



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011–18
ОУ У-70

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

**Влияние динамических свойств одиночных
размыкателей, составляющих комплект ключа
ЛНС/DQSB, на ресурсные показатели ключа**

¹ ЗАО «Энергомаш-Уралэлектротяжмаш», г. Екатеринбург

² ЦЕРН, Женева

Протвино 2011

Аннотация

Казьмин Б.В. и др. Влияние динамических свойств одиночных размыкателей, составляющих комплект ключа LHC/DQSB, на ресурсные показатели ключа: Препринт ИФВЭ 2011-18. – Протвино, 2011. – 8 с., 5 рис., библиогр: 3.

В работе описывается экспериментально обнаруженный эффект увеличения быстродействия электромагнитного размыкателя постоянного тока типа ВАБ49 при увеличении числа циклов размыкания тока. Анализируется влияние данного эффекта на ресурсные показатели ключей LHC/DQBS системы защиты сверхпроводящих кольцевых электромагнитов БАК ЦЕРН.

Abstract

Kazmin B.V. et al. Influence the Dynamic Properties of the Single Breaker Making the Complete Set of Switch LHC/DQSB on a Switch Endurance Properties: IHEP Preprint 2011-18. – Protvino, 2011. – p. 8, figs. 5, refs.: 3.

The paper is described an experimentally found out effect of increase in speed of a type VAB49 DC electromagnetic breaker with increasing of the current breaking cycles number. Influence of this effect on endurance properties of the LHC/DQBS switches of LHC superconducting magnets protection system is analyzed.

Введение

Одним из основных элементов системы защиты сверхпроводящих дипольных и квадрупольных кольцевых электромагнитов Большого адронного коллайдера LHC CERN являются ключи LHC/DQSB, состоящие из восьми последовательно-параллельно соединённых электромагнитных размыкателей типа ВАБ49, разработанных по техническому заданию ИФВЭ. При разработке размыкателей повышенное внимание уделялось таким показателям, как быстродействие, надёжность и ресурс.

С целью получения максимально возможных значений данных показателей, на специально построенном в ИФВЭ стенде был проведён большой объём испытаний прототипов и головных образцов размыкателей. Анализ полученных экспериментальных данных позволил обнаружить важную особенность разрабатываемых размыкателей, состоящую в том, что быстродействие размыкателя увеличивается в ходе его работы (при увеличении числа размыканий полного тока).

Дальнейшее изучение обнаруженной закономерности позволило скорректировать в большую сторону количественную оценку ресурсных показателей ключей LHC/DQSB, что может позволить значительно (почти в четыре раза) снизить трудозатраты на их эксплуатацию.

Анализ работы схем ключей

Ресурс одиночного размыкателя определяется количеством циклов N «замкнуто – разомкнуто», при котором износ дугогасительных контактов, вызванный электрической

эрозией материалов контактов достигает заданной допустимой величины. Электрическая эрозия материала контактов вызвана действием электрической дуги, возникающей в контактном промежутке. Количественно величина эрозионного износа определяется выражением:

$$W_N = \sum_{n=1}^N W_n(t) = \sum_{n=1}^N \int_0^{T_{OFF}} i_{cn}(t) \cdot u_{cn}(t) dt, \quad (1)$$

где: W_N – энергия, рассеиваемая в контактном промежутке за время выработки ресурса размыкателя в течение N циклов «замкнуто – разомкнуто»;

W_n – энергия, рассеиваемая в контактном промежутке за время размыкания контактов T_{OFF} в период одного n -го цикла. «замкнуто – разомкнуто»;

$i_{cn}(t), u_{cn}(t)$ – ток и напряжение между контактами в период размыкания T_{OFF}

Очевидно, что при нулевых значениях тока или напряжения в период размыкания контактов энергия, выделяющаяся в контактном промежутке будет равна нулю, эрозионный износ контактов будет отсутствовать и контакты будут размыкаться без образования дуги.

Пример № 1. При **параллельном** соединении размыкателей с отличающимся быстродействием (Рис. 1) весь эрозионный износ будет нести контакт самого **медленного** размыкателя $K1$, т.к. контакты более быстрых размыкателей размыкается при **нулевом напряжении** без выделения энергии в контактном промежутке. В этом случае ресурс всей схемы определяется ресурсом одного самого медленного размыкателя.

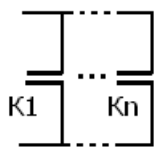


Рис. 1

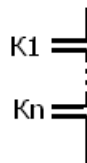


Рис. 2

Пример № 2. При **последовательном** соединении размыкателей с отличающимся быстродействием (Рис. 2) весь эрозионный износ будет нести контакт самого **быстродействующего** размыкателя $K1$, т.к. контакты более медленных размыкателей размыкается при **нулевом токе** без выделения энергии в контактном промежутке.

В этом случае ресурс всей схемы определяется ресурсом одного самого быстрого размыкателя

Пример № 3. Рассмотрим пример более сложного последовательно – параллельного соединения контактов (исходную схему см. на Рис. 3а). В этой схеме условно примем, что номер контакта определяет его быстродействие, т.е. контакт К1 имеет время размыкания одну временную единицу, контакт К2 имеет время размыкания две временные единицы и т.д.

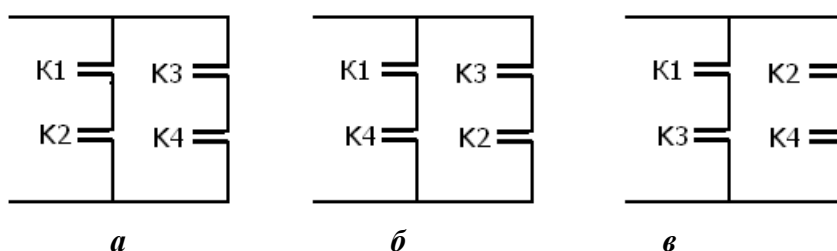


Рис. 3

На Рис. 3б и в показаны остальные варианты соединений контактов, имеющие принципиальное значения для нашего анализа. Используя результаты, полученные на основе анализа примеров №№ 1, 2, можно отметить:

- в схеме рис. 3а всю эрозионную нагрузку будет нести контакт К3, т.к. самый быстрый контакт К1 будет размыкаться при нулевом напряжении, контакт К2 – при нулевом токе и самый медленный контакт К4 также будет размыкаться при нулевом токе;
- в схеме рис. 3б всю эрозионную нагрузку будет нести контакт К2, т.к. самый быстрый контакт К1 будет размыкаться при нулевом напряжении, контакт К3 – при нулевом токе и самый медленный контакт К4 также будет размыкаться при нулевом токе;
- в схеме рис. 3в всю эрозионную нагрузку будет нести контакт К2, т.к. самый быстрый контакт К1 будет размыкаться при нулевом напряжении, контакт К3 – при нулевом токе и самый медленный контакт К4 также будет размыкаться при нулевом токе.

По результатам анализа работы схем рис.3 можно сделать следующие выводы:

- 1) самый быстрый и самый медленные контакты никогда не несут эрозионной нагрузки;
- 2) всю эрозионную нагрузку схемы несёт только один контакт и поэтому ресурс всей схемы определяется ресурсом одного контакта.

Полученные выше выводы о рабочих ресурсах схем с несколькими размыкателями с различными динамическими параметрами являются правильными при условии, если в процессе работы этих схем динамические параметры размыкателей, составляющих эти схемы, остаются постоянными. Однако в ходе ресурсных испытаний одиночных размыкателей было обнаружено изменение некоторых динамических параметров размыкателей, вызванное эрозионным износом дугогасительных контактов, в частности параметра $T_{ас}$ (этап размыкания дугогасительных контактов) [1]. Основной причиной изменения $T_{ас}$ в ходе эрозионного износа является изменение начальной величины технологического зазора δ_1 (провал дугогасительных контактов) [2].

Среди набора динамических параметров модели размыкателя, определяющих быстродействие размыкателя, параметр $T_{ас}$ наиболее легко поддаётся исследованиям, вследствие большей наглядности процесса размыкания при анализе осциллограмм, полученных в ходе ресурсных испытаний, и большей доступности регулировки зазора δ_1 (провал дугогасительных контактов) при непосредственных исследованиях влияния величины этого зазора на параметр $T_{ас}$.

Выше дан результат анализа работы схемы только с двумя параллельными ветвями и с двумя последовательно включёнными контактами в каждой ветви. Анализ схемы с тремя параллельными ветвями требует рассмотрения работы шести вариантов соединений контактов, для анализа схемы с четырьмя ветвями необходим анализ 12 вариантов соединений контактов с отличающимся быстродействием. Этот анализ подтверждает полученный выше результат для схемы рис. 3 и не приводится в данной работе с целью сокращения объёма статьи.

Анализ экспериментальных данных

Анализ результатов ресурсных испытаний позволил определить зависимость динамического параметра $T_{ас}$ от величины зазора δ_1 , а непосредственные эксперименты на нескольких размыкателях позволили уточнить количественные параметры этой зависимости (Рис. 4).

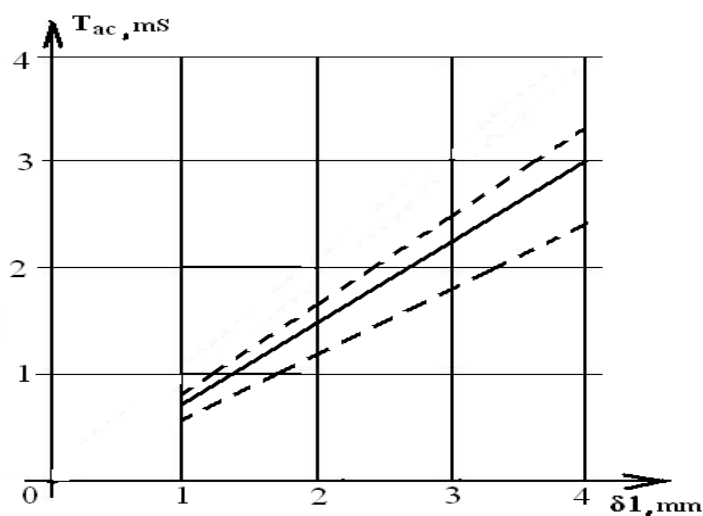


Рис. 4. Зависимость динамического параметра T_{ac} от величины зазора δ_1 , где пунктирными линиями ограничены границы зоны возможных значений параметра T_{ac}

С учётом того, что по техническим условиям завода-изготовителя величина зазора δ_1 в условиях эксплуатации размыкателя должна быть в пределах 3.0-1.5 мм (при начальном значении 3.0 мм), анализ Рис. 4 показывает, что величина T_{ac} уменьшается почти вдвое.

Иными словами, в ходе эрозионного износа дугогасительных контактов быстродействие размыкателя увеличивается.

Этот вывод позволяет пересмотреть результаты ранее сделанного анализа работы схем – комбинаций размыкателей с отличающимся быстродействием.

1) При **параллельном** соединении (Рис. 1) контактов самый медленный контакт, принимая на себя всю эрозионную нагрузку, изнашивается и с учётом зависимости Рис. 4 становится более быстродействующим. В ходе работы его быстродействие сравнивается с быстродействием одного из более быстрых контактов, который начинает принимать на себя эрозионную нагрузку, что приводит к своеобразной **«конкуренции»** между контактами с близкими значениями динамических параметров за возможность работы без эрозионной нагрузки (без дуги в межконтактном промежутке).

Очевидно, что в этом случае ресурс схемы определится не ресурсом одиночного размыкателя (количество размыканий максимального тока N_1), а ресурсом схемы из нескольких параллельно соединённых контактов N_s . При идентичности параметров контактов величина этого ресурса стремится к значению:

$$N_s = n N_1, \quad (2)$$

где n – число параллельно включенных контактов.

2) При **последовательном** соединении контактов самый быстрый контакт становится ещё более быстродействующим, а это значит, что он один принимает эрозионную нагрузку схемы и его ресурс определяет ресурс всей схемы. В этом случае вывод, сделанный при анализе схемы Рис. 2 без учёта зависимости Рис. 4, остаётся действительным.

3) При смешанном **параллельно-последовательном** соединении контактов (Рис. 3а) контакт К3, принимая на себя всю эрозионную нагрузку схемы, будет иметь износ и с учётом зависимости Рис. 4 его быстродействие будет увеличиваться и приближаться к быстродействию самого быстрого контакта К1 из состава другой ветви.

Между контактами К1 и К3 начнётся «конкуренция» за возможность работать без эрозии а это означает, что ресурс схемы будет определяться не ресурсом одного контакта К3, а совместным ресурсом двух контактов. Используя выражение (1) потенциальный ресурс схемы будет близок к величине $N_s = 2 * N_1$.

Используем полученные выше результаты для оценки ресурсных показателей ключа LHC/DQSB, применяемого в системе защиты основных сверхпроводящих кольцевых электромагнитов коллайдера LHC [3].

Структурная схема ключа LHC/DQSB показана на Рис. 5. Она представляет собой смешанное параллельно-последовательное соединение восьми размыкателей, объединённых в четыре параллельные ветви с двумя последовательно соединёнными размыкателями в каждой ветви.

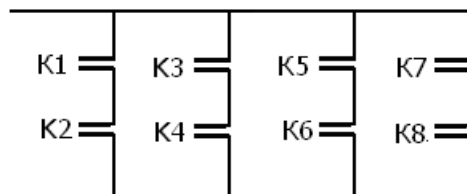


Рис. 5. Структурная схема ключа LHC/DQSB

С учётом принятого выше условия о том, что величина динамического параметра T_{ac} , характеризующего быстродействие размыкателей, условно соответствует номеру размыкателя, можно отметить:

- первоначально эрозионную нагрузку всего ключа будет нести контакт К7, при этом вместе с его износом будет увеличиваться его быстродействие. Когда его быстродействие сравняется с быстродействием контакта К5, эрозионная нагрузка будет распределяться между ними. Быстродействие этих контактов будет увеличиваться и приближаться к быстродействию контакта К3. Когда динамические параметры всех трёх контактов сравняются, в работу вступит контакт К3, который также будет брать на себя эрозионную нагрузку:

- применяя аналогичные рассуждения к работе всех четырёх ветвей ключа LHC/DQSB, мы можем сделать вывод о том, что после того, как динамические параметры размыкателей самых быстрых в ветвях сравняются, эрозионную нагрузку будут нести четыре размыкателя и ожидаемый ресурс ключа LHC/DQSB будет равен $N_s = 4 * N_1$, где N_1 – ресурс одиночного размыкателя.

Для размыкателей типа ВАБ49-4000, входящих в комплект ключей LHC/DQSB, эта величина была определена в ходе ресурсных испытаний одиночных размыкателей и составила $N_1 = 120$ циклов ON-OFF при номинальном токе размыкания 13 кА.

В этом случае **ожидаемый ресурс ключа LHC/DQSB равен 480 циклам ON-OFF**. Эта величина была экспериментально подтверждена при ресурсных испытаниях комплекта ключа по схеме Рис. 5 на стенде ГНЦ ИФВЭ. В этом эксперименте износ каждого из четырёх размыкателей не превысил 25 % износа одиночного размыкателя при ресурсных испытаниях одиночных размыкателей.

Заключение

В работе показано, что износ размыкателей, входящих в комплект ключа LHC/DQSB, увеличивает их быстродействие, что, в свою очередь, приводит к увеличению ресурса всего комплекта ключа почти в 4 раза.

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.
- [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.
- [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.

Рукопись поступила 22 августа 2011 г.

Б.В. Казьмин и др.

Влияние динамических свойств одиночных размыкателей, составляющих комплект ключа LHC/DQSB, на ресурсные показатели ключа.

Отпечатано с оригинал-макета, подготовленного автором.

Подписано к печати 25.08.2011. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 0,62. Уч.–изд.л. 0,96. Тираж 80. Заказ 11. Индекс 3649.

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

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2011-18, ИФВЭ, 2011
