

## Пропускная способность ограничителей перенапряжений в составе вакуумных выключателей постоянного тока

АЛФЕРОВ Д.Ф., ЕВСИН Д.В., ЗЕНЬКОВИЧ Г.А., ЦХАЙ Е.В.

*Приводятся результаты численного моделирования и экспериментального исследования пропускной способности ограничителей перенапряжений типа ОПН-ТП-3,0/4-УХЛ 3 в составе автоматического быстродействующего вакуумного выключателя постоянного тока на максимальное напряжение 4,1 кВ. Принцип работы вакуумного выключателя основан на принудительном переводе отключаемого тока через нуль с помощью встречного разряда предварительно заряженного конденсатора. Предложена численная модель, которая была реализована в пакете Matlab 6.5 с использованием библиотеки Sim Power Systems. Применимость модели была экспериментально подтверждена при отключении тока вакуумным выключателем в режиме имитации тока короткого замыкания с разными скоростями нарастания тока. Исследования проводились на высоковольтном испытательном стенде, который представляет собой колебательный контур с конденсаторной батареей на максимальное напряжение до 6 кВ с суммарной энергоемкостью до 1,8 МДж. Численная модель удовлетворительно описывает процессы при отключении тока в вакуумном выключателе постоянного тока с принудительным переводом тока через нуль и позволяет оценить уровень рассеиваемой энергии в блоке ОПН при отключении тока короткого замыкания. Предложенная модель позволяет также оценить необходимое число параллельно соединенных ОПН при отключении аварийных токов в сетях тягового электроснабжения постоянного тока с индуктивностью от 5 до 15 мГн.*

**Ключевые слова:** ограничитель перенапряжений, вакуумный выключатель постоянного тока, численное моделирование, ток короткого замыкания, пропускная способность

Для коммутации силовых цепей на подвижном составе электрифицированного транспорта, на тяговых подстанциях, в высоковольтных сетях постоянного тока и на промышленных установках используются выключатели постоянного тока. В настоящее время для этих целей широко применяются электромагнитные выключатели. Автоматические быстродействующие выключатели серии ВАБ и ВАТ [1] предназначены для защиты силовых цепей и электрооборудования от токов короткого замыкания (КЗ) и перегрузок на тяговых подстанциях городского и железнодорожного электротранспорта. Собственное время отключения таких выключателей составляет до 8 мс, полное время отключения – до 50 мс.

Существенно уменьшить время отключения позволяет использование быстродействующих вакуумных выключателей (БВВ) на основе вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) с принудительным переводом тока через нуль с помощью схемы противотока [2, 3] и гибридных выключателей, в которых ВДК шунтируется управляемым силовым полупроводниковым прибором (СПП) [4]. Сравнительно малое время горения дуги в ВДК (менее 5 мс) определяется временем разведения контактов на максимальное расстояние до 4 мм, что обеспечивается индукционно-динамическим приводом. В гибридном выключателе отключение тока осуществляется с помощью СПП, в который ток переходит

при разведении контактов ВДК. Такие выключатели характеризуются быстрым отключением тока с минимальным временем горения дуги (менее 1 мс).

Одной из проблем, которую необходимо решить при отключении токов КЗ в вакуумном и гибридном выключателях постоянного тока, является рассеяние электромагнитной энергии, запасенной в индуктивности сети к моменту отключения тока, и ограничение перенапряжений, возникающих на элементах выключателя. Высокий уровень перенапряжений  $U \approx L_c di/dt$  обусловлен быстрым спадом тока отключения  $di/dt$  в ВДК и индуктивностью сети  $L_c$ , которая, например, в тяговых сетях электрифицированного железнодорожного транспорта достигает 15 мГн. Для решения этой проблемы используется ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН), который устанавливается параллельно выключателю и обеспечивает ограничение перенапряжений на уровне не более 9 кВ и поглощение накопленной в сети электромагнитной энергии. Количество поглощенной энергии не должно превышать рассеиваемую во внешнее пространство энергию. В противном случае произойдет постоянное нарастание температуры ОПН и последующее его тепловое разрушение. Допустимое значение поглощенной энергии ОПН без потери рабочих качеств называется энергоемкостью. Если энергоемкость одного ОПН меньше допустимой, то потребуются их параллельное соединение.

В этом случае возрастает вероятность выхода из строя сборки ОПН за счет деградации наиболее нагруженного элемента. Поэтому контролю равномерности нагрузки элементов следует уделять особое внимание [5].

В статье приводятся результаты численного моделирования и экспериментального исследования коммутационной способности оксидно-цинковых (ZnO) ограничителей перенапряжений в составе вакуумного выключателя постоянного тока, который может быть использован в сверхпроводниковых ограничителях тока и для отключения аварийного тока в сетях тягового электроснабжения постоянного тока ОАО «РЖД» с индуктивностью от 5 до 15 мГн.

**Объект исследований.** В качестве объекта исследований использовался опытный образец быстродействующего вакуумного выключателя постоянного тока типа БВВ-3,3-4000/30 УХЛЗ. Выключатель БВВ содержит коммутационный модуль В из двух соединенных параллельно вакуумных дугогасительных камер (ВДК) типа КДВ-3-2000/10 УХЛ2, контур противотока и блок ОПН (рис. 1). Основные параметры БВВ:

Параметр	Значение параметра
Номинальный ток	4 000 А
Номинальное напряжение главной цепи	3 300 В
Ток отключения	10 000 А (не более)
Напряжение, возникающее в процессе отключения аварийного тока на контактах выключателей в цепи с индуктивностью 5 -- 15 мГн	9 кВ
Пределы токов уставки	1 000 ... 6 000 А
Собственное время размыкания	0,001 с (не более)
Полное время разведения контактов	0,005 с (не более)
Полное время отключения при индуктивности цепи:	
5 мГн	0,016 с
10 мГн	0,021 с
15 мГн	0,030 с
Время включения	0,020 с (не более)
Число камер в коммутационном блоке	2 шт.

Контур противотока с последовательно соединенными конденсатором  $C$ , индуктивностью  $L$  и быстродействующим ключом  $S$  подсоединен параллельно ВДК. Блок ОПН, подключенный параллельно ВДК, содержит четыре параллельно соединенные нелинейные сопротивления. В качестве ключа  $S$  используется вакуумный управляемый разрядник РВУ-31. В качестве нелинейных сопротивлений используются ограничители перенапряжений нелинейные типа ОПН-ТП-3,0/4-УХЛЗ [6], параметры которых приведены далее:

Параметр	Значение параметра
Номинальное напряжение	3 300 В
Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение постоянного тока	4 000 В
Номинальный разрядный ток (грозовой импульс тока 8/20 мкс)	10 000 А
Остающееся напряжение, при коммутационном треугольном импульсе тока с амплитудным значением 2 300 А при длительности импульса по основанию 10 мс	9 000 В (не более)

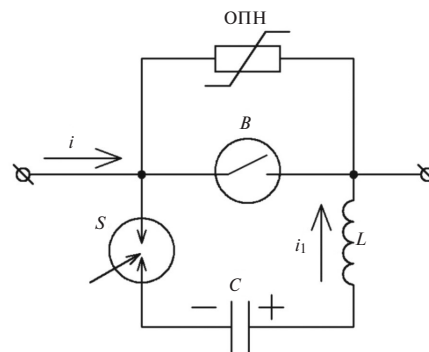


Рис. 1. Принципиальная схема БВВ

**Моделирование процесса коммутации постоянного тока в вакуумных выключателях.** Моделирование процесса отключения постоянного тока в вакуумном выключателе проводилось ранее в работах [2, 7]. Однако в этих работах не исследовалось влияние индуктивности электрической сети на уровень рассеиваемой в ОПН энергии. В настоящем разделе средствами компьютерного моделирования проведены расчеты рассеиваемой в ОПН энергии при отключении постоянного тока в тяговых сетях электрифицированного железнодорожного транспорта для разных индуктивностей сети.

Моделирование проводилось в пакете Matlab 6.5 с использованием приложения Simulink 4.1, предназначенного для моделирования динамических систем. Среда Simulink включает в себя множество библиотек, используемых в различных отраслях техники. Одна из таких библиотек Sim Power Systems (SPS) ориентирована на моделирование электротехнических устройств и силовой полупроводниковой техники [8]. На рис. 2 показана структурная схема SPS-модели для расчета процесса коммутации в выключателе постоянного тока (рис. 1) при постоянном источнике питания  $U_0 = 4100$  В и сопротивлении сети  $R_0 = 0,117$  Ом, что соответствует установившемуся току  $I_{кз} = 35000$  А.

Для учета параметров тяговой сети в модель введена индуктивность  $L_0$ . Ключи  $S_1, S_2$ , отвечающие за коммутацию главного контура и контура противотока и ключ  $S_3$ , имитирующий ВДК, смоделированы с помощью блока *Breaker*. Регистрация токов и напряжений проводится с помощью виртуальных датчиков тока  $I_{br}, I_{vdk}, I_{opn}$  (*Current Measurement*) и напряжения  $U_{vdk}$  (*Voltage*

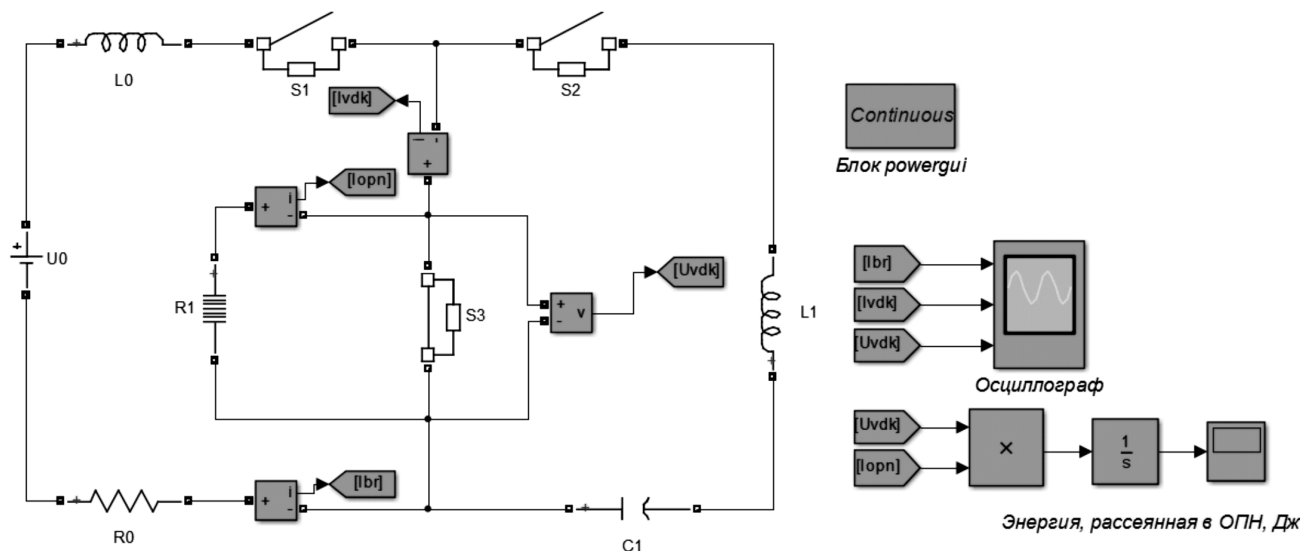


Рис. 2. Структурная схема SPS-модели отключения вакуумным выключателем постоянного тока

Measurement), а также виртуального осциллографа (Time Scope). Блок *powergui* служит для задания параметров расчета схемы.

Для моделирования ОПН был использован элемент *Surge Arrester* библиотеки Sim Power Systems, представляющий собой нелинейное сопротивление  $R_1$ , ВАХ которого аппроксимируется комбинацией трех экспоненциальных функций вида

$$\frac{U}{U_{ref}} = k_i \left( \frac{I}{I_{ref}} \right)^{1/\alpha_i}, \quad (1)$$

где  $U$  и  $I$  – мгновенные значения напряжения и тока ОПН;  $U_{ref}$  и  $I_{ref}$  – защитное напряжение ОПН и его ток при этом напряжении;  $k_i$  и  $\alpha_i$  – параметры  $i$ -го участка нелинейной зависимости.

Далее, при сравнении этой ВАХ с ВАХ для коммутационного воздействующего импульса реального ОПН, полученной от производителя, были определены все требуемые значения:  $U_{ref} = 9000$  кВ;  $I_{ref} = 1000$  А;  $\alpha_1 = 68$ ;  $\alpha_2 = 35$ ;  $\alpha_3 = 32$ ;  $k_1 = 0,8$ ;  $k_2 = 0,9$ ;  $k_3 = 0,8$  ( $\alpha_i$ ,  $k_i$  – показатель степени и коэффициент, определяющие нелинейность вольт-амперной характеристики ОПН).

Результаты расчета изменения тока  $i_{vdk}$  в ВДК, тока  $i_{opn}$  через ОПН и напряжения  $U$  на выключателе при отключении тока в цепи с индуктивностями  $L_0 = 5, 10$  и  $15$  мГн представлены на рис. 3. В начальный момент замыкался ключ  $S_1$  и имитировался процесс КЗ. При достижении током  $i_{vdk}$  заранее обозначенного значения – тока уставки  $I_S = 6$  кА с задержкой  $\Delta t_{br} = 5$  мс – подавалась команда на выключение ключа  $S_3$  и включение ключа  $S_2$ . В результате в  $L_1 C_1$ -контуре возникал протivotок, направленный противоположно току в ВДК, и если амплитуда протivotока превышала ток КЗ, то суммарный ток переходил через нуль и цепь ключа  $S_3$  разрывалась.

Ток отключения

$$I_{br} = I_S + \Delta t_{br} di / dt \quad (2)$$

уменьшался от 9 до 7 кА с увеличением индуктивности  $L_0$ . При отключении тока на выключателе возникало напряжение, уровень которого  $U_{opn} \approx 8$  кВ ограничивался нелинейным сопротивлением  $R_1$  (блоком ОПН). При этом ток перетекал из ВДК в ОПН и практически линейно спадал в течение времени  $\Delta t_{opn}$ . Длительность спада тока  $i_{opn}$  увеличивалась до  $\Delta t_{opn} \approx 25$  мс с увеличением  $L_0$  до 15 мГн.

Предложенная модель использовалась для расчета зависимости рассеиваемой в ОПН энергии  $W_{calc}$  от токов уставки  $I_S$  для фиксированных параметров индуктивности сети  $L_0 = 5, 10$  и  $15$  мГн. Для расчета энергии  $W_{calc}$  использовался блок интегрирования (*integrator*). Ток уставки подбирался путем выбора момента срабатывания выключателя ( $S_3$ ) и момента коммутации контура протivotока ( $S_2$ ) из

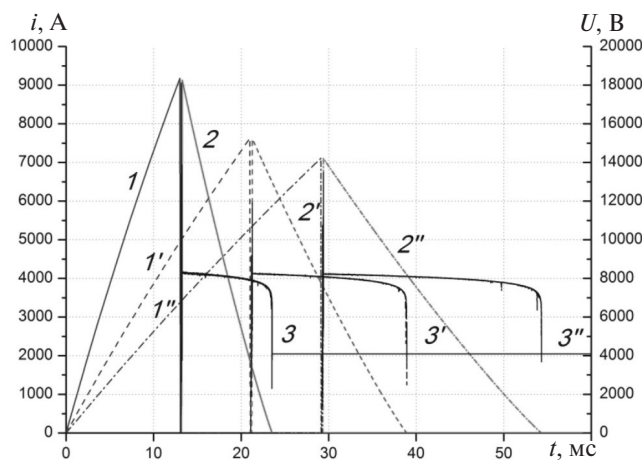


Рис. 3. Зависимости тока  $i$  и напряжения  $U$  на выключателе от времени при разных значениях индуктивности  $L_0$ : 1 – ток  $i_{vdk}$  в ВДК; 2 – ток  $i_{opn}$  через ОПН; 3 – напряжение  $U_{opn}$  на выключателе при  $L_0 = 5$  мГн (линии 1,2,3);  $L_0 = 10$  мГн (линии 1',2',3');  $L_0 = 15$  мГн (линии 1'',2'',3'')

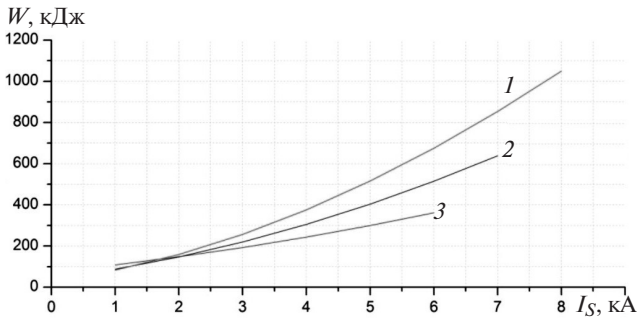


Рис. 4. Зависимости энергии  $W_{calc}$ , выделяющейся в ОПН при отключении тока, от тока уставки  $I_S$  при разных значениях индуктивности сети  $L_0$ : 1 –  $L=5$  мГн; 2 – 10 мГн; 3 – 15 мГн

условия (2)  $I_{br} \leq 10$  кА. Рассчитанные таким образом зависимости представлены на рис. 4.

Из результатов расчета, представленных на рис. 4, следует, что в одном цикле отключения при  $L_0 = 15$  мГн и  $I_S = 6$  кА максимальная рассеиваемая в ОПН энергия  $W_{calc} = 675,1$  кДж. В режиме автоматического повторного включения (АПВ) реализуется три отключения тока. В этом цикле при  $L_0 = 15$  мГн и  $I_S = 6$  кА в ОПН будет рассеиваться энергия  $W_{calc} = 2025,3$  кДж.

**Условия и методика экспериментальных исследований.** Применимость предложенной модели для расчетов нагрузочных характеристик ОПН была экспериментально подтверждена при отключении тока вакуумным выключателем в режиме имитации тока КЗ с разными скоростями нарастания тока. Исследования проводились на сильноточном испытательном стенде АО «НИИТФА» [9]. Источник импульсного тока состоит из конденсаторной батареи емкостью  $C_0$  до 100 мФ на максимальное напряжение 6 кВ и реактора с индуктивностью  $L_0$  до 15 мГн (рис. 5). Выключатель подключался к предварительно заряженной конденсаторной батарее при включении разрядника  $S_1$ .

Порядок работы стенда: первоначально разрядник  $S_1$  разомкнут, а контакты ВДК выключателя  $B$  замкнуты. После зарядки конденсаторной батареи  $C_0$  до заданного напряжения  $U_0$  подавался сигнал на включение разрядника  $S_1$ . В цепи начинал протекать разрядный ток  $i$ , амплитуда которого  $I_m$  регулировалась изменением зарядного напряжения  $U_0$  и подбором емкости  $C_0$  и индуктивности  $L_0$ .

Управление отключением выключателя осуществлялось по току уставки. При превышении тока уставки система управления выключателя формировала команду на разведение контактов выключателя  $B$  и включение разрядника  $S_2$  с временной задержкой  $\Delta t_{br} = 5$  мс, определяемой временем разведения контактов ВДК на расстояние 4 мм. При включении разрядника  $S_2$  в цепи контура противотока начинал протекать ток  $i_p$ , амплитуда которого  $I_p = U_{C1} / \sqrt{L_1 / C_1} > i$ . В результате суммарный ток в

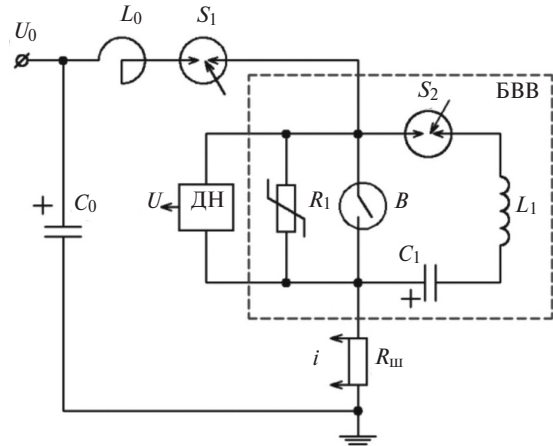


Рис. 5. Схема испытаний

контуре противотока спадал до нуля и происходило отключение тока в ВДК. При этом на контактах выключателя быстро восстанавливалось напряжение, которое ограничивалось на уровне 8 кВ при открытии ОПН. Разрядный ток  $i$  перетекал в нелинейное сопротивление  $R_1$  (блок ОПН), на котором рассеивалась накопленная в индуктивности  $L_0$  энергия, что проявлялось в увеличении его температуры. В каждом опыте термопарой измерялись температура окружающего воздуха  $T_1$  перед коммутацией и температура  $T_2$  фланцев ОПН после каждой коммутации. В серии из нескольких отключений подряд конденсаторная батарея  $C_0$  перед каждым опытом подзарядалась до заданного напряжения  $U_0 = 3$  кВ с интервалом 2 мин. В качестве разрядников  $S_1$  и  $S_2$  использовались управляемые вакуумные разрядники РВУ-31Н [10].

В процессе проведения испытаний разрядный ток  $i$  измерялся бифилярным шунтом  $R_{ш} = 154$  мкОм. Напряжение  $U$  на выключателе измерялось датчиком напряжения ДН типа CV3-2000 на эффекте Холла с коэффициентом 984. Электрические сигналы регистрировались цифровым осциллографом DPO-4034В с последующей обработкой осциллограмм на персональном компьютере.

**Результаты экспериментальных исследований.** Испытания блока из четырех ОПН в составе выключателя приводились при отключении тока до 10 кА при разных значениях индуктивности  $L_0$ : 2,6; 6; 10 и 15 мГн. Отключаемый ток  $I_{br} \leq 10$  кА подбирался зарядным напряжением конденсаторной батареи  $U_0 = 3 \div 3,5$  кВ емкостью  $C_0 = 33 \div 99$  мФ и током уставки  $I_S = 6,5 \div 8,5$  кА.

На рис. 6 представлены зависимости тока  $i_{br}$  в разрядной цепи и напряжения  $U_{br}$  на выключателе от времени, полученные при  $U_0 = 3,5$  кВ, емкости конденсаторов  $C_0 = 99$  мФ, индуктивности реактора  $L_0 = 15$  мГн и токе уставки  $I_S = 6,6$  кА. Здесь же показаны результаты расчета SPS-модели при выбранных параметрах стенда, которые удовлетвори-

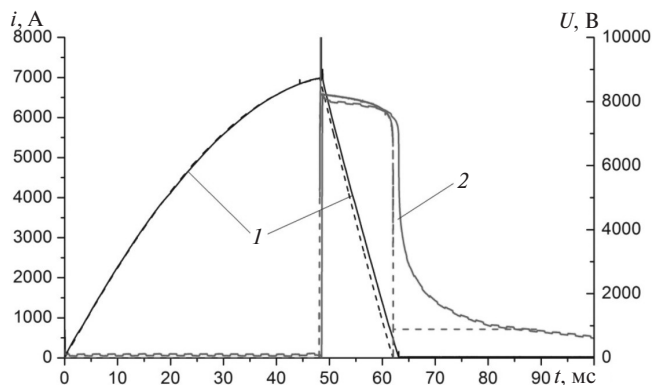


Рис. 6. Зависимости тока  $i_{br}$  разряда (1) и напряжения  $U_{br}$  на выключателе (2) от времени: — эксперимент; ---- расчет

тельно согласуются с экспериментом. Предложенная численная модель может использоваться для расчета процесса отключения тока вакуумным выключателем постоянного тока тяговых сетей метрополитена и городского наземного транспорта.

При токе  $I_{br}$ , равном 7 кА, на 48 мс после начала ВДК отключала ток и на выключателе появлялось медленно спадающее напряжение  $U_{br}$ , ограниченное ОПН на уровне 8 кВ длительностью  $\Delta t_{опн} = 14,5$  мс. В течение этого времени ток  $i_{опн}$  практически линейно спадал до нуля. В этом опыте рассеянная в блоке ОПН энергия, найденная из выражения

$$W_{\text{exp}} = I_{br} U_{br} \Delta t_{опн} / 2 \quad (3)$$

была равна  $W_{\text{exp}} \approx 794$  кДж. При этой энергии перегрев фланцев ОПН составил  $\Delta T = T_2 - T_1 = 66^\circ \text{C}$ .

Отметим, что длительность  $\Delta t_{опн}$  спада тока в ОПН при  $L_0 = 15$  мГн и сравнимых токах отключения в условиях наших опытов (рис. 6) оказалась заметно меньше, чем в расчетах для постоянного источника питания (рис. 3). Это может быть обусловлено спадом напряжения на конденсаторной батарее в момент отключения тока до  $U_0 \approx 900$  В.

Результаты измерений рассеянной в блоке ОПН энергии  $W_{\text{exp}}$  и перегрева фланцев ОПН  $\Delta T_{\text{exp}}$ , полученные с разными значениями индуктивности  $L_0$  и емкости  $C_0$ , представлены в таблице и на рис. 7. Параметры стенда подбирались таким образом, чтобы ток отключения не превышал 10 кА. Рассеянная в ОПН энергия  $W_{\text{exp}}$  определялась в интервале времени спада тока  $\Delta t_{опн}$  из осциллограмм тока и напряжения для разных значений индуктивности  $L_0 = 2,5; 6; 10$  и 15 мГн. Для сравнения в таблице приведены результаты расчета по SPS-модели рассеянной в блоке ОПН энергии  $W_{\text{calc}}$ . Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетом.

При  $L_0 = 2,5$  мГн были проведены опыты как при одном отключении тока 9,65 кА ( $W_1 = 132$  кДж), так и при трех отключениях подряд ( $W_3 = 390$  кДж).

Перед началом каждого опыта из серии конденсаторная батарея  $C_0$  подзаряжалась до заданного напряжения  $U_0 = 3$  кВ. За время зарядки батареи  $C_0$  подавалась команда на замыкание контактов ВДК В, происходил заряд конденсатора контура противотока  $C_1$  и к началу следующего опыта выключатель находился в состоянии готовности. Три отключения подряд моделировали режим автоматического повторного отключения (АПВ), которое согласно ГОСТ-2585—81 в тяговых сетях железнодорожного транспорта содержит следующие циклы операций: О—6 секунд—ВО—6 секунд—О (здесь О — операция отключения тока; В — операция включения; ВО — операция включения на короткое замыкание из отключенного положения и следующую за ней операцию отключения). При  $L_0 = 6$  мГн и токе отключения 9,4 кА рассеянная в одном опыте энергия  $W_1 = 275$  кДж, а при двух опытах подряд  $W_3 = 547$  кДж. Максимальный уровень рассеиваемой в двух отключениях энергии  $W_2 = 794$  кДж был получен при  $L_0 = 15$  мГн и токе отключения 6,95 кА.

Зависимость перегрева ОПН  $\Delta T_{\text{calc}}$  от рассеянной в них энергии  $W_{\text{calc}}$  была рассчитана в адиабатическом приближении в условиях испытаний:

$$\Delta T_{\text{calc}} = W_{\text{calc}} / (M_{опн} C_{опн}), \quad (4)$$

где  $M_{опн}$  — масса блока ОПН,  $C_{опн}$  — теплоёмкость ОПН.

Результаты расчета представлены в таблице и на рис. 7. Расчетное превышение температуры  $\Delta T_{\text{calc}}$  к при массе блока из четырех ОПН  $M_{опн} = 12$  кг и  $C_{опн} = 1,05$  кДж/(кгград) [11] удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Полученные результаты продемонстрировали линейность накопленной в блоке ОПН энергии от числа опытов.

По данным производителя допустимый уровень перегрева на фланцах одного ОПН составлял  $\Delta T$ , град.

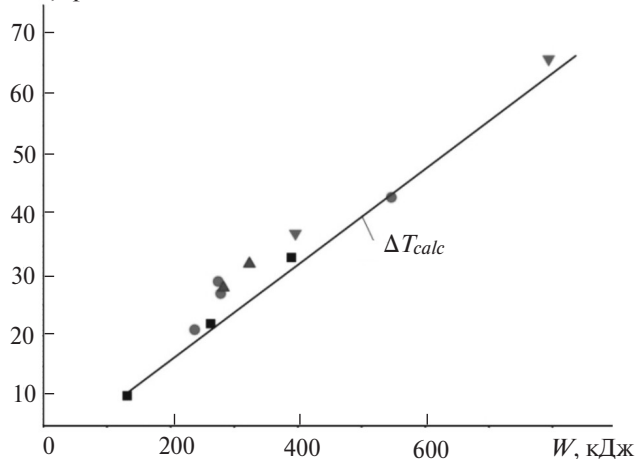


Рис. 7. Температура перегрева блока ОПН в зависимости от рассеянной в них энергии: ■ —  $L_0 = 2,5$  мГн; ● —  $L_0 = 6$  мГн; ▲ —  $L_0 = 10$  мГн; ▼ —  $L_0 = 15$  мГн; — расчет  $\Delta T_{\text{calc}}$

$C_0$ , мФ	$L_0$ , мГн	$U_0$ , кВ	$W_{\text{exp}}$ , кДж	$I_{\text{уст}}$ , А	$W_{\text{exрсумм}}$ , кДж	$W_{\text{calc}}$ , Дж	$\Delta T_{\text{exp}}$ , град	Примечание
33	2,5	3,0	132	7000	132	123	10	1 опыт
33	2,5	3,0	131	7000	—	—	—	2 опыта подряд
33	2,5	3,0	132	7000	263	—	22	
33	2,5	3,0	132	7000	—	—	—	3 опыта подряд
33	2,5	3,0	127	7000	—	—	—	
33	2,5	3,0	131	7000	390	—	33	
66	6	3,0	243	8500	243	—	21	1 опыт
66	6	3,2	279	8500	279	280	27	1 опыт
66	6	3,2	275	8500	275	—	29	1 опыт
66	6	3,2	279	8500	—	—	—	2 опыта подряд
66	6	3,2	268	8500	547	—	43	
77	10	3,2	283	7000	283	—	28	1 опыт
77	10	3,4	324	7000	324	274	32	1 опыт
99	15	3,5	396	6600	396	370	37	1 опыт
99	15	3,5	401	6600	—	—	—	2 опыта подряд
99	15	3,5	393	6600	794	—	66	

ет 170 ° С. Тогда согласно (4) один ОПН способен без разрушения рассеивать энергию  $W_1 \leq 535$  кДж. В электрической сети постоянного тока с максимальным напряжением 4,1 кВ в режиме АПВ из трех коммутаций при  $L_0 = 15$  мГн и  $I_S = 6$  кА в ОПН будет рассеиваться энергия  $W_{\text{calc}} = 2025,3$  кДж (результат моделирования). Такую энергию с запасом способен рассеивать блок из четырех ОПН  $W_{\text{calc}} < W_4 = 2142$  кДж.

**Заключение.** Основная проблема, которую необходимо решить при коммутации постоянного тока вакуумным выключателем, заключается в ограничении перенапряжений и поглощении электромагнитной энергии, накопленной в цепи к моменту отключения. Для решения этой проблемы параллельно выключателю подсоединяется ОПН.

Предложенная численная модель позволяет оценить требуемую нагрузочную способность блока ОПН в составе вакуумного выключателя постоянного тока, предназначенного для отключения аварийного тока в сетях тягового электроснабжения постоянного тока ОАО «РЖД» с индуктивностью от 5 до 15 мГн. Из результатов расчета следует, что при индуктивности  $L_0 = 15$  мГн и  $I_{\text{уст}} = 6$  кА для рассеивания максимальной энергии  $W_{\text{calc}} = 2025,3$  кДж в режиме АПВ потребуется четыре ОПН выбранной модели. Результаты численного моделирования подтверждены экспериментальным исследованием коммутационной способности вакуумного выключателя постоянного тока типа БВВ-3,3-4000/30 УХЛЗ.

Данная модель может использоваться и для расчета процесса отключения тока вакуумным выключателем постоянного тока тяговых сетей метрополитена и городского наземного транспорта.

*Авторы выражают благодарность сотруднику ООО «ЛМ Электро» Г.Г. Лаврентьеву за полезные обсуждения.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Выключатели** автоматические быстродействующие постоянного тока серий ВАБ, ВАТ //www.uetm.ru/files/katalog\_VAB\_VA\_2.pdf (10.06.2014)
- Боголепов А.В.** Применение вакуумного выключателя для защиты электроподвижного состава от токов короткого замыкания на тяговой сети постоянного тока. — Известия ПГУПС, 2008, № 1, с. 149—163.
- Алферов Д.Ф., Будовский А.И., Евсин Д.В., Иванов В.П., Неугодинов И.П., Сидоров В.А.** Быстродействующие вакуумные выключатели постоянного и переменного тока для сверхпроводникового ограничителя тока. — ЭЛЕКТРО, 2015, № 3, с. 43—47.
- Алферов Д.Ф., Ермилов И.В., Иванов В.П.** Высоковольтный силовоточный выключатель постоянного тока. — Электричество, 2001, №11, с. 14—19.
- Саенко И.В., Кузнецов В.В., Пинская Д.Б., Генельт А.Е.** Особенности защиты электрооборудования от коммутационных перенапряжений. — Энергия единой сети, 2016, № 1, с. 65—61.
- Каталог «ЛМЭ» 028-02.** [Электронный ресурс]. Ограничители перенапряжений для защиты электрооборудования. Режим доступа: <http://www.lme-opn.ru/catalog/LME028-02.pdf> свободный.
- Пупынин В.Н., Мартюкова В.А.** Идеальный выключатель постоянного тока. — Электроника и электрооборудование транспорта, 2013, №6, с. 17—20.
- Черных, И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008, 288 с.
- Фишер Л.М., Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Будовский А.И., Евсин Д.В., Волошин И.Ф., Калинов А.В.** Сверхпроводниковый ограничитель постоянного тока мощностью до 8 МВА. — Ядерная физика и инжиниринг, 2015, т. 6, № 11—12. с. 553—561.
- Пат. РФ** на полезную модель №121964 (РФ). Управляемый вакуумный разрядник/Алферов Д.Ф., Ахметгареев М.Р., Иванов В.П., Сидоров В.А. — Опубл.10.11.2012 — БИ № 31.
- Кротенок В.В., Бохан А.Н., Станишевский В.В.** Моделирование нелинейного ограничителя перенапряжений. — Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014, № 1, с. 79—90.

*Авторы: Алфёров Дмитрий Фёдорович в 1969 г. окончил Московский инженерно-физический институт – ныне Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». В 2010 г. защитил докторскую диссертацию «Физико-технические основы создания вакуумных электрических аппаратов для коммутации импульсных и постоянных токов». Главный научный сотрудник научно-производственного отделения сверхпроводниковых ограничителей тока (НПО СОТ 22) акционерного общества «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации» (АО «НИИТФА»).*

*Евсин Дмитрий Викторович в 2003 г. окончил Московский энергетический институт. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Отключение постоянного тока вакуумным коммутационным аппаратом с аксиально-симметричным поперечным магнитным полем». Начальник лаборатории НПО СОТ 22) АО «НИИТФА».*

*Зенькович Генрих Александрович в 2017 г. окончил НИЯУ МИФИ. Младший инженер. Группа компаний САТЕЛ.*

*Цхай Евгения Викторовна в 1985 г. окончила Московский энергетический институт. Научный сотрудник НПО СОТ 22 АО «НИИТФА».*

*Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 10, pp. 30–36*

*DOI:10.24160/0013-5380-2018-10-30-36*

## Throughput Capacity of Metal-Oxide Surge Arresters Used as Part of DC Vacuum Circuit Breakers

**ALFEROV Dmitry F.** (Joint Stock Company «Research Institute Technical Physics and Automation» (JSC «RITPA»), Moscow, Russia) – Chief Researcher, Dr. Sci. (Eng.)

**EVSIN Dmitry V.** (JSC «RITPA» Moscow, Russia) – Head of laboratory, Cand. Sci. (Eng.)

**ZEN'KOVICH Genrikh A.** (Group of companies SATEL, Moscow, Russia) – Junior Engineer

**TSKHAI Eugeniya V.** (JSC «RITPA», Moscow, Russia) – Researcher

The article presents the results from numerical simulation and experimental investigation of the throughput capacity of Type OPN-TP-3.0/4-UKhL 3 metal-oxide surge arresters (MOSA) used as part of a high-speed automatic DC vacuum circuit breaker for the maximal voltage equal to 4.1 kV. The vacuum circuit breaker operation principle is based on forced making the disconnected current to pass through zero by means of arranging opposite discharge of a pre-charged capacitor. A numerical model is proposed, which has been implemented in the Matlab 6.5 software package using the Sim Power Systems library. The applicability of the model has been experimentally confirmed in disconnecting a current by a vacuum circuit breaker through simulating a short-circuit fault current with different current growth rates. The investigations were carried out on a heavy-current high-voltage test bench realizing an oscillatory circuit involving a capacitor bank for the maximal voltage of up to 6 kV and the total energy storage capacity of up to 1.8 MJ. The numerical model satisfactorily describes the processes in disconnecting a current in a DC vacuum circuit breaker with forcedly making the current to cross zero. The model also makes it possible to estimate the amount of energy dissipated in the MOSA unit in disconnecting a short-circuit fault current. By using the proposed model it is also possible to estimate the number of parallel-connected MOSAs in disconnecting emergency currents in traction DC power supply networks with an inductance ranging from 5 to 15 mH.

Key words: metal-oxide surge arrester, DC vacuum circuit breaker, numerical simulation, short-circuit fault current, throughput capacity

### REFERENCES

1. **Vyklyuchateli avtomaticheskoye bystrodeystvuyushchiye postoyannogo toka serii VAB, VAT** (Surtees an automatic fast-acting...): [www.uetm.ru/files/katalog\\_VAB\\_VA\\_2.pdf](http://www.uetm.ru/files/katalog_VAB_VA_2.pdf) (10.06.2014)
2. **Vodolepov A.V.** *Izvestiya PGUPS – in Russ. (Proc. of PGUPS)*, 2008, No. 1, pp. 149–163.
3. **Alferov D.F., Budovskii A.I., Yeysin D.V., Ivanov V.P., Neugodnikov I.P., Sidorov V.A.** *ELEKTRO – in Russ. (ELECTRO)*, 2015, No. 3, pp. 43–47.
4. **Alferov D.E., Yermilov I.V., Ivanov V.P.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 11, pp. 14–19.
5. **Sayenko I.V., Kuznestov V.V., Pinskaya D.B., Guenel't A.Ye.** *Energiya yedinoi seti – in Russ. (Energy of single network)*, 2016, No. 1, pp. 65–61.
6. **Katalog «LME» 028–02 Ogranichiteli perenapryazhenii dlya zashchity oborudovaniya** (Katalogue «LME» 028–02 Terminators of overstrains for defence of electrical equipment): <http://www.lme-opn.ru/catalog/LME028-02.pdf>
7. **Pupynin V.N., Martuykova V.A.** *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta – in Russ (Electronics and electrical equipment of transport)*, 2013, No. 6, pp. 17–20.
8. **Chernykh I.V.** *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, Sim Power Systems u Simulink* (A design of electrical engineering devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink). Moscow, Publ. DMK Press, 2008, 288 p.
9. **Fisher L.M., Alferov D.F., Akhmetgareyev M.R., Budovskii A.I., Yeysin D.V., Voloshin I.F., Kalinov A.V.** *Yadernaya fizika i inzhineriye – in Russ (Nuclear physics and engineering)*, 2015, vol. 6, No. 11–12, pp. 553–561.
10. **Patent RF na poleznuyu model 121964. Upravlyayemyi vakuumnyi razryadnik** (Patent RF 121964 for the useful model. «Controlled vacuum discharger»)/D.F. Alferov, M.R. Akhmetgareyev, V.P. Ivanov, V.A. Sidorov. Bulletin of inventions, 2012, No. 31.
11. **Krotchenok V.V., Bokhan A.N., Stanishevskii V.V.** *Vestnik GGTU imeni P.O. Sukhogo (Bulletin of GGTU named P.O. Sukhoi)*, 2014, No. 1, pp. 79–90.