

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИМПУЛЬСНЫХ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ

© 2023 г. Р. Ш. Еникеев^{а,*}, К. С. Сапожников^а, А. А. Руденко^а

^аНаучно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова
Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, 3

*e-mail: enikeev@sintez.niiefa.spb.su

Поступила в редакцию 30.09.2022 г.

После доработки 19.10.2022 г.

Принята к публикации 26.11.2022 г.

Представлены результаты разработки и исследования сильноточного высоковольтного предохранителя, предназначенного для защиты от токов короткого замыкания отдельных элементов силового оборудования системы электропитания международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР). В соответствии с требованиями ИТЭР предохранитель предназначен для использования в импульсном режиме работы и при возникновении короткого замыкания должен отключить ток амплитудой до 30 кА, обеспечив длительный разрыв электрической цепи с напряжением до 9 кВ. Приводится описание конструкции разработанного предохранителя, рассматриваются основные технические решения, обеспечивающие его соответствие требованиям по электрической прочности, коммутуемым токам и времени отключения, а также результаты экспериментальных исследований коммутационных характеристик. Определены диапазон отключаемых токов и электрическая прочность в импульсном режиме работы с приложением послекоммутационного напряжения.

DOI: 10.31857/S0032816223020167, EDN: GSUGTS

ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящая магнитная система ИТЭР состоит из 18-ти катушек тороидального поля, шести катушек полоидального поля и шести модулей центрального соленоида. В случае потери сверхпроводимости магнитная энергия, накопленная в катушках, должна быть выведена с целью их защиты от перегрева. Это достигается за счет включения силовых энергопоглощающих резисторов последовательно с катушками при помощи системы быстрого вывода энергии, состоящей из коммутационных аппаратов, батареи противотока и RC -цепи, демпфирующей коммутационные перенапряжения [1, 2].

Предохранитель включен последовательно с демпфирующей цепью для отключения аварийного тока в случае электрического пробоя конденсатора цепи. Он представляет собой управляемый выключатель одноразового действия, работа которого основана на отключении тока при электрическом взрыве токоведущего проводника (ЭВП). Простота конструкции предохранителя позволила обеспечить надежность изделия и его сравнительно небольшие габариты.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ

Предохранитель (рис. 1) состоит из следующих основных конструктивных узлов: коммутирующей части и буферных камер.

Коммутирующая часть выполнена в виде набора параллельно соединенных медных многопроволочных проводников (отключающий элемент L) в шелковой и полимерной изоляции, расположенных в каналах изоляционных стеклопластиковых труб 2. При протекании аварийного тока медные проводники коммутирующей части за короткий промежуток времени с интенсивностью взрыва переходят в непроводящее парообразное состояние с последующим образованием паузы тока [3]. Характерной особенностью использования набора изолированных проводников является равномерное протекание тока по их сечению и уменьшение времени отключения за счет большой площади поверхности и высокой скорости испарения по сравнению с набором неизолированных проводников или с однопроволочным проводником. Расширяющиеся продукты электрического взрыва проводника заполняют внутренние каналы изоляционных стеклопластиковых труб, что приводит к возрастанию давления внутри них и отключению аварийного тока амплитудой до ~ 30 кА с производ-

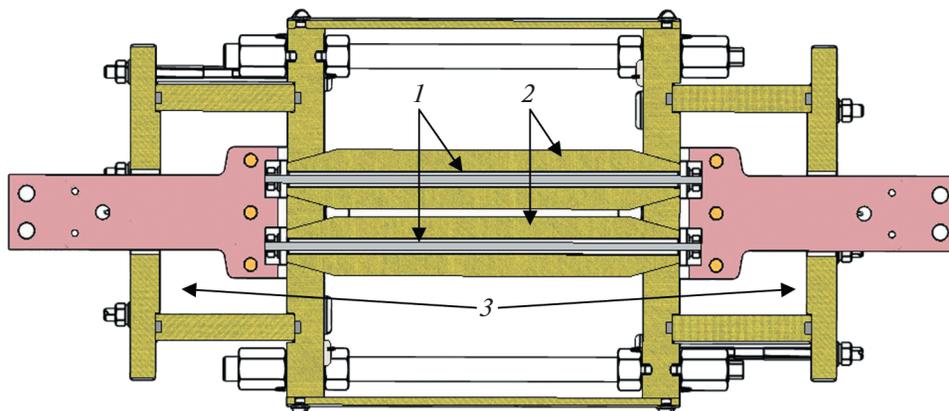


Рис. 1. Конструкция сильноточного высоковольтного предохранителя на основе ЭВП. 1 – отключающий элемент, 2 – изоляционная труба, 3 – буферные камеры.

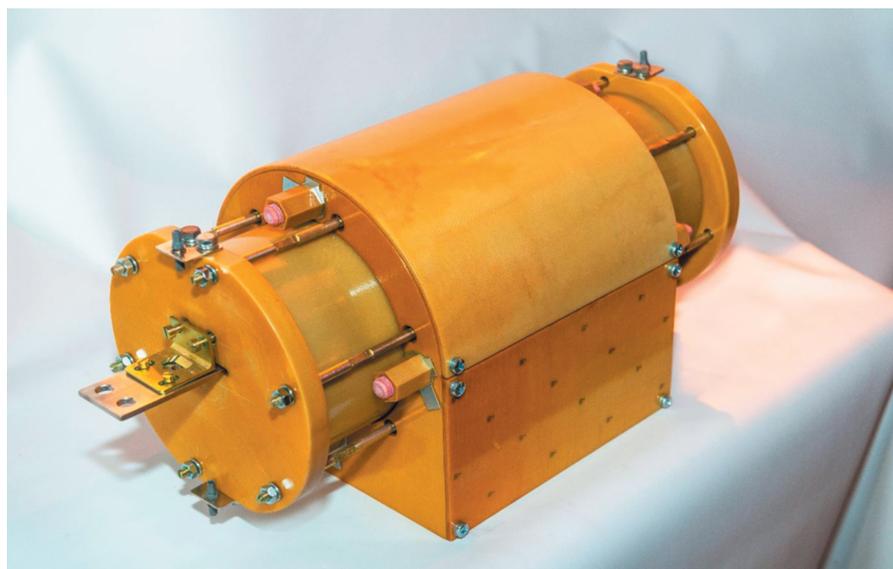


Рис. 2. Внешний вид сильноточного высоковольтного предохранителя на основе ЭВП.

ной ~ 20 кА/мс. Буферные камеры 3 в виде изоляционных цилиндров размещены с двух сторон предохранителя и закрывают боковые отверстия каналов коммутирующей части. Они предназначены для приема продуктов ЭВП при коммутации и ограничения их выхода в атмосферу, что защищает от возникновения электрического пробоя и вторичного дугового разряда в образовавшейся среде снаружи предохранителя. Такая конструкция позволяет уменьшить размеры коммутирующей части и обеспечить высокую электрическую прочность изоляционного промежутка, а также снизить воздействие на расположенное рядом оборудование при срабатывании предохранителя.

Предохранитель, внешний вид которого представлен на рис. 2, имеет собственную систему индикации. Через токоведущие шины проходит сигнальный оптический кабель, подключаемый к

внешней системе контроля и защиты. При срабатывании предохранителя металлические ножи перерезают оптический кабель, что фиксируется внешней системой контроля и защиты.

Коммутационные характеристики предохранителя задаются конструкцией изоляционной части и выбором параметров взрывающихся проводников. Соответствие требованиям ИТЭР было подтверждено в результате проведенной серии экспериментов.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ В ДЕМПФИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ

Система быстрого вывода энергии ИТЭР предназначена для отключения тока в сверхпроводящих магнитных катушках, при этом с целью

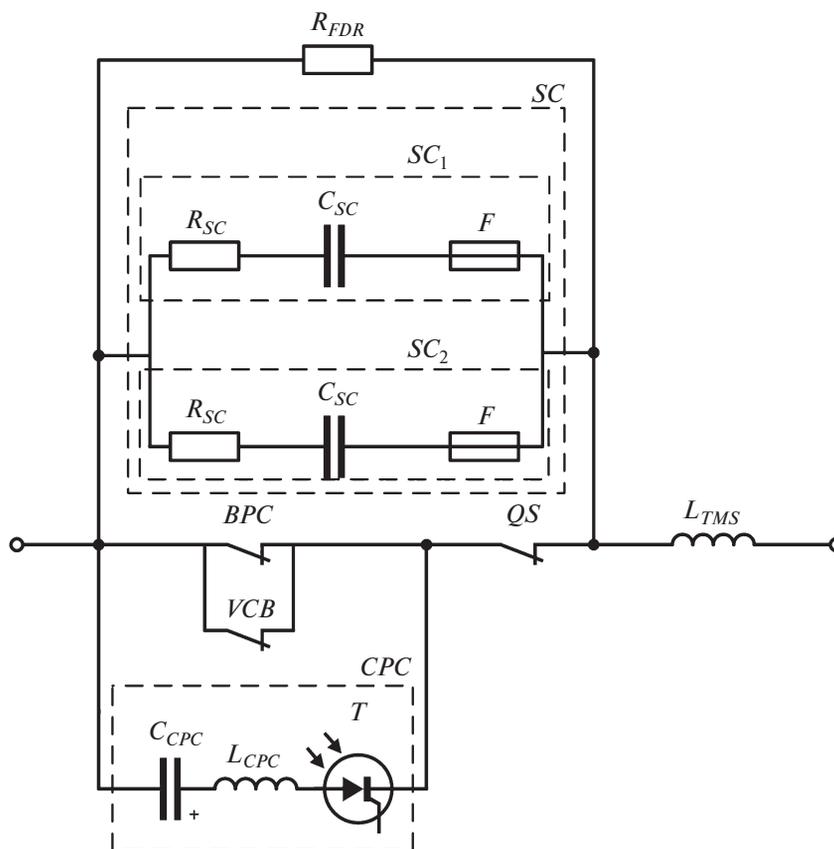


Рис. 3. Упрощенная схема системы быстрого вывода энергии. L_{TMS} – сверхпроводящая катушка тороидальной магнитной системы токамака; R_{FDR} – резисторы системы быстрого аварийного вывода энергии; T – сборка фототиристоров ТФИ193-2500-42; BPS , VCB , Q_S – управляемые размыкатели; CPC – батарея противотока; SC – демпфирующее устройство, F – предохранитель. Параметры элементов схемы: $L_{TMS} = 2.37$ Гн, $C_{SC} = 2$ мФ, $R_{SC} = 0.2$ Ом, $R_{FDR} = 0.11$ Ом, $C_{CPC} = 1.6$ мФ, $L_{CPC} = 16$ мкГн [1, 4].

облегчения режимов работы силовых элементов оборудования требуется ограничить уровень перенапряжений, возникающих в системе при коммутации тока. Ограничение коммутационных перенапряжений достигается путем применения демпфирующего устройства – RC -цепи, включенной параллельно с группой коммутационных аппаратов. На рис. 3 приведена упрощенная схема быстрого вывода энергии.

Демпфирующее устройство SC состоит из двух идентичных цепей SC_1 и SC_2 , включенных параллельно. Конденсаторы C_{SC} (со свойством самовосстановления) должны выдерживать ограниченное число циклов заряд/разряд при напряжении на 25% ниже, чем номинальное. Тем не менее, даже при таких рабочих режимах, вероятность пробоя конденсатора не исключена, и с целью соблюдения высоких требований по надежности системы последовательно с конденсаторами включены предохранители F , предназначенные для отключения демпфирующего устройства от внешней цепи в случае возможной аварии (пробоя конденсатора C_{SC}).

Результаты численного моделирования режимов работы предохранителя F в демпфирующей цепи SC приведены на рис. 4.

На осциллограмме рис. 4 в промежутке времени от 0 до 14 мс происходит штатный заряд конденсаторов C_{SC} , демпфирующий перенапряжения при выводе тока из сверхпроводящей магнитной системы, при этом интеграл действия тока в цепи предохранителя не превышает $0.22 \text{ MA}^2 \cdot \text{с}$. В момент времени, соответствующий 14 мс, происходит пробой конденсатора C_{SC} в цепи SC_2 (см. рис. 3), при этом в промежутке времени от 14 до 16 мс через цепь этого конденсатора идет разряд конденсатора параллельной ветви, приводящий к увеличению тока в цепи предохранителя до 30 кА. В промежутке времени от 16 до 17 мс осуществляется отключение тока в цепи предохранителя с обеспечением электрической прочности в цепи пробитого конденсатора при напряжении до 9 кВ. При моделировании принято допущение о линейном характере отключения тока в предохранителе.

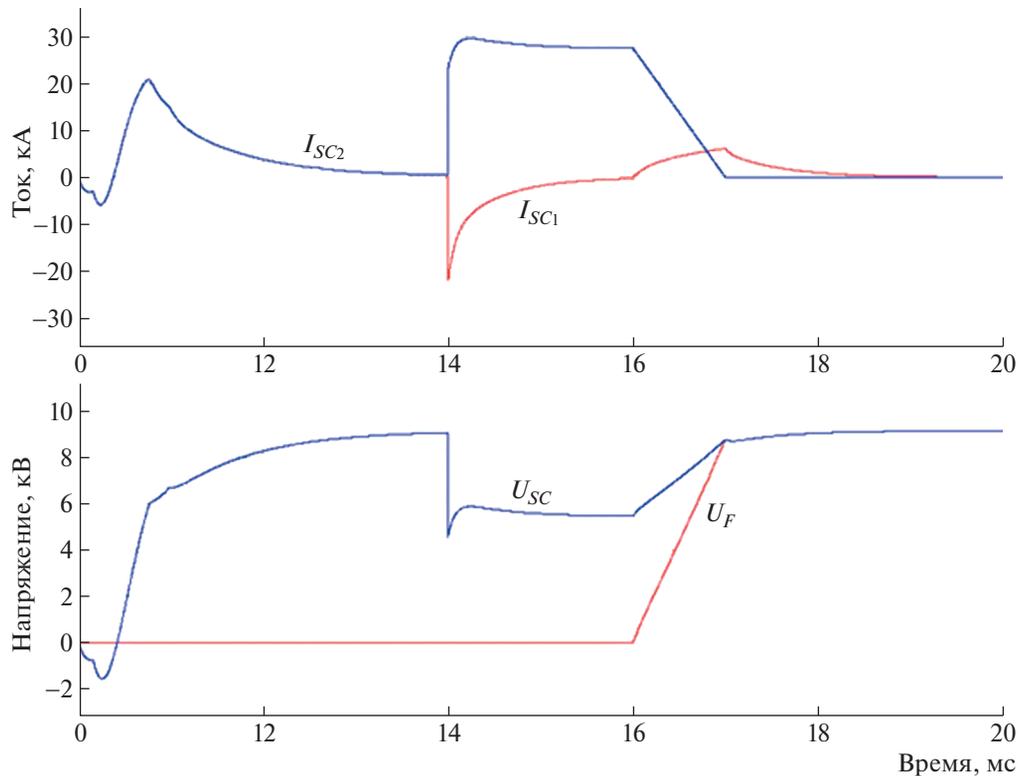


Рис. 4. Результаты численного моделирования напряжения и тока в демпфирующем устройстве при пробое конденсатора: I_{SC1} – ток в цепи SC_1 ; I_{SC2} – ток в цепи SC_2 ; U_{SC} – напряжение на демпфирующей цепи; U_F – напряжение на предохранителе в цепи пробитого конденсатора.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРОВОДНИКА

При выборе сечения отключающего элемента предохранителя должны быть выполнены два взаимоисключающих требования, вытекающие из необходимости обеспечения надежного функционирования как в рабочем, так и аварийном режимах. С одной стороны, отключающий элемент должен надежно выдерживать тепловые нагрузки в номинальном эксплуатационном режиме (при максимальных рабочих токах), которые соответствуют величине интеграла действия тока $0.22 \text{ MA}^2 \cdot \text{с}$, а с другой – обеспечить достаточно быстрое отключение поврежденного конденсатора демпфирующей цепи в аварийном режиме.

Расчет сечения отключающего элемента выполнен путем решения уравнения теплового баланса без учета потери тепла в окружающее пространство [5]:

$$\int_{T_0}^{T_m} \frac{dT}{1 + \alpha T} = \frac{\rho_0}{S^2 c \gamma_0} \int I^2(t) dt, \quad (1)$$

где c – теплоемкость материала отключающего элемента (зависимость теплоемкости от температуры в первом приближении не учитывается); γ – плот-

ность материал отключающего элемента; ρ_0 – удельное сопротивление материала отключающего элемента при температуре окружающей среды; S – площадь сечения отключающего элемента; α – температурный коэффициент сопротивления материала отключающего элемента; $I(t)$ – функция тока в отключающем элементе предохранителя.

Исходя из требований долговечности отключающего элемента необходимо обеспечить соответствующий температурный режим его работы без перегрева [6]. С учетом ограничения по максимально допустимой температуре для выбранного типа изоляции проводников (150°C) при значении интеграла действия тока в номинальном режиме $0.22 \text{ MA}^2 \cdot \text{с}$ площадь сечения отключающего элемента выбирается равной 3.08 мм^2 .

КОММУТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытательный стенд

С целью проверки технических решений, использованных в конструкции предохранителя, была разработана испытательная схема (рис. 5), построенная на основе конденсаторной батареи с запасаемой энергией до 1 МДж. В предложенной

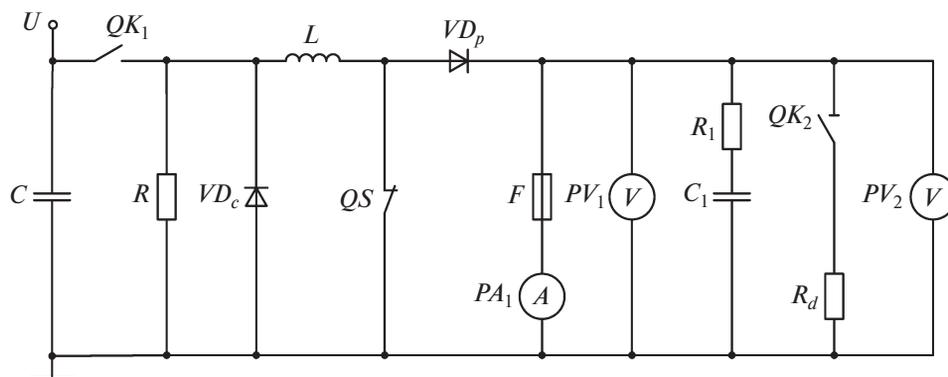


Рис. 5. Электрическая схема испытательного стенда. F – испытываемый предохранитель; QK_1 – игнитронный разрядник; QK_2 – защитный замыкатель; QS – быстродействующий управляемый размыкатель; PV_1 – датчик напряжения; PA_1 – датчик тока; C – конденсаторная батарея (0.16 Ф); L – формирующая индуктивность (490 мкГн); R_d – разрядное сопротивление (300 Ом); R – сопротивление резистора в цепи запуска (0.3 Ом); R_1 – сопротивление нагрузки (0.39 Ом); C_1 – емкость (от 400 до 1200 мкФ); VD_c – сборка кроубарных диодов; VD_p – сборка отсекающих диодов.

испытательной схеме проверялись основные характеристики предохранителя: коммутационная способность в аварийных режимах при максимальных токах и напряжениях; коммутационные характеристики, соответствующие пониженным отключаемым токам, и электрическая прочность после срабатывания предохранителя.

Конденсаторная батарея C с формирующей катушкой индуктивности $L = 490$ мкГн заряжается до напряжения, необходимого для получения

тока требуемой амплитуды – от 14 до 32 кА, а затем, после получения сигнала на запуск, разряжается на управляемый размыкатель QS . Таким образом, в исходном состоянии предохранитель F шунтируется размыкателем до момента времени, когда ток достигает требуемого значения, после чего срабатывает размыкатель и ток переводится в предохранитель. Когда интеграл действия тока через предохранитель достигает порогового уровня, соответствующего испарению материала про-

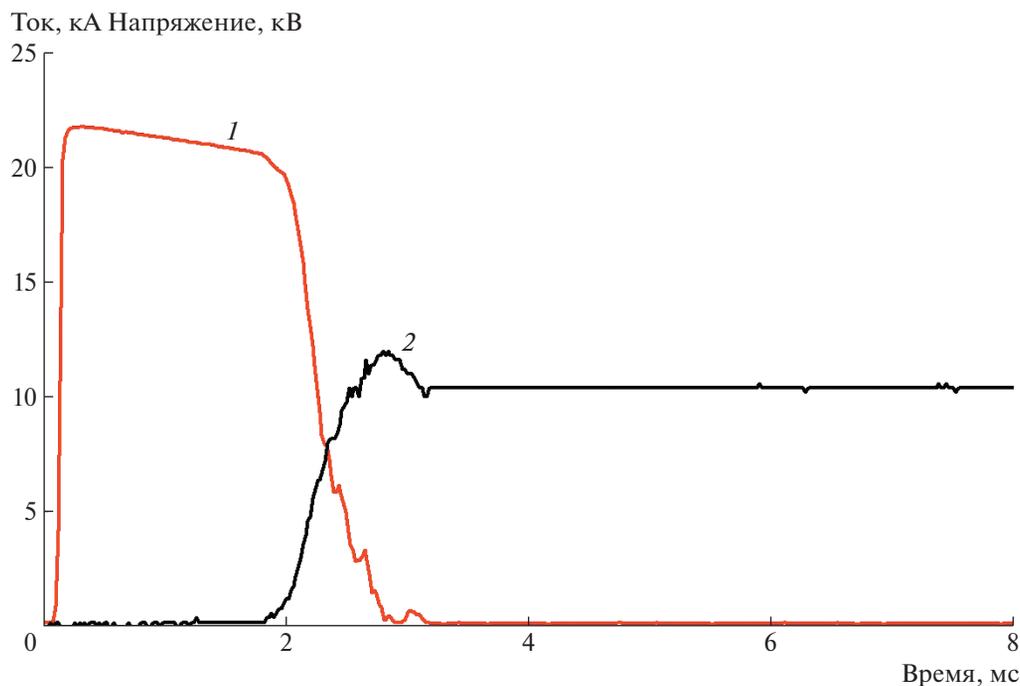


Рис. 6. Осциллограмма тока (1) и напряжения (2) на предохранителе в режиме коммутации аварийных токов.

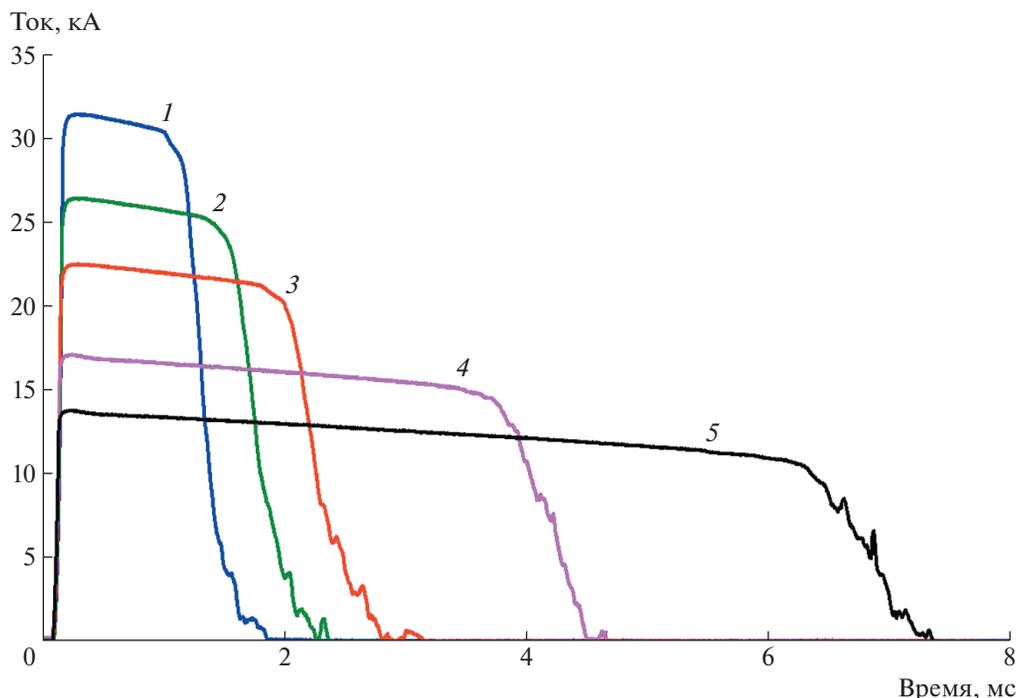


Рис. 7. Результаты испытаний предохранителя при различных величинах коммутируемого тока при площади поперечного сечения отключающего элемента 3.08 мм^2 . Нумерация осциллограмм на рисунке соответствует табл. 1.

водника, предохранитель размыкается за время $\sim 1 \text{ мс}$ и ток переводится в нагрузочную R_1C_1 -цепь, задающую амплитуду и форму восстанавливающегося напряжения на предохранителе. Сборка отсекающих диодов VD_p препятствует разряду конденсаторов цепи нагрузки в запасную емкость конденсаторной батареи. Это позволяет обеспечить длительное приложение напряжения к объекту испытаний, а также исследовать восстанавливающуюся электрическую прочность коммутационного промежутка с применением метода критических режимов [7].

Согласно спецификации ИТЭР, условия срабатывания предохранителя соответствуют току 20 кА при напряжении 10 кВ . Эти условия были

достигнуты при использовании нагрузочной R_1C_1 -цепи с параметрами 0.39 Ом , 800 мкФ . Затем была проведена новая серия испытаний при повышенных значениях восстанавливающегося напряжения с уменьшенным до 200 мкФ значением емкости.

Кривые тока регистрировались преобразователями тока СWT (пояс Роговского). Для измерения напряжения использовались высоковольтные щупы Tektronix P6015A.

Результаты испытаний

На рис. 6 представлена типовая осциллограмма процесса переключения тока предохраните-

Таблица 1. Результаты испытаний предохранителя с поперечным сечением проводника 3.08 мм^2

Номер кривых на рис. 7	Амплитудное значение тока в предохранителе, кА	Время отключения, мс	Амплитудное/длительное значение напряжения на предохранителе, кВ	Интеграл действия плотности тока, $10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$
1	31.4	0.85	18/16	1.016
2	26.4	1.00	15/13	1.074
3	22.5	1.34	12/10	1.108
4	17.0	1.16	15/13	1.040
5	13.7	1.26	9/8	1.039

лем, записанная в условиях, близких к аварийному режиму в демпфирующей цепи (20 кА, 10 кВ). Полная длительность переходного процесса в этих условиях, включая нарастание и отключение тока, составляет ~3 мс.

С увеличением аварийного тока продолжительность процесса коммутации уменьшается вследствие квадратичной зависимости интеграла действия тока, необходимого для ЭВП, от протекающего по предохранителю тока. При этом длительность спада тока во всех экспериментах изменялась незначительно и увеличивалась с уменьшением амплитуды отключаемого тока, что связано со снижением интенсивности выделяемой в предохранителе энергии в процессе коммутации тока.

На рис. 7 приведены результаты испытаний предохранителя при различных величинах коммутируемого тока. Основные результаты испытаний: амплитудное значение тока в предохранителе, время отключения (длительность спада тока по заднему фронту), амплитудное значение напряжения на предохранителе и интеграл действия плотности тока в предохранителе — сведены в табл. 1.

Согласно табл. 1 и осциллограммам на рис. 7, увеличение коммутируемого тока сопровождается сокращением длительности процесса коммутации, при этом кривая тока на спаде стремится к линейной форме с минимальным числом всплесков, предположительно соответствующих возникновению шунтирующих разрядов на отдельных участках отключающего элемента. Возникновение всплесков становится возможным в случае, когда интенсивность вводимой в проводник энергии в процессе коммутации недостаточна для полной сублимации металла отключающего элемента. Конструкция и принцип работы предохранителя обеспечивают возможность его срабатывания в режимах с ЭВП и позволяют его применять для отключения токов относительно широкого диапазона. При этом следует отметить, что верхняя граница коммутируемых токов будет определяться механической прочностью изоляционных труб и выделяемой в предохранителе энергией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан простой и надежный сильноточный высоковольтный предохранитель однократного действия.

Предложено схемотехническое решение с использованием емкостного накопителя энергии, позволяющее при проведении коммутационных испытаний задавать в широком диапазоне величину послекоммутационного испытательного напряжения.

Коммутационные испытания, проведенные на прототипах предохранителя, продемонстрировали его надежную работу в заданных параметрах. Получены положительные результаты испытаний с длительным приложением послекоммутационного напряжения величиной 16 кВ, что на 78% превышает требования ИТЭР (9 кВ). Предохранитель будет использоваться в качестве защитного элемента в системах коммутации цепей питания магнитных катушек ИТЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Song I., Roshal A., Tanchuk V., Thomsen J., Milani F., Benfatto I.* // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing. IEEE, 2011. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2011.6073779>
2. *Neumeyer C., Benfatto I., Hourtoule J., Tao J., Mankani A., Milani F., Nair S., Suh I., Tan H., Wang M., Oh J.S., Roshal A.* // 2013 IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE). San Francisco, CA, USA. IEEE, 2013. P. 1. <https://doi.org/10.1109/SOFE.2013.6635287>
3. *Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 26–31.
4. *Serebrov R.A., Enikeev R.Sh., Fridman B.E.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. № 1. P. 250. <https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2225642>
5. *Намитокоев К.К., Хмельницкий Р.С., Аникеева К.Н.* Плавкие предохранители. М.: Энергия, 1979. С. 45–51.
6. *Кульгавчук В.М.* // ПТЭ. 1966. № 2. С. 159.
7. *Аполлонский С.М., Козярук Е.А., Куклёв Ю.В.* Испытания и системы контроля электрических аппаратов. Учебное пособие. СПб.: Троицкий мост, 2016. С. 192–199.