

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ «КАСКАД» МОДЕЛИ СУБМИКРОСЕКУНДНОГО МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ОТКРЫВАЮЩЕГО КЛЮЧА

### RESULTS OF INVESTIGATION OF THE SUBMICROSECOND MAGNETODYNAMIC OPENING SWITCH MODEL ON "CASCADE" CAPACITOR FACILITY

*A. A. Bazanov, A. V. Ivanovskiy, A. I. Kraev, N. I. Pozdov, A. F. Rybakov, S. S. Sokolov, A. I. Panov,  
A. V. Samodolov, V. S. Shaidullin*

*A. A. Bazanov, A. V. Ivanovsky, A. I. Kraev, N. I. Pozdov, A. F. Rybakov, S. S. Sokolov, A. I. Panov,  
A. V. Samodolov, V. S. Shaidullin*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

В докладе представлены результаты экспериментального исследования модели субмикросекундного магнитодинамического открывающего ключа при токах коммутации  $\sim 4$  МА. Эксперименты проводились с коммутационными элементами, выполненными из меди и алюминия. Дано сопоставление полученных результатов с расчетом.

The paper presents the results of the experimental study of a model of a submicrosecond magnetodynamic opening switch at the switching current of  $\sim 4$  MA. The experiments have been conducted using the switching elements from copper and aluminum. The experimental results are compared with the calculations.

#### Введение

Одной из актуальных задач сильноточной электрофизики является создание быстродействующих открывающих ключей субмикросекундного диапазона, предназначенных для выведения энергии в нагрузку из накопительных индуктивных контуров энергоёмких конденсаторных батарей и взрывоманитных генераторов (ВМГ). Это связано с тем, что для источников мультимегаамперных импульсов тока эта задача в полной мере не решена [1]. Между тем, потребность в применении таких ключей возникает при проведении исследований в области физики высоких плотностей энергии, которые требуют достижения высокой мощности энерговыделения в нагрузке. Для решения этой задачи в работах [2–4] предложено использовать магнитодинамический размыкатель тока (МДР). Его принцип действия основан на быстром развитии краевых магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей, возникающих под влиянием давления магнитного поля на искусственно вносимых в шунтирующий коммутационный проводник локальных неоднородностях, что

приводит к рассечению проводника и выведению магнитного потока через разрывы. В этих работах дано физическое обоснование и приведены результаты расчетного моделирования МДР, которые указывают на возможность получения с помощью размыкателя такого типа импульсов тока с фронтом нарастания 0,1–1 мкс в зависимости от временных характеристик источника. Там же приведены первые результаты проверки на соответствие использованной расчетной модели эксперименту. Данная работа является продолжением начатых исследований. В ней представлены результаты расширенной экспериментальной отработки МДР на электрофизической установке КАСКАД с целью верификации расчетной модели.

#### Постановка экспериментов

В экспериментах использовался одноэлементный магнитодинамический размыкатель, схематично изображенный на рис. 1.

В табл. 1 приведены размеры размыкателя в соответствии с обозначениями рисунка. Размер  $R_4$ , определяющий толщину стенки цилиндри-

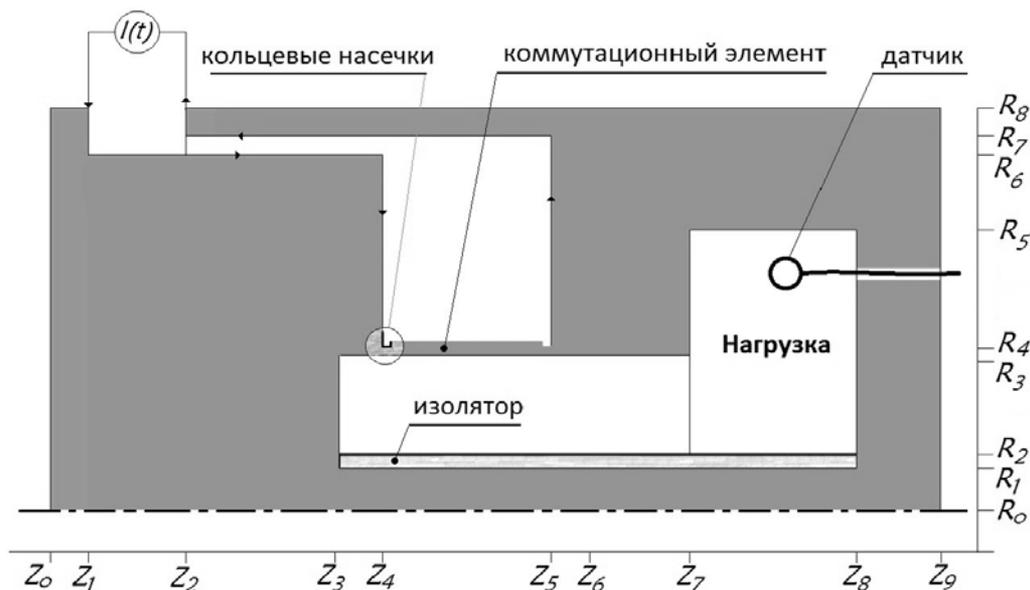


Рис. 1. Геометрия магнитодинимического размыкателя

ческого коммутационного элемента, варьировался в экспериментах, поэтому указан в таблице в виде интервала значений. В ряде экспериментов по краям коммутационного элемента наносились кольцевые насечки-пазы размером  $0,16 \times 0,16$  мм. Коммутатор конструктивно объединялся с индуктивной нагрузкой величиной  $4,5$  нГн, представлявшей собой кольцевую полость, в которую устанавливались два измерительных датчика, регистрировавших производную тока в нагрузке.

Таблица 1

Геометрия одноэлементного МДР (см. рис. 1)

Размеры вдоль оси симметрии, мм								
$Z_0$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$
0	5	11	5	14	22	27	34	39
Радиальные размеры, мм								
$R_0$	$R_1$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	
0	4	8	8,5–8,8	15	16	21	26	

МДР включался в разрядный контур конденсаторной батареи установки КАСКАД, как показано на рис. 2.

Обозначения и параметры разрядного контура:  $C = 492$  мкФ – ёмкость конденсаторной батареи;

$L_C = 14,4$  нГн – суммарная индуктивность конденсаторной батареи (КБ) и токосборника;

$L_T = 7.6$  нГн – индуктивность передающей линии от токосборника до коммутационного элемента МДР;

$R_C = 2.5$  МОм – эффективное сопротивление КБ, учитывающее потери энергии в системе её коммутации;

$U_0 = 43$  кВ – зарядное напряжение КБ, при котором проводились эксперименты;

$U_S(t)$  – напряжение на входе размыкателя;

$P$  – система коммутации КБ (12 двухканальных управляемых твердотельных разрядников).

Конструктивное исполнение узла МДР представлено на рис. 3.

Перед проведением разряда МДР вакуумировался до уровня не хуже  $1,0 \cdot 10^{-3}$  Торр.

### Результаты экспериментов

Эксперименты проводились для МДР с коммутационным элементом, выполненным из меди марки М1 и алюминия марок А0 (мягкий алюминий) и АМг6 (относительно твердый конструкционный сплав на основе алюминия).

На рис. 4 приведены результаты четырёх экспериментов с медными коммутационными элементами размыкателя со стенками толщиной  $0,5$  и  $0,6$  мм, как с насечками по краям, так и без них. Как следует из рисунка, наилучшие результаты получены при толщине стенки  $0,5$  мм без насечек и  $0,6$  мм с насечками.

На рис. 5 дано сопоставление эксперимента с расчётом для МДР с медным коммутационным элементом толщиной  $0,5$  мм без насечек. Расчёты

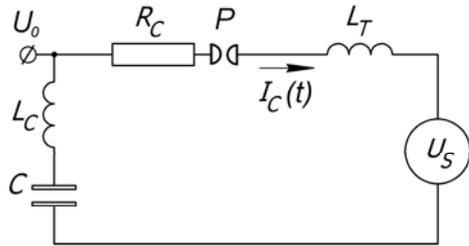


Рис. 2. Схема включения МДР в разрядный контур

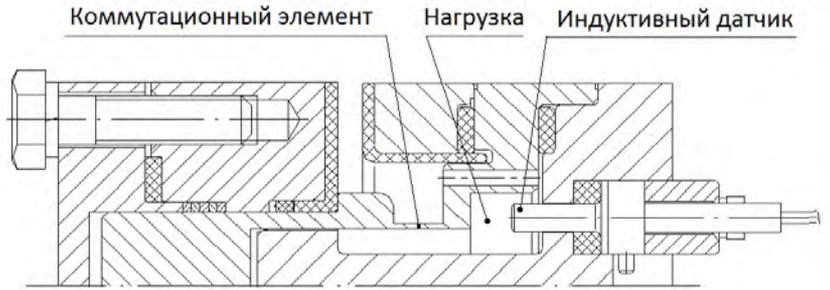


Рис. 3. Конструктивное исполнение МДР

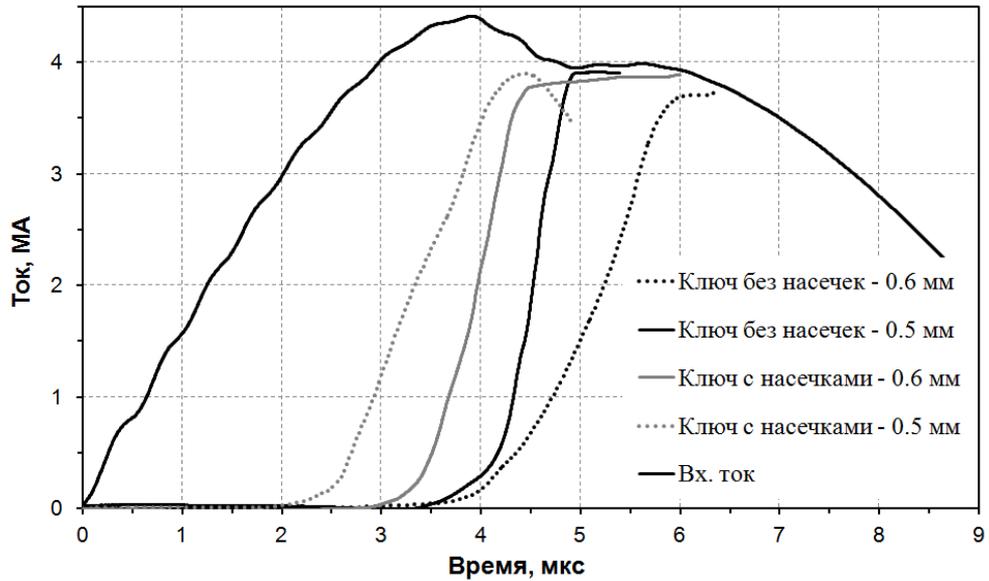


Рис. 4. Результаты экспериментов для МДР с медным коммутационным элементом

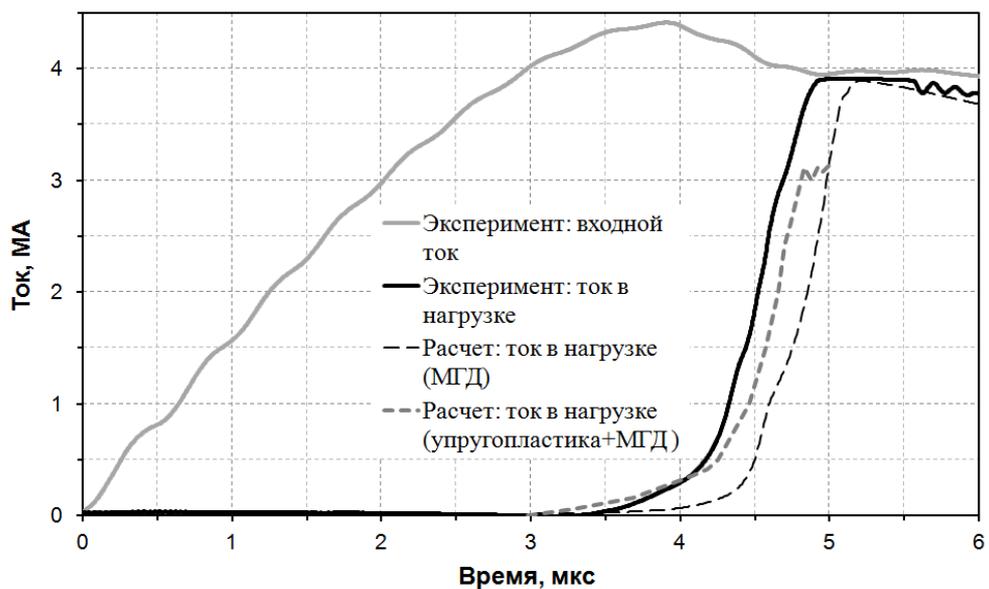


Рис. 5. Эксперимент и расчёт для МДР с медным коммутационным элементом толщиной

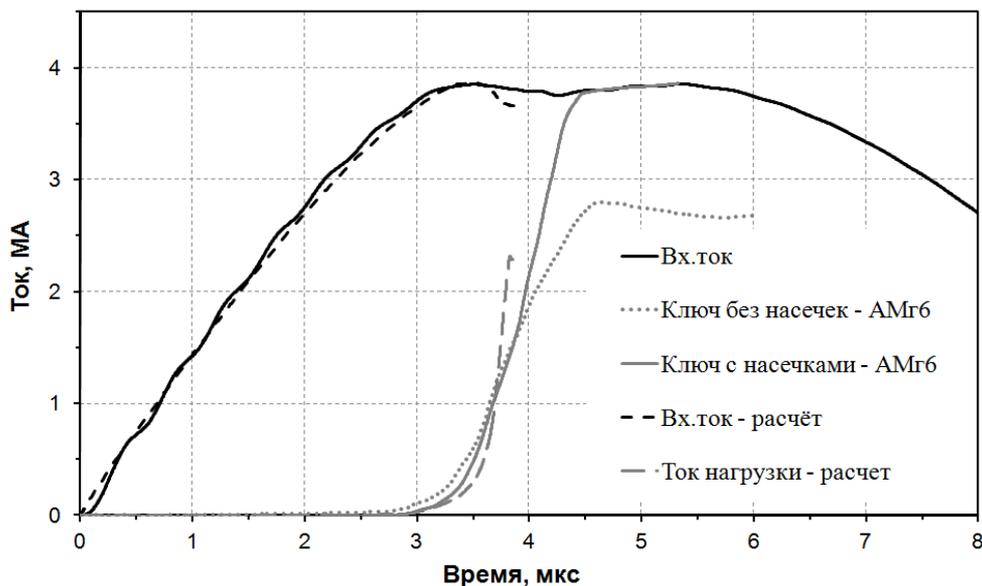


Рис. 6. Результаты экспериментов с ключом-размыкателем из твердого алюминиевого сплава (АМг6) и мягкого (А0) алюминия с кольцевыми насечками

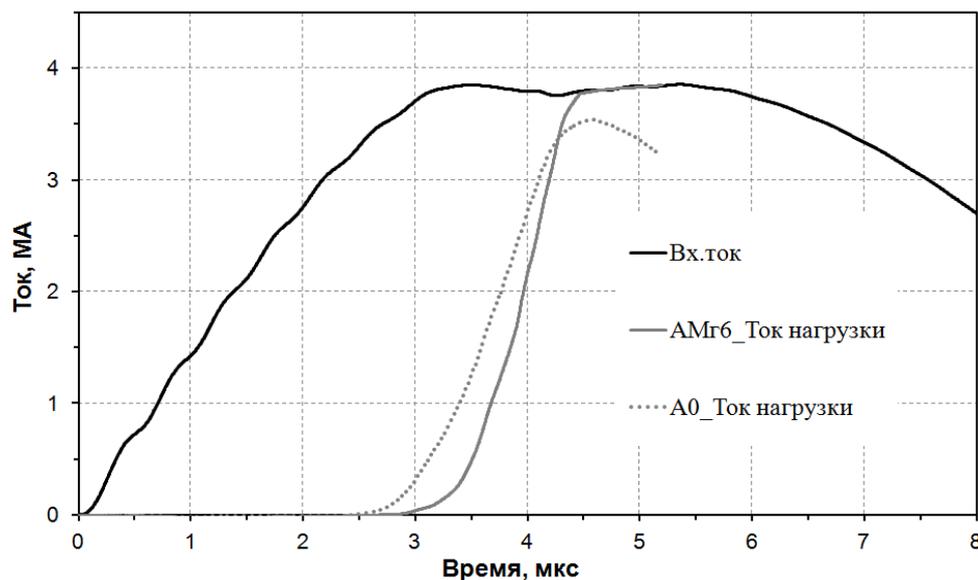


Рис. 7. Результаты экспериментов с ключом-размыкателем из твердого алюминиевого сплава (АМг6) и мягкого (А0) алюминия с кольцевыми насечками

выполнены по двум методикам: на лагранжевой сетке с учетом упругопластических свойств материала и без упругопластики в чисто магнитогидродинамическом приближении на элеровой сетке. Как видно, для меди наблюдается удовлетворительное соответствие между расчетом и экспериментом за тем исключением, что на практике отсутствовал обрыв тока на уровне 3 МА, имеющий место в расчетах на лагранжевой сетке.

На рис. 6 представлены результаты экспериментов с алюминиевым ключом-размыкателем из

сплава АМг6 с кольцевыми насечками и без насечек по краям коммутационного элемента, а также результаты расчетного моделирования. Отметим, что результаты расчетов для коммутационных элементов на основе алюминия с насечками и без насечек, практически, совпадают, поэтому по отдельности на графике не приводятся.

На рис. 7 дано сравнение коммутационных кривых, полученных при проведении экспериментов с ключом-размыкателем из твердого алюми-

ниевое сплава АМг6 и мягкого алюминия А0 с кольцевыми насечками.

Из графиков на рис. 6–7 следует, что в случае коммутационного элемента на основе алюминия наибольшим быстродействием обладают размыкатели с насечками по его краям, изготовленные из твердого алюминиевого сплава АМг6.

Результаты экспериментов сведены в табл. 2. В таблице приведены данные по быстродействию одноэлементного МДР по фронту нарастания тока 0,1...0,9 в зависимости от материала коммутационного элемента и наличия цилиндрических насечек по его краям.

Таблица 2

## Быстродействие одноэлементного МДР

Фронт нарастания тока	Материал	Толщина коммутационного элемента (мм) и наличие насечек по краям					
		0,5 б/н	0,5 н	0,6 б/н	0,6 н	0,8 б/н	0,8 н
τ, мкс	Сu	0,72	1,36	1,5	0,83	---	---
	АМг6	---	---	---	---	1,1	0,83
	А0	---	---	---	---	---	1,13

(обозначения в таблице: б/н – без насечек, н – с насечками).

## Выводы

Результаты экспериментов на установке КАСКАД с моделями магнитодинамических размыкателей показали, что при фронте нарастания тока ~ 4 мкс и его амплитуде ~ 4,0 МА:

а) Максимальное быстродействие размыкателя из меди составляет около 0,7 мкс, что согласуется с результатами расчетного моделирования.

б) Максимальное быстродействие размыкателя из алюминия – 0,9 мкс, что примерно в два раза хуже расчетных ожиданий. Причем наилучшее

быстродействие наблюдается на твердых сплавах алюминия типа АМг6.

с) Нанесение насечек по краям коммутационного элемента увеличивает амплитуду переключаемого в нагрузку тока, делает фронт нарастания тока почти линейным, а начальный участок кривой переключения – круче.

## Список литературы

1. Proceedings of IXth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Part: Current Pulse Conditioning. Ed. by Selemir V.D., Plyashkevich L.N. Sarov, VNIIEF. 2004. P. 289–391.

2. Базанов А. А., Ивановский А. В., Шайдуллин В. Ш. Магнитодинамический размыкатель тока с субмикросекундным временем переключения // ЖТФ. 2011. Т. 81, Вып. 7. С. 132–140.

3. Патент на изобретение, RU 2 467 426 С1, МПК Н01Н 39/00, Н03К 3/53. «Способ и устройство для формирования импульса тока в нагрузке». А. А. Базанов, А. В. Ивановский, В. Ш. Шайдуллин. Приоритет от 26.04.2011. Опубликовано 20.11.2012. Бюл. № 32.

4. Базанов А. А., Ивановский А. В., Шайдуллин В. Ш. Модель дискового взрывомагнитного генератора с магнитодинамическим формирователем субмикросекундного импульса тока в лайнерной нагрузке // ЖТФ. 2014. Т. 84, Вып. 4. С. 136–144.

5. Базанов А. А., Ивановский А. В., Панов А. И., Самодолов А. В., Соколов С. С., Шайдуллин В. Ш. Сравнительное моделирование режимов коммутации взрывомагнитных генераторов магнитодинамическими размыкателями тока из меди и алюминия с учетом упругопластических свойств материалов // ЖТФ. 2017, № 6.