L_W отсутствует или очень мала, а коммутация осуществляется на собственную индуктивность размыкателя nL_Ω . Из (7) следует, что в этом случае характерное время (6) нарастания тока в нагрузке не зависит от числа лайнерных элементов и определяется выражением (8). Это дает возможность экспериментальной оценки предельного быстродействия многолайнерных размыкателей при проведении относительно простых экспериментов на размыкателях с одним лайнерным элементом. Для таких экспериментов можно ожидать, что индуктивность источника много больше индуктивности нагрузки, т.е. $k \gg 1$, поэтому электрические напряжения на входе размыкателя будут относительно невелики. Характерное время нарастания тока в нагрузке составит:

$$t_f(L_W = 0) \approx \sqrt{\frac{2L_\Omega}{\Omega_t}}. \quad (10)$$

Численное моделирование: постановка задачи

Для численного моделирования работы магнитодинамического размыкателя тока была разработана компьютерная программа решения системы МГД уравнений совместно с уравнениями, описывающими электрические цепи индуктивного (ВМГ) и емкостного источников энергии.

Для описания процессов в размыкателе использовалась следующая система уравнений одножидкостной

магнитной гидродинамики:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0; \\ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mathbf{j} \times \mathbf{H}; \\ \rho \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla q \right) = -P \operatorname{div}(\mathbf{u}) + \frac{j^2}{\sigma}; \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}; \\ \nabla \times \mathbf{H} = 4\pi \mathbf{j}; \\ \mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{H}); \\ P = P(T, \rho); \\ q = q(T, \rho); \quad \sigma = \sigma(T, \rho). \end{cases} \quad (11)$$

Здесь ρ — массовая плотность вещества, \mathbf{u} — скорость вещества, P — давление, \mathbf{j} , \mathbf{H} , \mathbf{E} — векторы плотности тока, магнитного и электрического поля, σ — электрическая проводимость, q — удельная энергия вещества (энергия в единице массы). В расчетах были использованы уравнение состояния меди и зависимость ее проводимости от температуры и плотности из работы [3].

В зависимости от источника энергии, записывающего размыкатель, к уравнениям (11) добавлялась либо система уравнений (12) для индуктивного накопителя, снабженного обострителем тока (ВМГ) (рис. 5, *a*), либо система уравнений (13) для конденсаторной батареи

(КБ) (рис. 5, *b*):

$$\begin{cases} L_G \frac{dI_G(t)}{dt} + R(t)I_R(t) = 0, \\ R(t)I_R(t) = L_T \frac{dI_S(t)}{dt} - U_S(t), \\ R(t) = R_t t, \\ U_S = -\frac{d}{dt} \left(\int_S H_\varphi dS \right), \\ I_G(0) = I_0, \quad I_R(0) = I_0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} L_C \frac{dI_C}{dt} + R_C I_C - U_C - U_S = 0, \\ C \frac{dU_C}{dt} = -I_C, \\ U_S = -\frac{d}{dt} \int_S H_\varphi dS, \\ I_C(0) = 0, \quad U_C(0) = U_0. \end{cases} \quad (13)$$

В (13) введены обозначения: C , I_C , U_C — емкость, электрический ток и напряжение КБ; R_C , L_C — сопротивление и индуктивность контура. Символом U_S в (12) и (13) обозначено напряжение на входе размыкателя.

Параметры источников энергии и магнитодинамических размыкателей (МДР) указаны в табл. 1 и 2. Во всех расчетах предполагалось, что размыкатели изготовлены из меди, длина лайнерного элемента — 8 мм. В размыкателях, запитываемых от СВМГ, разгон лайнерных элементов происходил радиально внутрь; в размыкателях, запитываемых от КБ, — радиально наружу.

Программный код для решения задачи в данной постановке был написан одним из авторов — Шайдуллин В.Ш.

Результаты численного моделирования для МДР, запитываемых от СВМГ

В соответствии с данными табл. 1 лайнеры имеют одинаковую толщину во всех вариантах расчетов, но разный радиус уставки, зависящий от энергоемкости СВМГ. В вариантах 1, 2 лайнерные элементы размыкателя расположены на радиусе 11.2 мм, в вариантах 3 и 4 — на радиусе 16 мм. В соответствии с заданными значениями $R(t)$ фронт нарастания тока на входе размыкателей во всех расчетах составляет $\tau \approx 1.5 \mu\text{s}$ по уровню 0.1–0.9 от максимального значения I_m .

Результаты расчета режима коммутации одолайнерного МДР для вариантов 1 и 2 из табл. 1 представлены на рис. 6 ($I_m/r \approx 1.13 \text{ MA/mm}$). Эти варианты идентичны, за исключением того, что в варианте 1 кольцевые проточки на краях лайнера отсутствуют. Входной ток

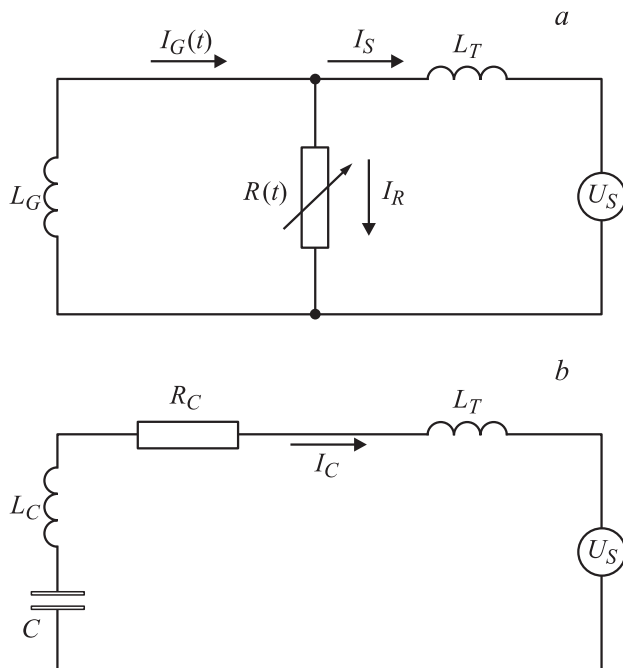


Рис. 5. Запитывающий контур размыкателя: *a* — с индуктивным, *b* — емкостным источниками энергии.

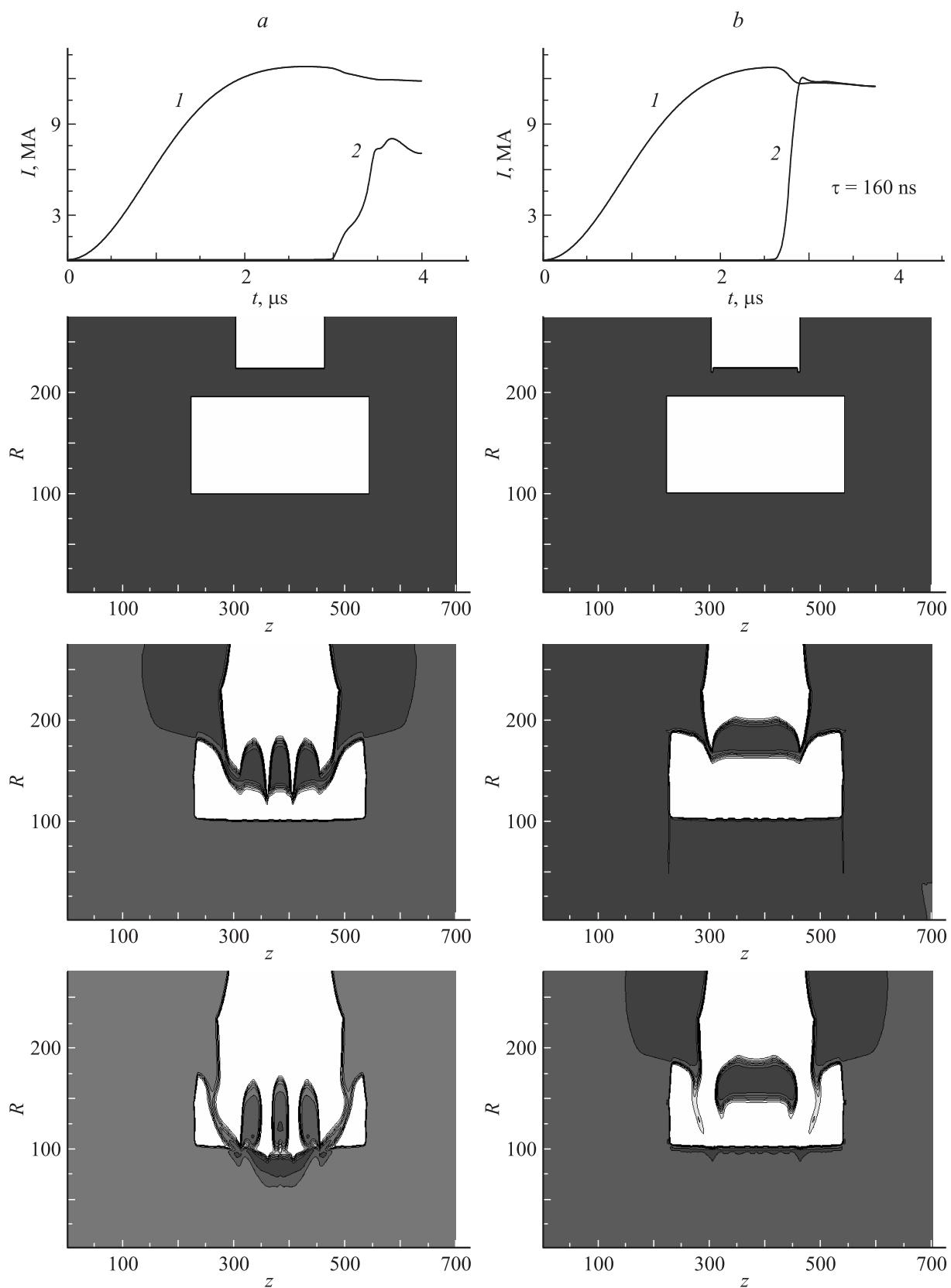


Рис. 6. Результаты расчета режима коммутации однолинейного МДР для вариантов 1 (а) и 2 (б) из табл. 1 (шаг сетки 0.05 mm).

Таблица 1. Исходные данные для расчетов МДР, запитываемого от СВМГ

Вариант №	Параметры СВМГ					Параметры размыкателя					
	E, mJ	L_G, nH	L_T, nH	I_0, MA	$R(t), \text{m}\Omega$	лайнеры n	r, mm	δ, mm	L_Ω, nH	L_W, nH	проточки $0.2 \times 0.2 \text{ mm}$
1	4.84	20	12.6	22	$10.2 t$	1	11.2	1.4	2.15	0	Нет
2					$t, \mu\text{s}$	1			2.15		
3	13.5	30	13	30	$11.8 t$	1	16	1.4	1.38	0	Есть
4					$t, \mu\text{s}$	3			1.15		

Таблица 2. Исходные данные для расчетов МДР, запитываемого от КБ

Вариант №	Параметры КБ					Параметры размыкателя				
	E, mJ	$C, \mu\text{F}$	U_0, kV	L_C, nH	$R_C, \text{m}\Omega$	лайнеры n	r, mm	δ, mm	$L_\Omega + L_W, \text{nH}$	проточки по краям
1	2.0	720	75	18	2.0	1	10	1.0	1.4	Нет
2	0.5	492	44	24	2.8	1	8	0.65	1.5	Нет
3							12	0.4	7.4	

размыкателя равен примерно 12.7 МА. Как следует из рисунка, отсутствие краевых проточек нарушает процесс коммутации. Это является следствием спонтанного развития МГД неустойчивостей. Нанесение проточек стабилизирует процесс и обеспечивает фронт нарастания тока на выходе размыкателя, равный $\tau \approx 160 \text{ ns}$. Предельное быстродействие размыкателя при $k = 1$ в соответствии с (8): $\tau = 160 \text{ ns} \cdot 2^{-1/2} \approx 113 \text{ ns}$.

В расчетах 3, 4 выходные параметры СВМГ подобраны таким образом, что создают увеличенное примерно на 10% отношение I_m/r . В этих расчетах фронт нарастания тока на выходе однолайнерного размыкателя оказался равен 155 ns, а для размыкателя с тремя лайнерными элементами — 140 ns при амплитудах входного тока 19.8 и 18.7 Ма соответственно (рис. 7). Предельное быстродействие размыкателя (8) при указанном уровне отношения I_m/r : $\tau = 140 \cdot 2^{-1/2} \approx 99 \text{ ns}$ (полагаем $k = 1$).

Результаты численного моделирования для МДР, запитываемых от КБ

При разгоне лайнеров радиально наружу должна наблюдаться некоторая стабилизация их движения по отношению к развитию спонтанных МГД неустойчивостей. Чтобы проверить это, расчеты проводились без кольцевых проточек по краям лайнеров.

В первом расчете (см. табл. 2) отношение I_m/r равнялось примерно 1 МА/мм при толщине лайнера 1 мм, во втором и в третьем — $I_m/r \approx 0.5$ и 0.33 МА/мм при толщине лайнера 0.65 и 0.4 мм соответственно.

Результаты первого и второго расчетов представлены на рис. 8. Из рисунка видно, что при ускорении в обратном направлении действительно происходит снижение амплитуды возмущений по сравнению с расчетом для лайнера, ускоряемого вовнутрь (рис. 6, а). Длительность

фронта нарастания тока на выходе размыкателя в первом и втором расчетах составила соответственно — $\tau \approx 200$ и 350 ns. В обоих случаях коммутация происходит на третьей–четвертой микросекундах нарастания тока. В первом варианте расчета коммутируется ток амплитудой около 10 МА, во втором — примерно 4 МА.

Графики входного и выходного токов размыкателя для третьего расчета приведены на рис. 9 в сопоставлении с экспериментальными результатами, обсуждаемыми в следующем разделе. Для этого варианта при амплитуде разрядного тока КБ около 4 МА расчетный фронт нарастания тока — 700 ns.

Предельное быстродействие размыкателя (8) при $k = 1$ в первом, втором и третьем случаях соответственно: $\tau \approx 140, 250$ и 500 ns.

Экспериментальные результаты

С целью проверки расчетной модели проведены три эксперимента на конденсаторной установке. Их постановка соответствовала третьему расчетному варианту в табл. 2, как наиболее простому в реализации. Размыкатель записывался током КБ амплитудой 4.3–4.5 МА. В экспериментах использовалась вакуумная изоляция токоведущих элементов.

Результаты экспериментов очень близки. Для одного из них они представлены на рис. 9. Во всех трех экспериментах наблюдалось смещение момента коммутации примерно на 2 μs на более позднее время по сравнению с расчетным значением. Длительность фронта нарастания тока оказалась равной 750–800 ns вместо ожидавшейся $\tau \approx 700 \text{ ns}$. Полученные результаты удалось объяснить, предположив, что под лайнером происходил шунтирующий пробой, который возникал до начала процесса коммутации. Наличие шунтирующего пробоя

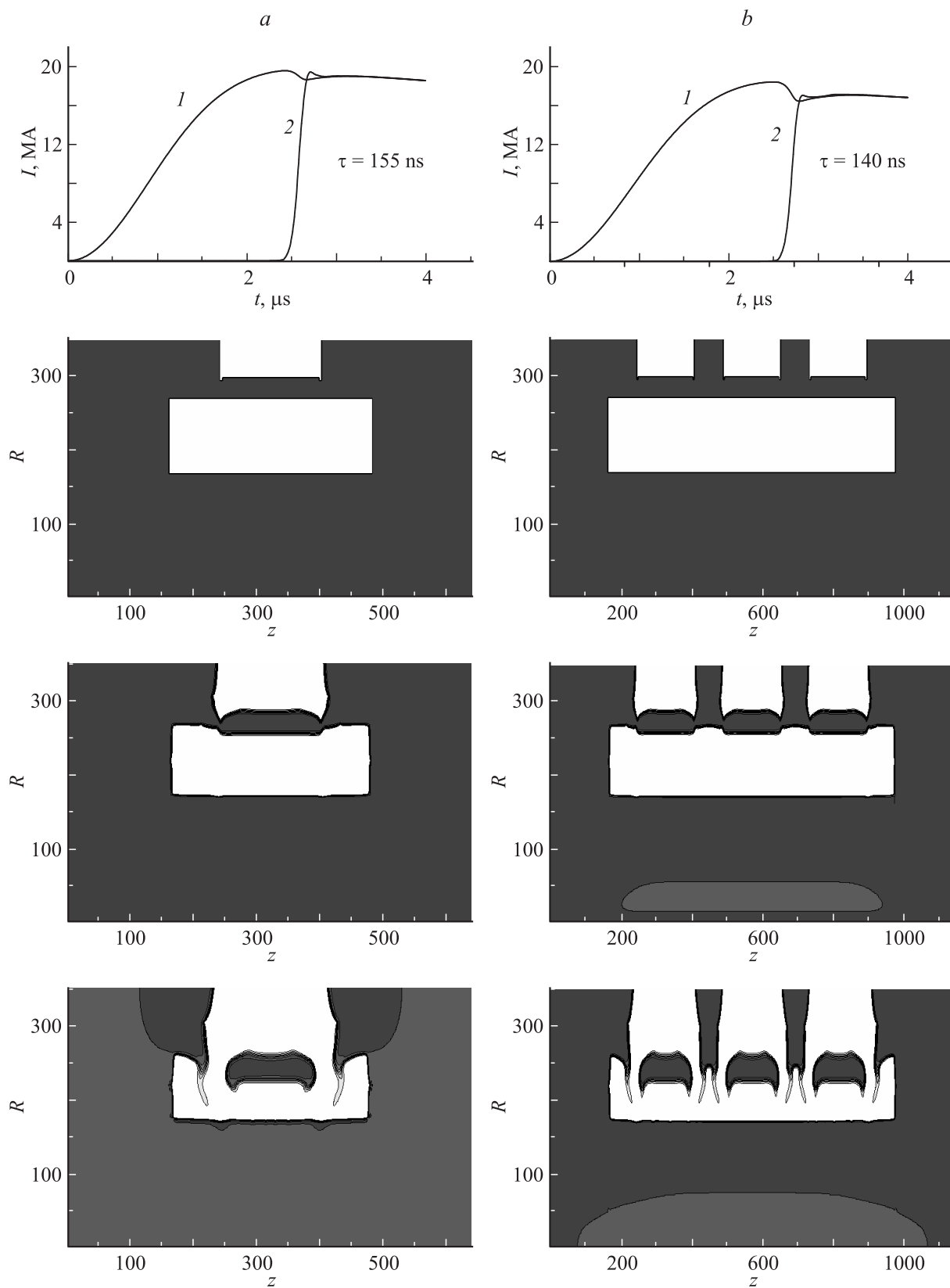


Рис. 7. Результаты расчета режима коммутации МДР для вариантов 3 (a) и 4 (b) из табл. 1 (шаг сетки 0.05 mm).

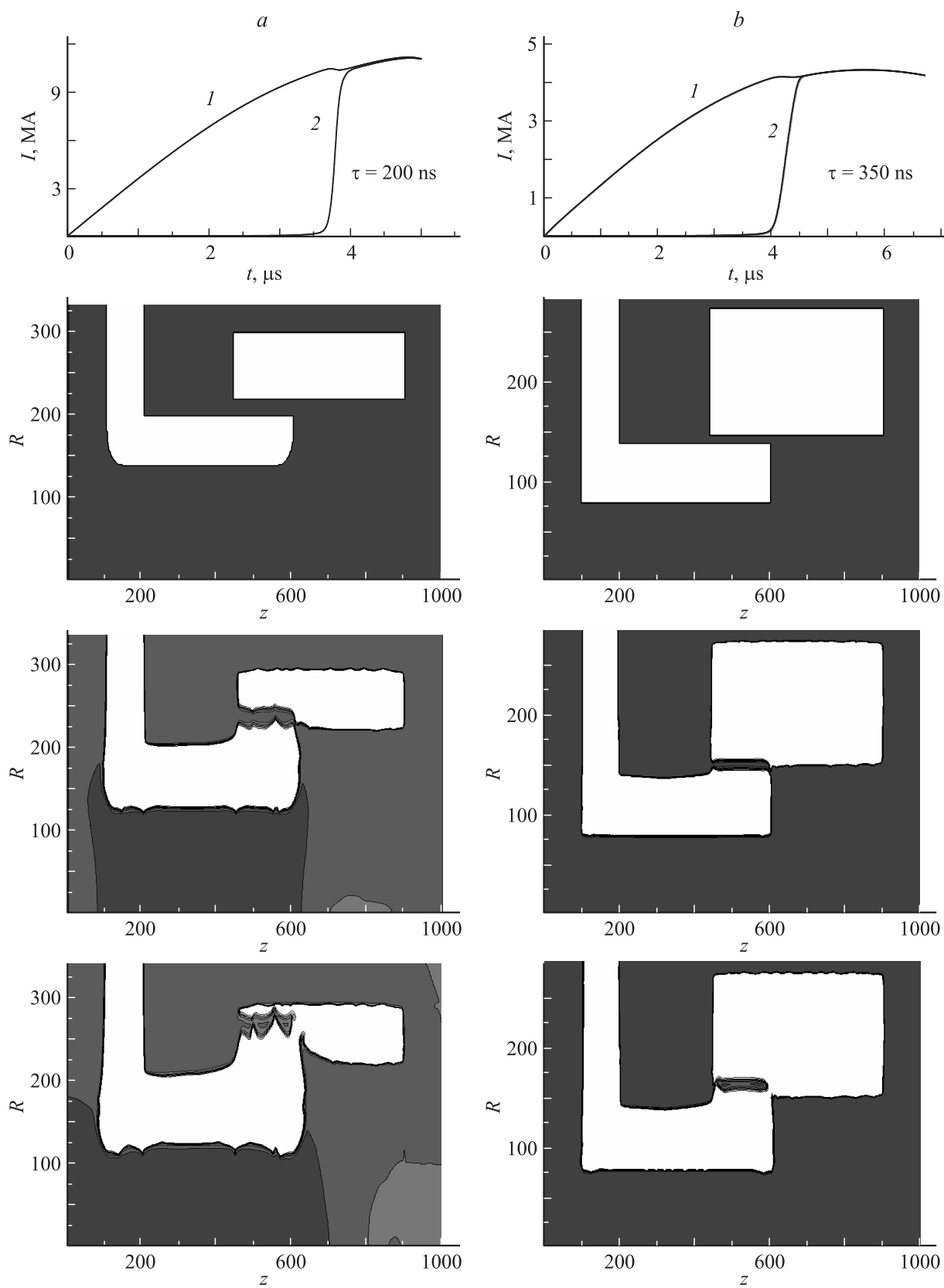


Рис. 8. Результаты расчета режима коммутации МДР для вариантов 1 (а) и 2 (b) из табл. 2 (шаг сетки 0.05 mm).

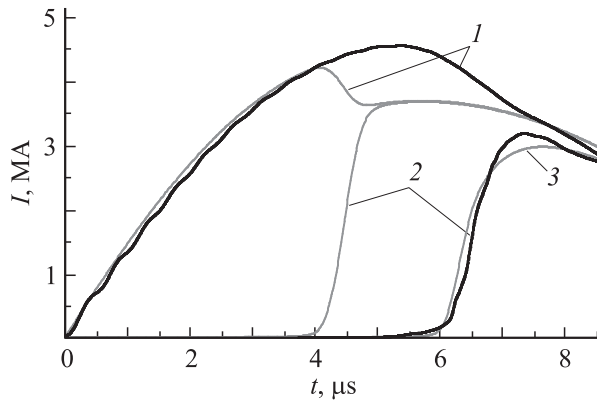


Рис. 9. Результаты эксперимента на КБ, проведенного по варианту 3 табл. 2 в сопоставлении с результатами расчета: 1 — входной, 2 — выходной токи размыкателя (эксперимент), 3 — расчетный выходной ток при учете шунтирующего пробоя.

было смоделировано в расчете включением параллельно нагрузке U_S на рис. 5, b активного сопротивления. Расчет удовлетворительно совпадал с экспериментом при сопротивлении $1.5–1.7 \text{ m}\Omega$, которое в момент коммутации возросло на порядок (см. кривую 3 на рис. 9).

Предположение о возможном пробое было проверено экспериментально. Для этого пространство под лайнером было заполнено диэлектриком, исключающим возможность преждевременного пробоя. Наблюдавшийся в этом опыте момент начала коммутации размыкателя совпал с расчетным. Однако фронт нарастания тока оказался затянутым из-за испарения поверхностного слоя материала. Поэтому использование диэлектрических материалов взамен вакуумной изоляции представляется нецелесообразным.

В связи с этим отметим важную особенность работы размыкателя с вакуумной изоляцией. Одновременно со срабатыванием размыкателя происходит прерывание шунтирующего пробоя. Как следствие, он слабо влияет на амплитуду тока, переключаемого в нагрузку (некоторое падение амплитуды переключаемого тока в эксперименте связано с колебательным характером разряда КБ). В процессе коммутации наблюдается тенденция восстановления амплитудного значения давления магнитного поля на лайнер. Поскольку характерное время коммутации определяется в основном значением давления на завершающей стадии развития краевой неустойчивости, то, как показали модельные эксперименты и расчеты, пробой под лайнером и связанная с этим задержка переключения не влияют существенно на быстродействие размыкателя (см. рис. 9).

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о возможности создания субмикросекундных размыкателей

тока мультимегаамперного диапазона, принцип действия которых основан на использовании эффекта быстрого развития краевых МГД неустойчивостей.

Предложенное техническое решение размыкателя представляет собой ряд последовательно установленных в коаксиальной передающей линии лайнерных элементов с кольцевыми проточками по краям, ускоряемых давлением магнитного поля на короткой пролетной базе, сравнимой с толщиной лайнеров. Причем лайнеры отделены друг от друга торцевыми стенками, вдоль которых развиваются краевые неустойчивости. Кольцевые проточки позволяют избежать развития спонтанных МГД неустойчивостей, разрушающих лайнер. Их стабилизирующая роль в наибольшей степени проявляется при разгоне лайнеров радиально внутрь. При разгоне лайнерных элементов радиально наружу проточки в отдельных случаях могут не выполняться, так как в силу зависимости $H \sim I/r$ стабилизирующую функцию выполняет магнитное поле.

Размыкатель обладает рядом особенностей:

- работает в режиме разгона конденсированных лайнеров;

- быстродействие размыкателя слабо зависит от флуктуаций длительности фронта нарастания входного тока и определяется в основном амплитудным значением линейной плотности тока на лайнерных элементах I_m/r , возрастающей с ростом этой величины;

- может применяться для обострения импульсов тока с длительностью фронта нарастания от нескольких единиц до десяти микросекунд и амплитудой в десятки мегаампер;

- предельное быстродействие размыкателя при $I_m/r \approx 1.1–1.2 \text{ MA/mm}$ достигает по расчетам значения около 100 ns .

Серия экспериментов на конденсаторной установке, проведенная на моделях размыкателя при токах амплитудой $4.3–4.5 \text{ MA}$ с временем нарастания $\sim 5 \mu\text{s}$, показала хорошее совпадение экспериментальных результатов с расчетными предсказаниями (параметр I_m/r составлял примерно 0.33 MA/mm).

Список литературы

- [1] Proc. IXth Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. P. Current Pulse Conditioning / Ed. by V.D. Selemir, L.N. Plyashkevich. Sarov, VNIIEF, 2004. P. 289–391.
- [2] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. Гл. 4. С. 105.
- [3] Бакулин Ю.Д., Куропатенко В.Ф., Лучинский А.В. // ЖТФ. 1976. Т. 46. С. 1963.