



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011–17
ОУ У-70

Б.В. Казьмин, В.В. Анушат¹, К. Далеруп-Петерсен²,
Г. Коелинг², М.П. Овсиенко, В.А. Сычёв, Н.Н. Ярыгин

**Разработка расчётной модели контактного
промежутка быстродействующего размыкателя
постоянного тока для анализа особенностей работы
ключей LHC/ DQSB системы вывода энергии
из основных кольцевых электромагнитов LHC**

¹ ЗАО «Энергомаш-Уралэлектротяжмаш», г. Екатеринбург

² ЦЕРН, Женева

Протвино 2011

Аннотация

Казьмин Б.В. и др. Разработка расчётной модели контактного промежутка быстродействующего размыкателя постоянного тока для анализа особенностей работы ключей LHC/DQSB системы вывода энергии из основных кольцевых электромагнитов LHC: Препринт ИФВЭ 2011-17. – Протвино, 2011. – 16 с., 6 рис., 3 табл., библиогр.: 6.

В работе представлены результаты моделирования быстродействующего электромагнитного размыкателя типа ВАБ49, входящего в состав ключей LHC/DQSB системы защиты сверхпроводящих кольцевых электромагнитов БАК ЦЕРН. Модель размыкателя основана на анализе электромагнитных процессов в контактном промежутке данного размыкателя при его размыкании.

Abstract

Kazmin B.V. et al. Developing of the Contact Interval Rated Model of the High-speed DC Circuit Breaker VAB 49 for the Analysis of Work Features of LHC/DQSB Switches of Energy Extraction System out of LHC Main Ring Magnets: IHEP Preprint 2011-17. – Protvino, 2011. – p. 12, figs. 6, tables 3, refs.: 6.

The paper presents the results of the modeling of the VAB49 high-speed electromagnetic breaker which is a part of the QBS switches of the LHC superconducting magnet protection system. The breaker model is based on the analysis of electromagnetic processes in contact interval of the given breaker at the time of its disconnecting.

1. Введение

Экспериментальные исследования ключа LHC/DQSB системы вывода энергии из основных кольцевых электромагнитов LHC выявили некоторые особенности поведения быстродействующих размыкателей постоянного тока типа ВАБ49, объединённых в последовательно-параллельную группу. Схемы системы вывода энергии одного октанта LHC и комплекта ключа LHC/DQSB показаны на рис. 1а,б, а их параметры описаны в [1, 2].

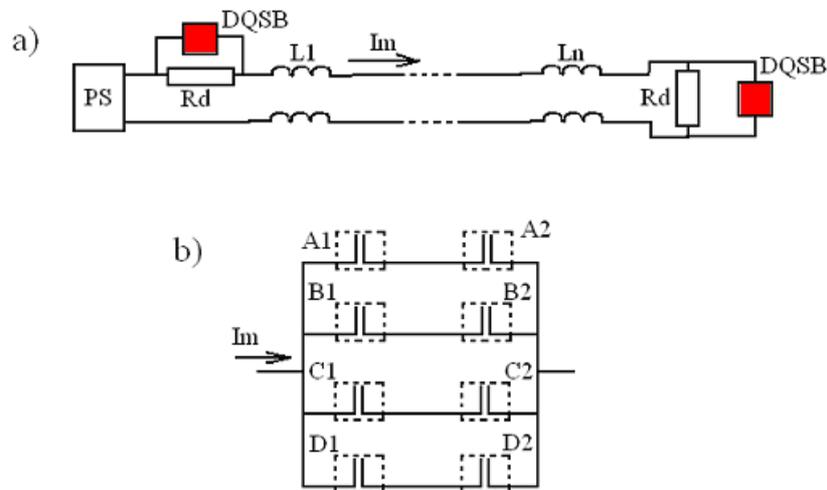


Рис. 1. а) схема вывода энергии из октанта кольцевого магнита LHC: R_d – резистор - поглотитель энергии, PS – источник питания; б) схема ключа LHC/DQSB: A1,2; B1,2; C1,2; D1,2 – размыкатели постоянного тока ВАБ49.

К этим особенностям относятся:

- 1) качественное изменение в поведении отдельных размыкателей, составляющих комплект ключа LHC/DQSB, выражающееся в явлении обрыва и последующего восстановления электрической дуги в размыкателе, никогда прежде не наблюдавшемся при работе одиночного размыкателя;
- 2) изменение динамических показателей ключа LHC/DQSB, выражающееся в увеличении времени размыкания тока ключом по сравнению с ожидаемым значением, равным времени размыкания самого медленного размыкателя, участвующего в процессе;
- 3) увеличение ресурсных показателей размыкателей в составе ключа LHC/DQSB по сравнению с полученными значениями для одиночных размыкателей.

Анализ причин появления отмеченных особенностей потребовал разработки расчётной модели контактного промежутка одиночного быстродействующего размыкателя постоянного тока типа ВАБ49 .

Использование расчётной модели даст возможность более точно оценить эксплуатационные характеристики системы вывода энергии и получить более ясное понимание процессов в ней. При этом необходимо учитывать, что экспериментальные исследования ключей LHC/DQSB на стенде с целью анализа указанных особенностей и количественного определения их динамических и ресурсных показателей требуют больших экономических затрат. Поэтому создание расчётной модели контактного промежутка одиночного размыкателя с целью её дальнейшего использования при анализе особенностей работы комплекта ключа LHC/DQSB является обоснованным и актуальным.

2. Эквивалентная электрическая схема контактного промежутка одиночного размыкателя на интервале времени отключения

Основным режимом работы размыкателя, определяющим отмеченные выше особенности его поведения, является режим размыкания контактов, существующий в интервале времени, называемым временем отключения T_{off} . Поэтому определение конфигурации и параметров расчётной модели контактного промежутка одиночного размыкателя будет проведено для данного интервала времени работы.

Для этого используем следующий алгоритм:

1-й шаг: разбиение интервала T_{off} на этапы с характерными отличительными признаками.

2-й шаг: определение физической модели каждого этапа.

3-й шаг: определение электрической модели (эквивалентная электрическая схема) для каждого этапа.

4-й шаг: определение расчетной модели каждого этапа для использования программы ORCAD 9.2*.

5-й шаг: объединение полученных расчетных моделей этапов в общую расчетную модель контактного промежутка на интервале T_{off} .

Начало этого интервала определяется моментом времени появления импульса OFF на входе импульсного (быстрого) канала выключения размыкателя, а окончание интервала определяется моментом времени, когда величина тока, протекающего через размыкатель, становится равной нулю.

2.1. Выделение этапов времени отключения T_{off}

Основу экспериментальных данных, используемых в данной работе, составляет комплект из нескольких сотен осциллограмм напряжения на контактом промежутке $E_c(t)$ и тока через него $I_c(t)$, полученных при ресурсных испытаниях одиночных размыкателей на стенде ГНЦ ИФВЭ. Одиночный размыкатель был включён в схему вывода энергии из индуктивности L_m в резистор R_d (рис. 2), где его контактный промежуток изображён в виде двухполюсника $Z_c(t)$.

Осциллограммы получены в двух форматах: графическом psx и табличном $Excel$ CSV для размыкателей «дипольного» типа ($R_d=75 \text{ m}\Omega$) при токе размыкания $I_m=13 \text{ kA}$. Типичная экстраполяция подобных осциллограмм, отражающая основные особенности процессов в контактом промежутке размыкателя, приведёна на рис. 3. На рис. 3 показана также эпюра сопротивления контактного промежутка $R_c(t)$, полученная математической обработкой данных для выражения

$$R_c(t) = E_c(t) / I_c(t). \quad (1)$$

*Использовалась на оборудовании ЦЕРН.

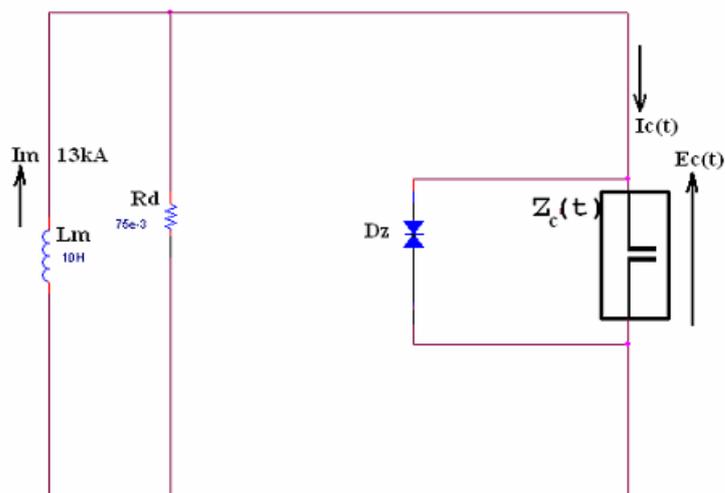


Рис. 2. Схема вывода энергии из индуктивности $L_m=10$ H: R_d – резистор-поглотитель энергии; $Z_c(t)$ – переменное сопротивление, представляющее контактный промежуток размыкателя; D_z – ограничитель напряжения, представляющий дугогасительную камеру размыкателя с напряжением ограничения ± 1200 В; $I_m=13$ кА – начальное значение тока в индуктивности L_m ; $E_c(t)$, $I_c(t)$ – напряжение и ток контактного промежутка размыкателя.

Эти типовые осциллограммы будут использованы в данной работе в качестве демонстрационной основы определения конфигурации и параметров расчётной модели полного сопротивления $Z_c(t)$ контактного промежутка одиночного размыкателя для всех этапов интервала времени T_{off} .

Анализ типовых осциллограмм рис. 3 позволяет сделать вывод, что интервал T_{off} содержит пять этапов, следующих друг за другом (см. обозначения на рис. 3):

- этап размыкания главных контактов T_{mc} ;
- этап размыкания дугогасительных контактов T_{ac} ;
- этап образования электрической дуги посредством процесса мостиковой эрозии T_{br} ;
- этап поддержания электрической дуги T_{arc} ;
- этап гашения электрической дуги (процесс тлеющего разряда в дугогасительной камере) T_{gd} .

Итак:
$$T_{off} = T_{mc} + T_{ac} + T_{br} + T_{arc} + T_{gd}. \quad (2)$$

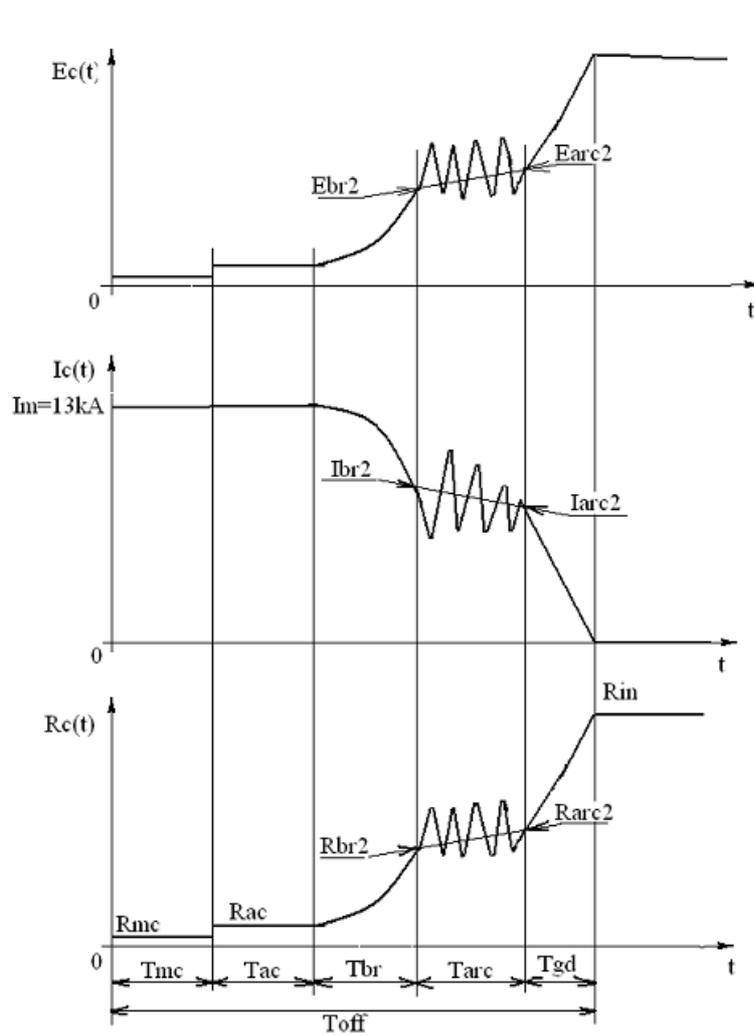


Рис. 3. Типовые эпюры напряжения $E_c(t)$, тока $I_c(t)$ и сопротивления $R_c(t)$ контактного промежутка размыкателя.

Каждому этапу соответствует свой набор параметров физической, электрической и расчётной модели контактного промежутка размыкателя, изображённого на схеме вывода энергии из индуктивности L_m в резистор R_d в виде двухполюсника $Z_c(t)$ (см. рис. 2).

2.2. Физические и электрические модели контактного промежутка для этапов T_{off} . Параметры элементов эквивалентных электрических схем

2.2.1. Этап размыкания главных контактов T_{mc}

На протяжении этого этапа ток размыкателя протекает по параллельному соединению замкнутых главных и дугогасительных контактов, что определяет сопротивление цепи размыкателя постоянному току

$$R_{mac} = R_{mc} \parallel R_{ac}, \text{ где:}$$

R_{mc} – сопротивление главных контактов;

R_{ac} – сопротивление дугогасительных контактов.

Таким образом, параметрами эквивалентной электрической схемы размыкателя на данном этапе являются T_{mc} и R_{mac} .

В конце этапа главные контакты размыкаются, при этом механизм размыкателя настроен таким образом, что главные контакты размыкаются, опережая дугогасительные, и ток без дуги переходит в ещё замкнутые дугогасительные контакты, сохраняя контактные поверхности главных контактов от повреждений дугой.

2.2.2. Этап размыкания дугогасительных контактов T_{ac}

На протяжении этого этапа ток размыкателя протекает через замкнутые дугогасительные контакты, что определяет сопротивление цепи размыкателя постоянному току величиной R_{ac} . **Таким образом, параметрами эквивалентной схемы размыкателя на данном этапе являются T_{ac} и R_{ac} .** Окончание этапа определяется моментом отсоединения подвижного дугогасительного контакта от неподвижного, при этом провал дугогасительных контактов, фиксируемый величиной зазора δ_1 [3], становится равным нулю.

2.2.3. Этап образования электрической дуги (процесс мостиковой эрозии) T_{br}

Основным дугообразующим элементом конструкции размыкателя типа ВАБ49-4000 являются дугогасительные контакты. В начальный момент разделения подвижного и неподвижного контактов между 2 – 3 парами последних контактируемых точек возникают металлические «мостики» расплавленного металла, вызванные большой плотностью тока в них, достигающей значений (10 – 15) кА/мм². Эффект Томпсона вы-

зывает асимметрию формы и температуры жидкого металла мостиков. При удалении подвижного контакта длины мостиков увеличиваются, вызывая увеличение электрического сопротивления мостиков и выделения ещё большего количества энергии в материале мостиков. При дальнейшем увеличении расстояния между контактами наступают моменты, когда мостики расплавленного металла взрывоподобно разрываются вследствие вскипания их наиболее горячих и тонких частей [4]. При этом моменты разрыва мостиков не совпадают по времени. Образовавшиеся фрагменты мостиков начинают играть роль плазмообразующих элементов, возникающей электрической дуги.

На этом этапе представим контактный промежуток в виде переменного сопротивления $R_{br}(t)$, изменяющегося во времени. Закон изменения сопротивления между начальной и конечной точками участка может быть представлен квадратичной параболической кривой:

$$R_{br}(t) = R_{br1} (1 + K_{br} t^2) = R_{ac} (1 + K_{br} t^2). \quad (3)$$

Начальные координаты участка: $[R_{br1} ; T_{mc} + T_{ac}]$, конечные координаты: $[R_{br2}; T_{mc} + T_{ac} + T_{br}]$. При этом $R_{br1} = R_{ac}$ и $R_{br2} = R_{br1} (1 + K_{br} T_{br}^2) = R_{ac}(1 + K_{br} T_{br}^2)$. **Таким образом, параметрами эквивалентной схемы размыкателя на этапе мостиковой эрозии являются: длительность участка T_{br} и коэффициент квадратичной параболической кривой K_{br} .**

2.2.4. Этап существования электрической дуги T_{arc}

Этот этап характеризуется неустойчивым состоянием плазмы дуги, которое вызывает значительные колебания сопротивления контактного промежутка, отображаемые в отчётливо наблюдаемом на кривых рис. 3, колебательном характере напряжения $E_c(t)$ и тока $I_c(t)$. Это позволяет представить эквивалентную схему промежутка на данном этапе в виде источника переменного напряжения $E_{arc}(t)$ с внутренним сопротивлением $R_{arc}(t)$. Спектральный состав напряжения $E_{arc}(t)$ может быть описан выражением:

$$E_{arc}(t) = \sum E_k(t) = \sum A_k \sin(2\pi F_k t + \varphi_k), \quad (4)$$

где: k , A_k , F_k , φ_k – номер, амплитуда, частота и начальная фаза гармоник $E_k(t)$, составляющих напряжение $E_{arc}(t)$. Эти параметры определялись из экспериментальных данных с использованием программы Mathcad*.

В данной работе спектральный состав напряжения $E_{arc}(t)$ будет ограничен двумя первыми гармониками, определяющими основные особенности процесса, Внутреннее сопротивление $R_{arc}(t)$ определяется выражением:

$$R_{arc}(t) = R_{arc1}(1+K_{arc}t). \quad (5)$$

Начальное значение R_{arc1} совпадает с конечным значением участка мостиковой эрозии, при этом $R_{arc1} = R_{br2}$. Конечное значение сопротивления определяется выражением $R_{arc2} = R_{arc1}(1+K_{arc}T_{arc})$.

Таким образом, параметрами эквивалентной электрической схемы этапа существования дуги являются:

- длительность этапа T_{arc} ;
- амплитуда A_k , частота F_k и начальная фаза φ_k гармоник источника напряжения $E_{arc}(t)$;
- величина коэффициента K_{arc} .

2.2.5. Этап гашения электрической дуги (процесс тлеющего разряда) T_{gd}

Под действием системы магнитного дутья, входящей в конструкцию размыкателя, плазма дуги вытягивается из контактного промежутка и втягивается в дугогасительную камеру, предназначенную для охлаждения продуктов дуги и прекращения процесса плазмообразования. При соприкосновении облака плазмы с холодными пластинами камеры дуга делится на ряд коротких дуг, горящих в ячейках дугогасительной камеры. Ток дуги резко падает, дуговой разряд превращается в «тлеющий» и гаснет. Ток нагрузки переходит в резистор вывода энергии R_d и процесс существования электрической дуги в контактном промежутке размыкателя заканчивается.

*Использовалась на оборудовании ЦЕРН.

Анализ данных рис. 3 позволяет представить эквивалентную схему контактного промежутка на этом этапе в виде переменного во времени сопротивления, описываемого выражением:

$$R_{gd}(t) = R_{gd1}(1 + K_{gd}t). \quad (6)$$

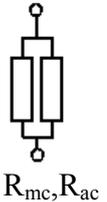
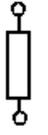
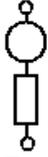
При этом начальное значение этого сопротивления равно конечному значению внутреннего сопротивления этапа существования дуги $R_{gd1} = R_{arc2}$. Следует учесть, что конечное значение сопротивления этапа тлеющего разряда очень велико и равно сопротивлению изоляции схемы $R_{gd2} = R_{in}$.

Параметрами эквивалентной электрической схемы этого этапа являются:

- длительность этапа T_{gd} ;
- величина коэффициента пропорциональности K_{gd} , определяемая с учетом сопротивления изоляции R_{in} .

Краткие описания физических моделей всех этапов, конфигурации эквивалентных электрических схем и перечень их параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Краткие описания физических моделей этапов, конфигурации эквивалентных электрических схем и перечень их параметров

	Этап T_{mc}	Этап T_{ac}	Этап T_{br}	Этап T_{arc}	Этап T_{gd}
Физическая модель	Параллельное соединение замкнутых главных и дугогасит. контактов	Замкнутые дугогасит. контакты	Мостиковая эрозия	Существование дуги	Существование тлеющего разряда
Электрическая схема	 R_{mc}, R_{ac}	 R_{ac}	 $R_{br}(t) = R_{ac}(1 + K_{br}t^2)$	 $E_{arc}(t) = \sum E_k(t);$ $R_{arc}(t) = R_{arc1}(1 + K_{arc}t)$	 $R_{gd}(t) = R_{gd1}(1 + K_{gd}t)$
Параметры электрической схемы	T_{mc}, R_{mc}, R_{ac}	T_{ac}, R_{ac}	T_{br}, K_{br}	$T_{arc}, K_{arc}, A_k, F_k,$ $\varphi_k, k=1,2$	T_{gd}, K_{gd}, R_{in}

3. Расчетная модель контактного промежутка одиночного размыкателя на интервале времени отключения

Для анализа процессов в ключе LHC/DQSB в данной работе использован программный продукт OrCad 9.2*, который требует применять специфические модели элементов анализируемых электрических схем.

3.1. Выбор моделей элементов расчетной схемы и их параметры

В составе электрических эквивалентных схем этапов, полученных в предыдущем параграфе, мы имеем следующие элементы, требующие расчетных моделей:

переменное сопротивление: $R_{br}(t)$, $R_{arc}(t)$, $R_{gd}(t)$;

источник переменного напряжения: $E_{arc}(t)$.

Программа OrCad 9.2 использует представление переменного, увеличивающегося во времени сопротивления, в виде модели ключа SWopen. [5] Эта модель имеет параметры:

TOPEN – момент времени начала изменения сопротивления;

TTRAN – интервал времени увеличения сопротивления;

ROPEN – конечное сопротивление;

RCLOSED – начальное сопротивление.

Данное представление расчётной модели переменного сопротивления позволяет с приемлемой для нашего анализа точностью выразить параметры эквивалентных электрических схем переменных сопротивлений K_{br} , A_{br} , K_{arc} , K_{gd} , через параметры расчётной модели TTRAN, ROPEN.

В программе OrCad 9.2 модель источника $E(t)$ имеет параметры:

VAMPL – амплитуда переменного напряжения;

FREQ – частота переменного напряжения;

PHASE – начальная фаза переменного напряжения;

TD – время задержки появления переменного напряжения.

В состав расчетных моделей этапов включены также вспомогательные ключи SWopen необходимые для обеспечения правильной очередности работы элементов в объединенной расчетной схеме контактного промежутка на всем интервале T_{off} .

В табл. 2 представлены расчетные модели этапов интервала времени T_{off} с использованием описанных выше моделей и параметров элементов электрических схем из Табл.1, при этом этапы T_{mc} и T_{ac} объединены одной расчетной моделью R_{mac} .

Таблица2. Расчетные модели этапов и их параметры

	Этап $T_{mc}+T_{ac}$	Этап T_{br}	Этап T_{arc}	Этап T_{gd}
Схема расчетной модели				
Параметры модели переменного резистора	$R_{mac}(t)$ $T_{OPEN}=T_{mc}$ $T_{TRAN}=1\mu S$ $R_{CLOSE}=R_{mc}$ $R_{OPEN}=R_{ac}$	$R_{br}(t)$ $T_{OPEN}=T_{mc}+T_{ac}$ $T_{TRAN}=T_{br}$ $R_{CLOSE}=R_{ac}$ $R_{OPEN}=R_{br2}$	$R_{arc}(t)$ $T_{OPEN}=T_{mc}+T_{ac}+T_{br}$ $T_{TRAN}=T_{arc}$ $R_{CLOSE}=R_{br2}$ $R_{OPEN}=R_{arc2}$	$R_{gd}(t)$ $T_{OPEN}=T_{mc}+T_{ac}+T_{br}+T_{arc}$ $T_{TRAN}=T_{gd}$ $R_{CLOSE}=R_{arc2}$ $R_{OPEN}=R_{in}$
Параметры модели источника напряжения			$E_{arc}(t)=\sum E_k(t)$ VAMPLk FREQk PHASEk; k=1,2, TDk= $T_{mc}+T_{ac}+T_{br}$	
Параметры моделей вспомогат. ключей		SW_{openbr} $T_{OPEN}=T_{mc}+T_{ac}$ $T_{TRAN}=1\mu S$ $R_{CLOSE}=10^{-9}\Omega$ $R_{OPEN}=10^{+9}\Omega$	$SW_{openarc1}$ $T_{OPEN}=T_{mc}+T_{ac}+T_{br}$ $T_{TRAN}=1\mu S$ $R_{CLOSE}=10^{-9}\Omega$ $R_{OPEN}=10^{+9}\Omega$ $SW_{openarc2}$ $T_{OPEN}=T_{mc}+T_{ac}+T_{br}+T_{arc}$ $T_{TRAN}=1\mu S$ $R_{CLOSE}=10^{-9}\Omega$ $R_{OPEN}=10^{+9}\Omega$	SW_{opengd} $T_{OPEN}=T_{mc}+T_{ac}+T_{br}+T_{arc}$ $T_{TRAN}=1\mu S$ $R_{CLOSE}=10^{-9}\Omega$ $R_{OPEN}=10^{+9}\Omega$

На рис. 4 представлена расчётная схема вывода энергии из индуктивности, на которой в зоне $Z_c(t)$, обозначенной пунктиром, показана расчетная схема контактного промежутка для интервала T_{off} .

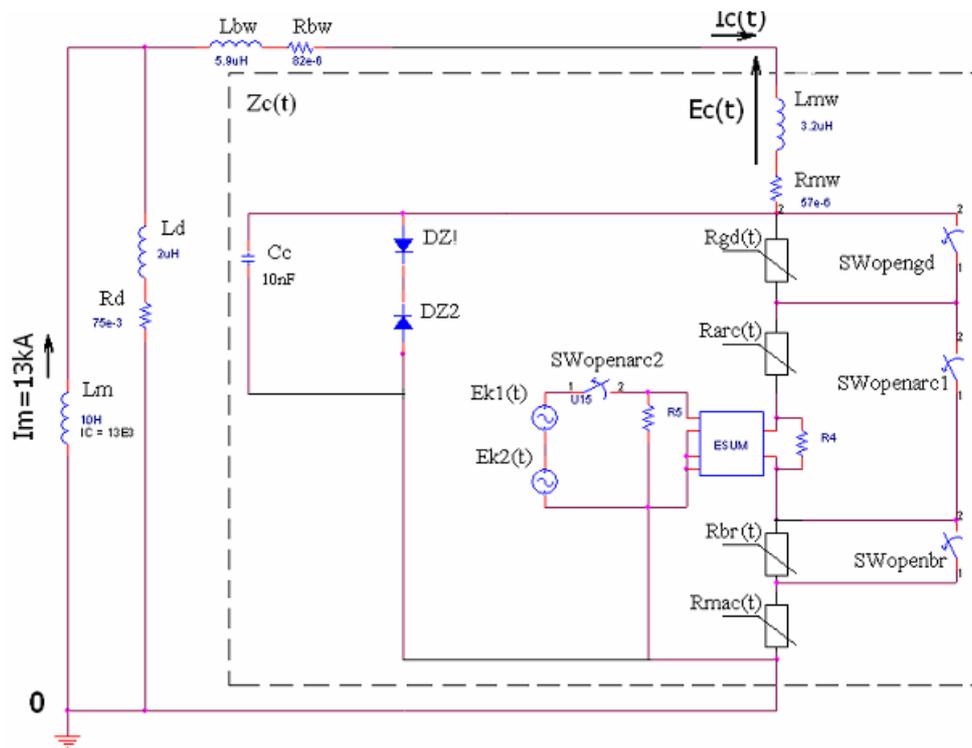


Рис. 4. Расчётная схема вывода энергии из индуктивности L_m : $Z_c(t)$ – расчётная модель контактного промежутка размыкателя; C_c , L_{bw} , R_{bw} , L_{m1w} , R_{m1w} – паразитные параметры элементов конструкции размыкателя и элементов его соединения с силовой схемой; $DZ1$, $DZ2$ – симметричный ограничитель напряжения, отражающий действие дугогасительной камеры; L_d – паразитная индуктивность резистора-поглотителя энергии; $R4$, $R5$, $ESUM$ – вспомогательные элементы, обеспечивающие правильное функционирование программы Orcad 9.2.

На схеме показаны элементы, отражающие паразитные параметры конструкции размыкателя и его элементов соединения с силовой схемой:

- паразитная емкость контактного промежутка $C_c = 10 \text{ nF}$;
- паразитная индуктивность соединительных шин $L_{bw} = 5.9 \text{ }\mu\text{H}$;
- сопротивление соединительных шин $R_{bw} = 82 \text{ }\mu\Omega$;
- паразитная индуктивность резистора вывода энергии $L_d = 2 \text{ }\mu\text{H}$.

Числовые значения паразитных параметров получены измерениями и оценочными расчётами [6]. Действие дугогасительной камеры отражает симметричный ограничитель напряжения $DZ1$, $DZ2$ с напряжением ограничения $\pm 1200 \text{ V}$.

Данную расчётную схему можно применять для анализа процессов в системах вывода энергии из цепей с индуктивностями, используя числовые значения параметров расчётных моделей, приведённые в табл. 3.

Таблица 3. Числовые значения параметров расчётной модели контактного промежутка размыкателя

№ п/п	Наименование параметра	Числовое значение параметра	
		среднее	мин-макс
1	Tmc,ms	2.2	2.0 ... 2.4
2	Tac,ms	2.0	1.8... 2.4
3	Tbr,ms	2.6	2.1... 3.0
4	Tarc,ms	1.2	1.0 ... 1.8
5	Tgd,ms	0.3	0.2 ... 0.4
6	Rmc,μΩ	8.0	6.0...12.0
7	Rac, μΩ	260	160...380
8	Rbr2, mΩ	33.0	28.9 ... 36.4
9	Rarc2, mΩ	90.0	35.7 ... 155.2
10	Rin, MΩ	1.0	1.0
11	VAMPL1,V	120	60...250
12	VAMPL2 ,V	90	30 ... 150
13	FREQ1,kHz	2.5	1.5 ... 3.5
14	FREQ2,kHz	7.5	4.0 ... 11.0
15	PHASE1,2	0	0

Числовые значения параметров расчётных моделей получены путём статистической обработки большого массива экспериментальных данных, включающего в себя результаты контрольных, приёмочных и ресурсных испытаний 264 размыкателей. При получении данных для табл. 3 использовались различные методы:

- анализ экспериментальных осциллограмм в графическом и табличном виде с учётом указаний рис. 3 для определения параметров п.п. 1...5;
- прямые инструментальные измерения для параметров п.п. 6,7,10;
- расчёты с использованием выражений:

$$Rbr2 = Ebr2/ Ibr2 \text{ и } Rarc2 = Earc2/ Iarc2 \quad (7)$$

- и с учётом указаний рис. 3 для определения параметров п.п. 8,9;
- анализ Фурье экспериментальных кривых на участке Tac рис. 3 для определения параметров п.п. 11... 15.

Примечание. Так как процессы в контактном промежутке имеют вероятностный характер, любая реализация этих процессов, в том числе и виртуальная, является истинной (она будет иметь место при достаточно большом числе испытаний), если параметры этой реализации не противоречат табл. 3.

На рис. 5 показаны кривые напряжения $E_c(t)$, тока $I_c(t)$ и сопротивления $Z_c(t)$ контактного промежутка одиночного размыкателя, полученные в результате моделирования расчётной схемы рис. 4 программой Orcad 9.2 с использованием средних значений параметров модели из табл. 3.

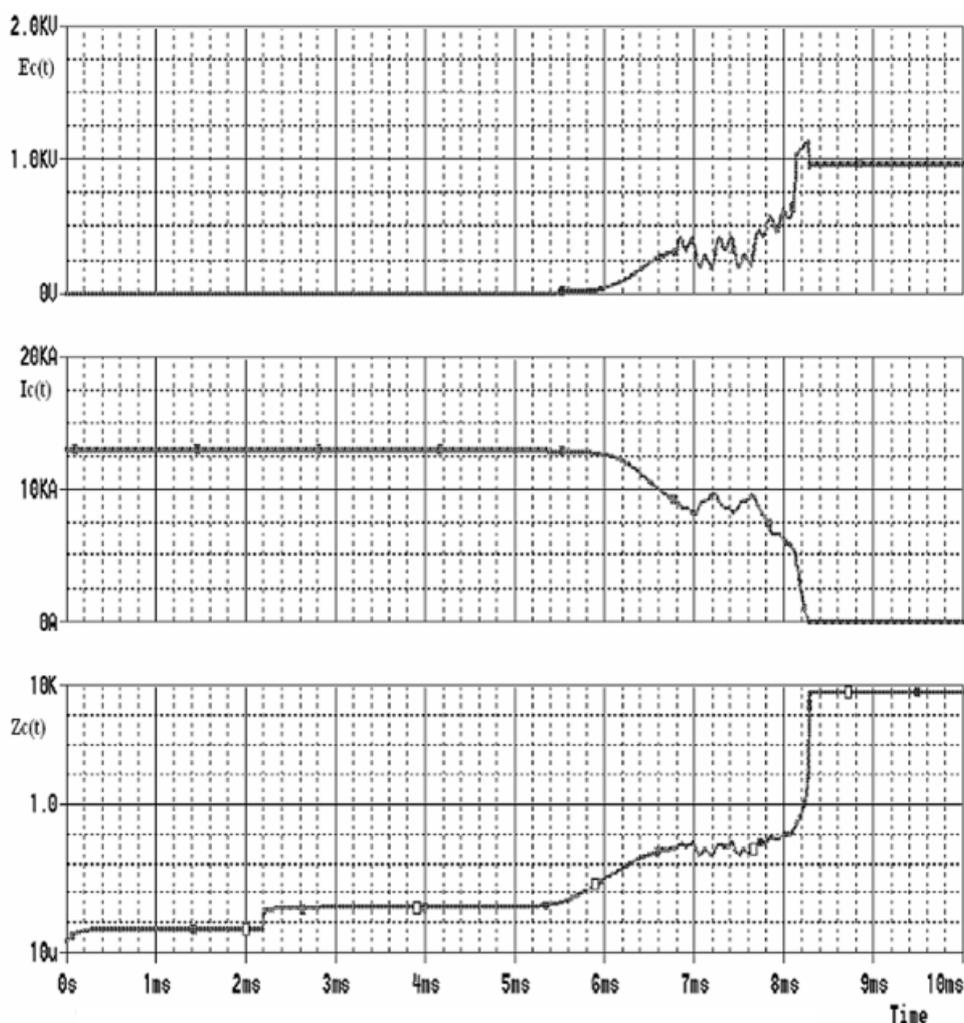


Рис. 5. Кривые напряжения $E_c(t)$, тока $I_c(t)$ и сопротивления $Z_c(t)$ контактного промежутка размыкателя – результат моделирования расчётной схемы. (Примечание: кривая $Z_c(t)$ имеет логарифмический масштаб по оси Y.)

Расчётные результаты достаточно хорошо соответствуют экспериментальным данным Рис. 6, поэтому полученная расчётная модель контактного промежутка одиночного размыкателя может быть использована для дальнейшего анализа процессов в ключе LHC/DQSB при его работе в составе системы вывода энергии из индуктивности.

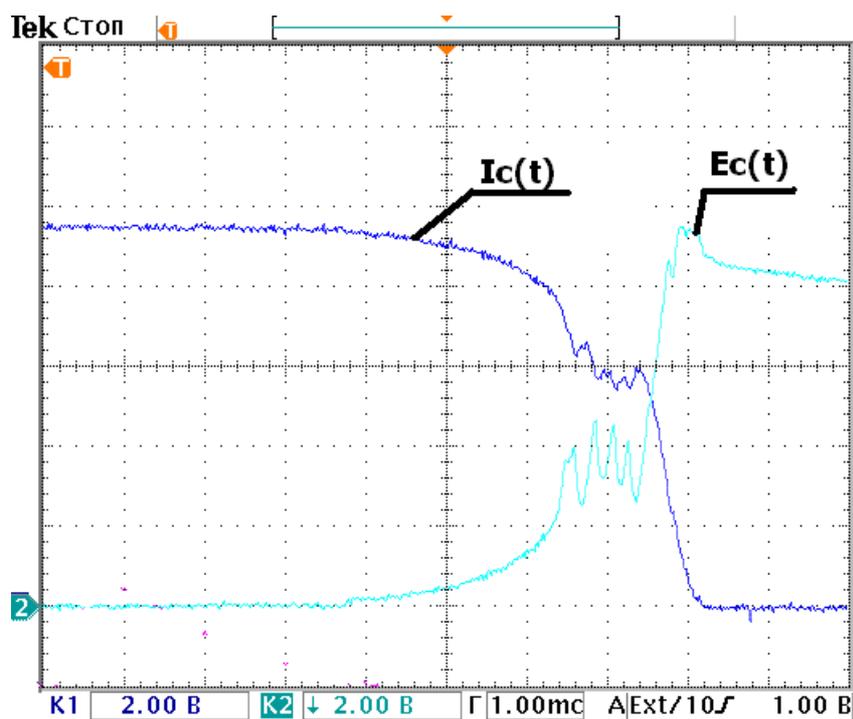


Рис. 6. Экспериментальные кривые напряжения $E_c(t)$ и тока $I_c(t)$:
 - масштаб по напряжению 200 В/дел.;
 - масштаб по току 2599 А/дел.;
 - масштаб по времени 1 мсек/дел.

Список литературы

- [1] K.Dahlerup-Petersen, G.-J.Coeling, B.Kazmin. Simulation and operation experience with energy extraction in the LHC superconducting magnet chains. EPAC 2008.
- [2] K.Dahlerup-Petersen, G.-J.Coeling et al. The CERN/LHC energy extraction switches and their arc detector system CERN. Paper presented at the 2004 International power modulator conference.

- [3] “Automatic High-Speed Circuit breakers ВАБ49-4000/10-Л-С-УХЛ4 and ВАБ49-4000/2-Л-УХЛ4. Operating Instructions ОБП.463.186 РЭ”. ОАО “Уралэлектромаш”, Екатеринбург, 2004.
- [4] “Особенности устройства и функционирования электромагнитных реле”. Инструкция ОАО НПК “Северная заря”. 2010.
- [5] Ю.И. Болотовский, Г.И. Таназлы. “Orcad 9.*, Orcad 10.*. Практика проектирования”. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008.
- [6] И.Я. Гликман, Ю.С. Русин. “Расчёт характеристик элементов цепей радиоэлектронной аппаратуры”. – М.: Сов. Радио, 1976.

Рукопись поступила 22 августа 2011 г.

Б.В. Казьмин и др.

Разработка расчётной модели контактного промежутка быстродействующего размыкателя постоянного тока для анализа особенностей работы ключей LHC/DQSB системы вывода энергии из основных кольцевых электромагнитов LHC.

Отпечатано с оригинал-макета, подготовленного автором.

Подписано к печати 25.08.2011.	Формат 60 × 84/16.	Офсетная печать.
Печ.л. 1,12. Уч. изд.л. 1,73.	Тираж 80.	Заказ 10. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2011-17, ИФВЭ, 2011
