

Повышение пропускной способности ограничителей перенапряжений в составе вакуумных выключателей постоянного тока

АЛФЕРОВ Д.Ф., БАРДИН А.Н., БУДОВСКИЙ А.И., ВОЛОДИН В.М.,
КАЛИНОВ А.В., ЦХАЙ Е.В.

Одной из проблем, которую необходимо решить при отключении токов короткого замыкания в вакуумном выключателе постоянного тока, является рассеяние электромагнитной энергии, запасенной в индуктивности сети L_c и приносимой источником к моменту отключения тока, а также ограничение перенапряжений, возникающих на элементах выключателя. Высокий уровень перенапряжений обусловлен быстрым спадом тока отключения в сети с индуктивностью 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 ограничивает перенапряжения, а также поглощает накопленную в индуктивности сети электромагнитную энергию. Поглощенная энергия не должна превышать энергию, рассеиваемую во внешнем пространстве. В противном случае произойдет постоянное нарастание температуры ОПН с последующим его тепловым разрушением. Энергия, поглощаемая в блоке ОПН при отключении тока зависит от тока отключения I_{br} и индуктивности сети L_c . Рассеиваемая энергия зависит от конструктивного исполнения блока и массы подводющих шин. Баланс между поглощенной и рассеиваемой энергией определяет пропускную способность блока ОПН без его деградации. Пропускная способность ОПН при импульсах большого тока определяется способностью выдерживать максимальное значение импульсов тока длительностью несколько миллисекунд. В статье приводятся результаты численного моделирования и экспериментального исследования способов повышения пропускной способности оксидно-цинковых (ZnO) ОПН в составе вакуумного выключателя постоянного тока.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрические сети, короткое замыкание, отключение, дугогасительная камера, ограничение перенапряжений

Для отключения тока короткого замыкания (КЗ) в электрических сетях постоянного тока в настоящее время используются дуговые электромагнитные выключатели типа ВАБ и ВАТ с гашением дуги в деионных решетках, которые характеризуются наличием открытой электрической дуги [1]. Выключатели отключают ток КЗ за счет увеличения напряжения на электрической дуге. Они имеют низкое контактное сопротивление, но отключение тока в этих аппаратах происходит медленно (до 50 мс). Из-за наличия открытой дуги электромагнитный выключатель имеет низкий коммутационный ресурс (до 100 отключений).

Существенно уменьшить время отключения и повысить коммутационный ресурс 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]. Эти быстродействующие выключатели содержат три параллельные ветви. Первая ветвь включает коммутационный модуль с ВДК, в которой происходит отключение тока, вторая ветвь – контур противотока – генерирует колебания тока в ВДК, а третья ветвь содержит нелинейный резистор, который обеспечивает ограничение перенапряжения, возникающего при быстром отключении тока в индуктивной цепи. Выключатели БВВ отличаются от традиционных электромагнитных выключателей постоянного тока (типа ВАБ) сравнительно большим коммутационным ресурсом (до 1000 коммутаций аварийного тока) и минимальными эксплуатационными затратами; БВВ обладают высокой отключающей способностью и низким уровнем рассеиваемой энергии в вакуумной дугогасительной камере (ВДК). Из-за небольшого межконтактного расстояния в ВДК и малой массы контактов время разведения

контактов менее 4 мс, что является его существенным преимуществом по сравнению с ВАБ.

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 и приносимой источником к моменту отключения тока, а также ограничение перенапряжений, возникающих на элементах выключателя. Высокий уровень перенапряжений $U \approx L_c di/dt$ обусловлен быстрым спадом тока отключения di/dt в ВДК в сети с индуктивностью 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, ограничивает перенапряжения на уровне не более 9 кВ и обеспечивает поглощение накопленной в сети электромагнитной энергии. Поглощенная энергия не должна превышать энергию, рассеиваемую во внешнем пространстве. В противном случае произойдет постоянное увеличение температуры ОПН с последующим его разрушением. Допустимое значение поглощенной энергии ОПН без потери рабочих качеств называется энергоемкостью [2]. Если энергоемкость одного ОПН меньше необходимой, то потребуются их параллельное соединение. В этом случае возрастает вероятность выхода из строя сборки ОПН из-за деградации наиболее нагруженного элемента (с наименьшим напряжением открывания). Поэтому особое внимание следует уделять контролю равномерности нагрузки элементов [5].

Энергия, поглощаемая в блоке ОПН при отключении тока $L_c I_{br}^2 L_c / 2$, зависит от тока отключения I_{br} и индуктивности сети. Рассеиваемая энергия зависит от конструктивного исполнения блока и массы подводящих шин. Баланс между поглощенной и рассеиваемой энергией определяет пропускную способность блока ОПН без его деградации. Пропускная способность ОПН при импульсах большого тока определяется способностью выдерживать максимальное значение импульсов тока длительностью несколько миллисекунд.

В статье приводятся результаты численного моделирования и экспериментального исследования способов повышения пропускной способности оксидно-цинковых (ZnO) ОПН в составе вакуумного выключателя постоянного тока.

Объект исследований. В качестве объекта использовался опытный образец быстродействующего вакуумного выключателя постоянного тока типа

БВВ-3,3-4000/30 УХЛЗ [6]. Выключатель БВВ (рис. 1) содержит коммутационный модуль ВДК из двух соединенных параллельно вакуумных дугогасительных камер типа КДВ-3-2000/10 УХЛ2, контур противотока и блок ОПН (рис. 2). Основные параметры БВВ 4,1 кВ/4 кА:

номинальный ток	4 000 А
номинальное напряжение главной цепи	3 300 В
ток отключения (не более)	10 000 А
напряжение, возникающее в процессе отключения аварийного тока на контактах выключателей в цепи с индуктивностью 5–15 мГн	9 кВ
пределы токов уставки	1000–6000 А
Полное время разведения контактов (не более)	0,005 с
полное время отключения при индуктивности цепи:	
5 мГн	0,016 с
10 мГн	0,021 с
15 мГн	0,030 с
время включения (не более)	0,020 с
число камер в коммутационном блоке	2

Контур противотока с последовательно соединенными конденсатором C_k , индуктивностью L_k и быстродействующим ключом S подсоединен параллельно ВДК. Блок ОПН, подключенный параллельно ВДК, служит для ограничения перенапряжений и рассеивания энергии, накопленной в индуктивности сети L_c . В качестве ключа S используется вакуумный управляемый разрядник РВУ-31, в качестве нелинейных сопротивлений – ограничители перенапряжений нелинейные типа ОПН-ТП-3,0/4-УХЛЗ [7]. Блок ОПН содержит четыре параллельно соединенных нелинейных сопротивления. Упрощенная схема одного ОПН показана на рис. 3 (фланцы – алюминиевые; рабочие сопротивления – металлооксидный нелинейный резистор ZnO, имеющий высоконелинейную вольт-амперную характеристику).

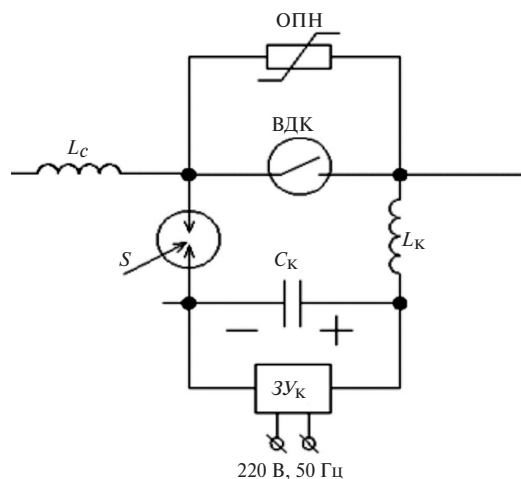


Рис. 1. Принципиальная схема БВВ



Рис. 2. Быстродействующий вакуумный выключатель: 1 – ВДК; 2 – блок ОПН

В рабочем режиме на ОПН воздействует напряжение сети. Благодаря высокому электрическому сопротивлению нелинейных резисторов ток через ОПН при этом определяется только собственной емкостью ограничителя и составляет доли миллиампера. При возникновении перенапряжений нелинейные резисторы переходят в проводящее состояние, протекающий через ограничитель ток возрастает, достигая сотен и тысяч ампер и ограничивая при этом дальнейшее нарастание напряжения на выводах блока ОПН. После снижения перенапряжения ограничитель возвращается в первоначальное состояние.

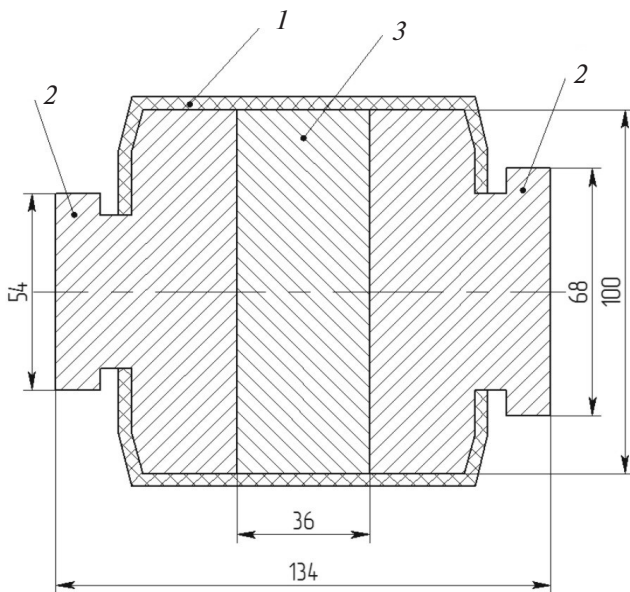


Рис. 3. Общий вид одного ОПН: 1 – корпус; 2 – фланец; 3 – рабочее сопротивление ZnO

Первоначально ОПН в блоке располагались парно вертикально и присоединялись параллельно ВДК с помощью тонких медных шин. В результате испытаний пропускной способности блока ОПН в исходном исполнении [6] было показано, что выключатель способен выдержать однократное автоматическое повторное включение (АПВ) при токе 6 кА и индуктивности сети $L_c = 15$ мГн. Однако при многократных АПВ возможен перегрев блока ОПН выше допустимой температуры и его деградация.

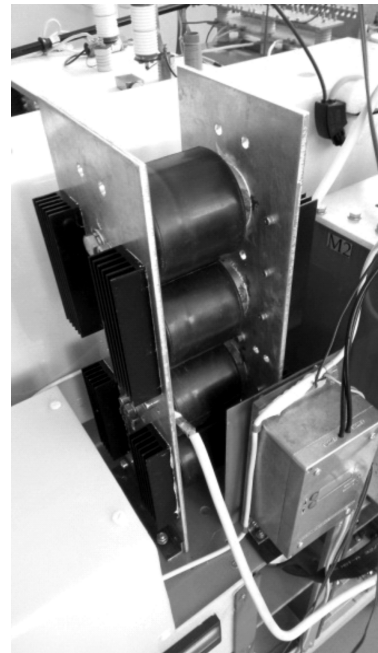


Рис. 4. Блок из четырех ОПН

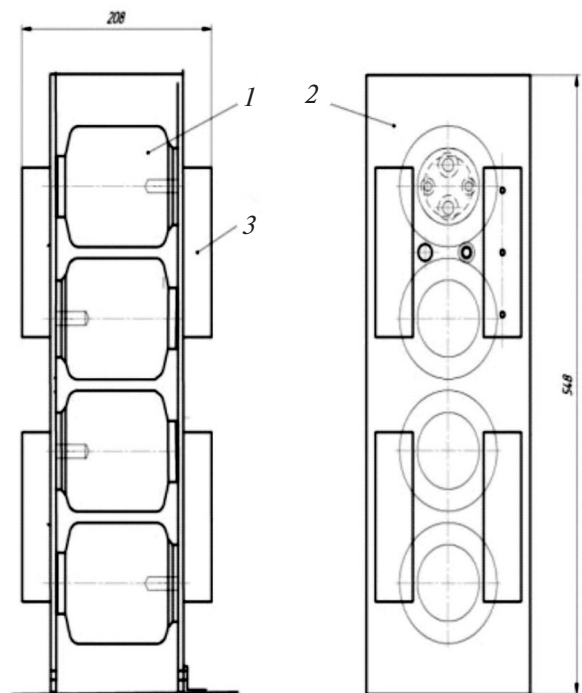


Рис. 5. Схема размещения ОПН между алюминиевыми пластинами с радиаторами: 1 – ОПН, 2 – пластина, 3 – радиатор

Для улучшений условий охлаждения все ОПН были установлены между двумя вертикальными листами из алюминия толщиной 10 мм с радиаторами (рис. 4). Схема размещения ОПН показана на рис. 5.

Математическая модель работы ОПН. В [6] предложена модель схемы испытаний ОПН в среде Matlab, в которой исследовано выделение энергии в рабочем сопротивлении ZnO при отключении тока в БВВ. Для анализа теплообмена между рабочим сопротивлением ОПН и алюминиевыми фланцами после быстрого выделения энергии в рабочем сопротивлении рассмотрена математическая модель, в которой для простоты корпус ОПН разделен пополам. Представим, что вследствие симметрии перенос энергии осуществляется из рабочего сопротивления ZnO 1 к одному из фланцев 2 (рис. 6). В симметричной конструкции нет теплового потока по оси x в середине ОПН, что равносильно теплоизоляции; в остальных направлениях нет потока при конвекции. Теплопередача происходит вдоль оси x через стык между телами 1 и 2 (начало координат $x = 0$). Значению x_1 соответствует продольный размер половины оксида цинка в ОПН, x_2 – продольный размер алюминиевого фланца. Несмотря на некоторое различие размеров фланцев, примем усредненные их размеры, что оказывает несущественное влияние на точность расчетов, но существенно упрощает задачу за счет одинаковых тепловых потоков.

В однократном цикле теплообмена нагрев рабочего сопротивления ZnO из установившегося «холодного» состояния, когда нет режима развитой конвекции, можно принять адиабатическим (нагрев длится 10–20 мс) и для моделирования использовать схему с наружной теплоизоляцией (рис. 6). При равномерном нагреве ZnO будет одинаковая температура в поперечных сечениях рабочего сопротивления и алюминиевых фланцев. В результате тепловой поток примем одномерным. В основу положим закон Фурье передачи тепла между твердыми телами:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

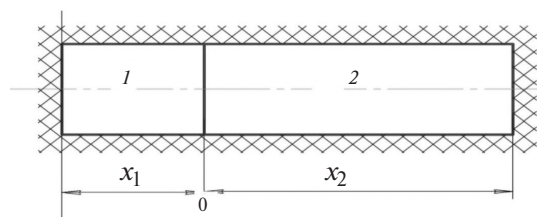


Рис. 6. Схема половины ОПН с началом координат в стыке ZnO (1) и Al(2): x_1 – осевой размер половины рабочего сопротивления ZnO; x_2 – осевой размер алюминиевого фланца

где a – коэффициент температуропроводности.

Начальные условия: $T_1(x,0) = \Delta T$; $T_2(x,0) = 0$, где ΔT – приращение температуры оксида цинка при адиабатическом нагреве. Для упрощения расчетов за нулевое значение температуры принимается температура окружающей среды в момент проведения эксперимента.

В стыке $x=0$ потоки тепла равны $\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}$, где $\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности, и температуры равны $T_1 = T_2$. В точках $x = -x_1$ и $x = x_2$ – теплоизоляция, поэтому $\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0$.

В [8] приведены решения при других начальных и граничных условиях. Решение (1) может быть получено либо методом разделения переменных Фурье, либо интегральным преобразованием Лапласа. Второй метод для этой задачи более информативен, так как ход решения можно оценить для $\tau \rightarrow 0$ и $\tau \rightarrow \infty$ по изображению. По теореме разложения обобщенных полиномов в области изображений получим решение для относительной температуры θ :

$$\theta_1 = \frac{T_1}{\Delta T} = K_y - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n q \cos \mu_n \left(1 + \frac{x}{x_1}\right) \exp\left(\frac{-\mu_n^2}{q_1^2} \tau\right)}{\mu_n [(q + K_\varepsilon) \cos \mu_n q - (1 + K_\varepsilon) \sin \mu_n \sin \mu_n q]}; \quad (2)$$

$$\theta_2 = \frac{T_2}{\Delta T} = K_y + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 K_\varepsilon \sin \mu_n \cos \mu_n q \left(1 - \frac{x}{x_2}\right) \exp\left(\frac{-\mu_n^2}{q_1^2} \tau\right)}{\mu_n [(q + K_\varepsilon) \cos \mu_n \cos \mu_n q - (1 + K_\varepsilon) \sin \mu_n \sin \mu_n q]}; \quad (3)$$

где $K_y = \frac{K_\varepsilon}{K_\varepsilon + q}$; $K_\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$; $q = \frac{q_2}{q_1} = \frac{x_2}{x_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}$; при $\tau \rightarrow \infty$ $\theta_1 = \theta_2 = K_y$; μ_n – корни характеристического уравнения

$$\operatorname{tg} \mu q + K_\varepsilon \operatorname{tg} \mu = 0. \quad (4)$$

На рис. 7 построены зависимости относительной температуры θ от времени. Спадающие кривые отображают изменение температуры в рабочем сопротивлении ZnO в точке $x = -x_1$. Растущие кривые рассчитаны для алюминия с разными значениями массы в точке $x = x_2$: M_1 – масса фланцев ОПН без

присоединения дополнительных радиаторов; M_3 – масса дополнительных радиаторов; $M_{2,4}$ – промежуточные расчетные массы (штриховые кривые). Кривая M_2 рассчитана при $q \approx 1$, когда выражения (2)–(4) получают особенно простым.

Отметим, что усреднение радиусов фланцев значительно упростило расчетную часть задачи, поскольку фланцы и рабочее сопротивление в этом случае имеют одинаковую площадь сечения $S_{се}$. Поэтому в математической модели масса алюминиевой части определяется значением X_2 , для кривых на рис. 7 значения массы находились по формуле:

$$M_{Al} = \rho_{al} S_{се} X_2, \quad (5)$$

где ρ_{al} – плотность алюминия; $S_{се}$ – площадь поперечного сечения.

При присоединении дополнительных алюминиевых радиаторов выравнивание температур рабочего сопротивления ZnO и алюминия проходит более длительно и с меньшей установившейся температурой, что улучшает условия охлаждения. Также стоит отметить, что дальнейшее наращивание массы алюминия (кривая M_2) оказывает незначительное влияние на условия охлаждения. Поэтому выбрана масса алюминия 15 кг для блока из четырех ОПН.

Испытания. Для проверки предложенной модели воспользуемся результатами исследований пропускной способности ОПН без присоединения дополнительных радиаторов [6]. Испытания проводились на колебательном контуре АО «НИИТФА» с варьированием зарядного напряжения U_0 до 3,5 кВ, емкости C_0 конденсатора до максимума $C_{max} = 0,098 \text{ Ф}$ и индуктивности воздушного реактора L_0 до $L_{max} = 14,7 \text{ мГн}$ (рис. 8). Испытаниям подвергался БВВ с контуром противотока $L_1 C_1$. Блок из четырех параллельных ОПН R_1 подсоединен параллельно ВДК (B).

В каждом опыте с помощью термопары измерялась температура фланцев перед и после коммутации. В серии из нескольких отключений подряд конденсаторная батарея C_0 перед каждым опытом подзарядкалась до заданного напряжения U_0 с интервалом 2 мин. В качестве разрядников $PBV_1 - PBV_2$ использовались управляемые вакуумные разрядники РВУ-31Н [9]. По требованиям техники безопасности измерения температуры проводились через 90 с после отключения тока выключателем.

На рис. 9 представлена осциллограмма одиночного импульса при напряжении $U_0 = 3,5 \text{ кВ}$. Выключатель отключал ток

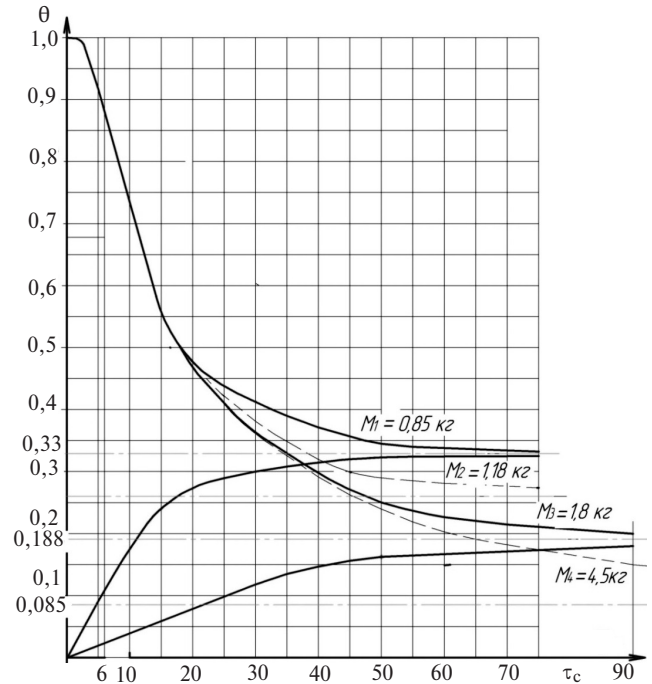


Рис. 7. Изменение относительной температуры на стыке ZnO и Al в зависимости от времени

$I_{br} = 7 \text{ кА}$, при этом на ОПН возникал импульс напряжения $U_{опн} = 7,85 \text{ кВ}$ длительностью $\Delta\tau = 14,6 \text{ мс}$. Общая масса M_1 рабочего сопротивления ZnO четырех ОПН была равна 6,4 кг.

В этом опыте максимальная энергия, выделявшаяся в ОПН,

$$E = I_{br} U_{опн} \Delta\tau / 2 = 0,4 \text{ МДж}. \quad (6)$$

Температура нагрева рабочего сопротивления

$$\Delta T = E / (M_1 C_1) = 125^\circ \text{ С}, \quad (7)$$

где $C_1 = 500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

По кривым для M_1 на рис. 7 определим установившуюся температуру фланцев ОПН (установившийся режим наблюдается примерно через 75 с), $\theta_{уст} = 0,33$:

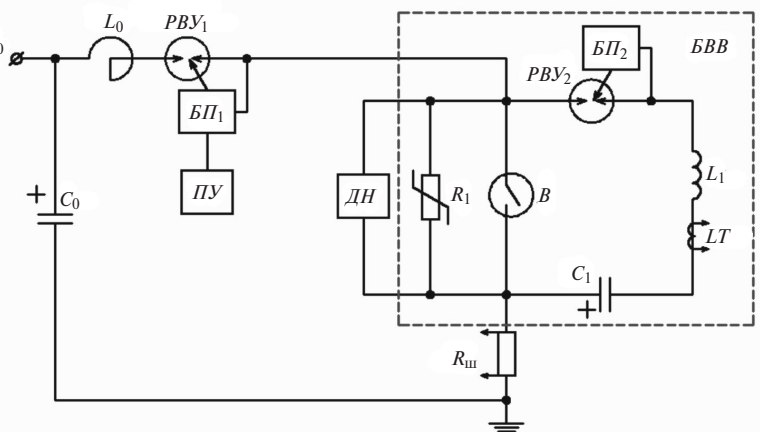


Рис. 8. Схема испытаний на стенде АО «НИИТФА» [6]

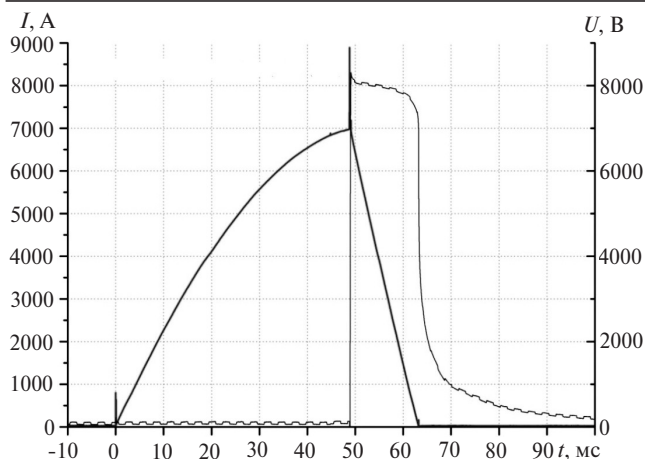


Рис. 9. Осциллограммы тока и напряжения на выключателе, полученные при $U_0=3,5$ кВ, индуктивности реактора $L_0=14,7$ мГн и токе уставки $I_0=6,8$ кА

$$T_{\text{уст1}} = \Delta T \theta_{\text{уст}} + T_0 = 41,3 + T_0 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (6)$$

где T_0 — температура ОПН до импульса тока.

При двух одиночных импульсах с теми же параметрами, как на рис. 7, с интервалом около 90 с максимальная температура фланцев ОПН

$$T_{\text{уст2}} = 2\Delta T \theta_{\text{уст}} + T_0 = 82,6 + T_0 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (6)$$

Полученные расчетные значения температур соответствуют значениям температуры в экспериментальном [6], что свидетельствует о достоверности предложенной математической модели и возможности её использования в дальнейших расчетах.

Испытания на испытательном стенде АО «ВНИИЖТ». В реальной сети коммутация выключателя может быть многократной в виде серии последовательных отключений. Поэтому при расчете термической устойчивости ОПН следует учитывать несколько воздействий. Для практического применения очень важно знать скорость рассеивания тепла между сериями.

В испытательной лаборатории на территории экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» в Щербинке под руководством А.Н. Бардина были проведены испытания пропускной способности блока ОПН в составе БВВ-3,3-4000/30 УХЛЗ при постоянном напряжении $U_K=4$ кВ и многократном воздействии. Пропускная способность блока ОПН была усилена радиаторами (рис. 4). Испытания проводились при суммарной индуктивности реактора $L_0=17,5$ мГн и добавочном сопротивлении $R_1=0$. Схема испытаний показана на рис. 10. Отключаемый ток выключателя определялся по току уставки 3,7 кА и был равен 4 кА.

Было выполнено 18 коммутаций: шесть циклов по три коммутации с интервалом 2 мин и с перерывом между циклами 30 мин. После каждой коммутации измерялась температура на радиаторе и фланцах каждого ОПН, измерения температуры

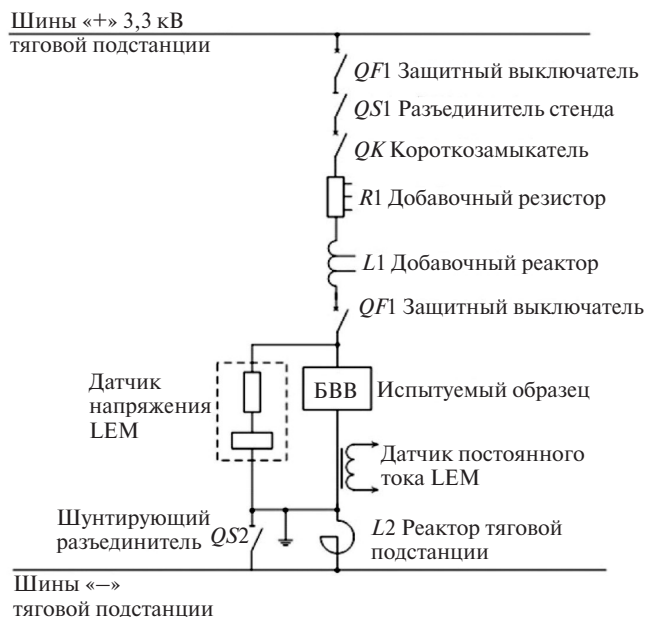


Рис. 10. Схема испытательного стенда АО «ВНИИЖТ»

проводились пирометром. Охлаждение радиатора и фланцев ОПН измерялось с интервалом 10 мин в течение паузы 30 мин.

Осциллограммы одного из коммутационных опытов приведены на рис. 11.

При отключении тока $I_{br}=4$ кА на ОПН формировался импульс напряжения $U_{опн}=7,6$ кВ длительностью $\Delta\tau=17,2$ мс, в ОПН выделялась энергия 0,26 МДж. Масса рабочего сопротивления из оксида цинка осталась неизменной, а суммарная масса алюминиевых фланцев и радиаторов была увеличена на 5 кг. Общая масса алюминия в ОПН составила $M_2=11,8$ кг. По кривым рис. 7 определим установившееся значение относительной температуры: $\theta_{\text{уст}}=0,224$. Полученное значение заметно меньше, чем при использовании сборки ОПН без дополнительного охлаждения ($\theta_{\text{уст}}=0,33$ при $M_1=6,4$ кг, рис.7). Выравнивание значений температуры происходит за чуть больше 90 с.

Температура нагрева оксида цинка в блоке ОПН за первый импульс составила

$$\Delta T = E / (M_1 C_1) = 81,3^\circ \text{ C}. \quad (8)$$

Усредненные кривые температур для фланцев и радиаторов приведены на рис. 11 и 12. Испытания показали, что после третьего цикла фланцы ОПН нагревались до $T=(100-120)^\circ \text{C}$ и при дальнейших коммутациях их температура не увеличивалась — установившийся режим.

Результаты позволяют оценить коэффициент теплоотдачи с поверхности блока ОПН в квазистановившемся процессе с использованием закона Ньютона для конвективного теплообмена:

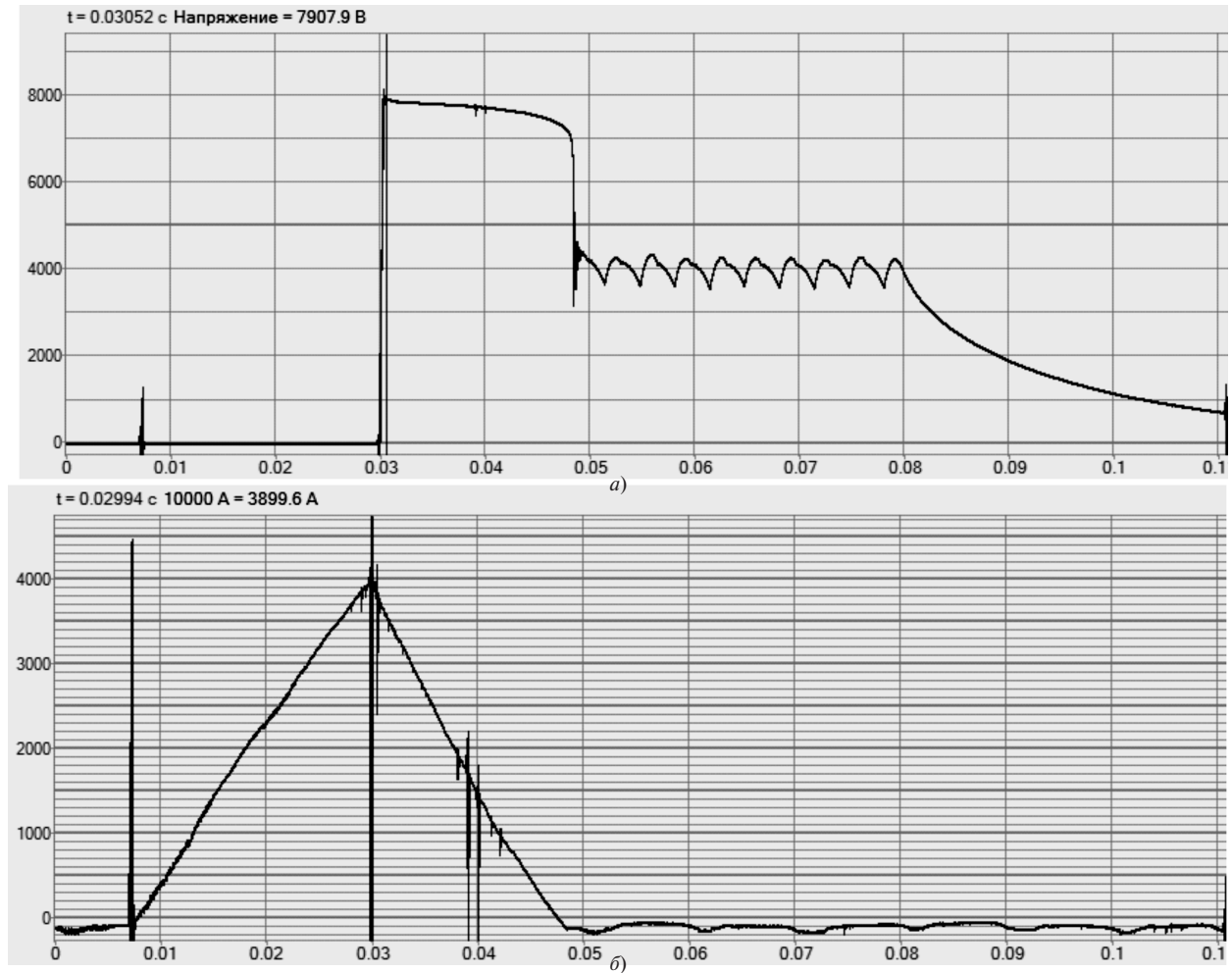


Рис. 11. Осциллограммы испытаний на стенде АО «ВНИИЖТ» г. Щербинка: а – напряжение на выключателе; б – ток в нем

$$\alpha = \frac{N}{\Delta T_p S_p + \Delta T_k S_k + \Delta T_{II} S_{II}}, \quad (9)$$

где N – среднее значение мощности тепловыделения за цикл; ΔT – средние значения температуры нагрева; S – площади охлаждения, индексы р, к, II – радиатор, корпус, алюминиевые пластины; $S_p = 0,346 \text{ м}^2$; $S_k = 0,16 \text{ м}^2$; $S_{II} = 0,4 \text{ м}^2$. За температу-

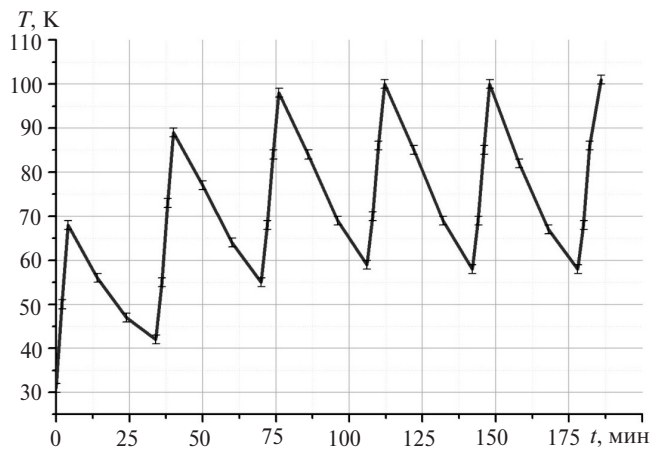


Рис. 12. Изменение усредненной температуры фланцев ОПН за весь интервал испытаний

ру пластин принимается усредненная температура фланцев. Значение

$$N = \frac{E}{\tau_{\text{цикла}}} = 406 \text{ Вт}, \quad (10)$$

соответственно значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = 6,4 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. По [10] для вертикальных пластин и горизонтальных труб коэффициент теплоот-

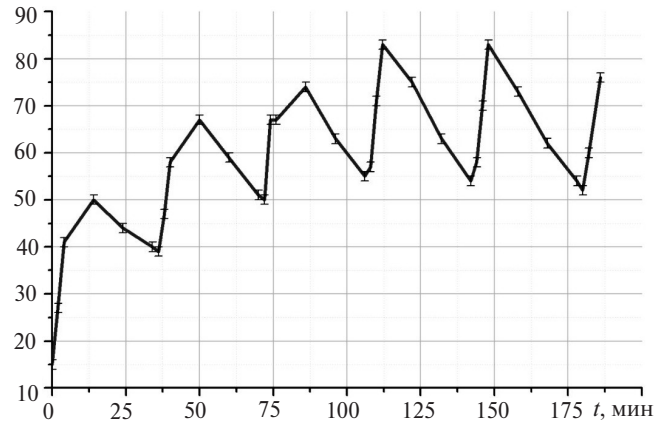


Рис. 13. Изменение усредненной температуры радиаторов ОПН за весь интервал испытаний

дачи при естественной конвекции колеблется в диапазоне $a = 5,8 \div 35 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Полученное невысокое значение объясняется условиями стесненной конвекции (ОПН встроен в выключатель). В несколько раз можно улучшить конвекцию, применяя для этого обдув вентилятором.

Выводы. 1. Предложенная математическая модель может использоваться для анализа пропускной способности блока ОПН в вакуумном выключателе постоянного тока при многократных коммутациях индуктивной нагрузки.

2. В результате испытаний выключателя БВВ 4,1кВ/4кА на стенде АО «ВНИИЖТ» продемонстрирована способность блока ОПН рассеивать энергию до 0,8 Мдж в одном цикле испытаний.

3. Полученные результаты позволили оценить коэффициент теплоотдачи с поверхности блока ОПН; его невысокое значение объясняется условием стесненной конвекции. Также с помощью модели была оценена оптимальная добавочная масса алюминия для улучшения тепловых свойств ОПН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Выключатели** автоматические быстродействующие постоянного тока серий ВАБ, ВАТ [Электрон. ресурс] www.uetm.ru/files/katalog_VAB_VA_2.pdf (дата обращения 20.12.2012).
2. **Боголепов А.В.** Применение вакуумного выключателя для защиты электроподвижного состава от токов короткого замыкания на тяговой сети постоянного тока. – Изв. Петербургского государственного университета путей сообщения ПГУПС, 2008, № 1, с. 149–163.
3. **Алферов Д.Ф., Будовский А.И., Евсин Д.В., Иванов В.П., Неугодников И.П., Сидоров В.А.** Быстродействующие вакуумные выключатели постоянного и переменного тока для сверхпроводникового ограничителя тока. – Электро, 2015, № 3, с. 43–47.
4. **Алферов Д.Ф., Ермилов И.В., Иванов В.П.** Высоковольтный силовоточный выключатель постоянного тока. – Электричество, 2001, № 11, с. 14–19.
5. **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.
6. **Алферов Д.Ф., Евсин Д.В., Зенькович Г.А., Цхай Е.В.** Пропускная способность ограничителей перенапряжений в со-

ставе вакуумных выключателей постоянного тока. – Электричество, 2018, № 10, с. 30–36.

7. **Каталог «ЛМЭ» 028-02.** Ограничители перенапряжений для защиты электрооборудования. [Электрон. ресурс] <http://www.lme-opn.ru/catalog/LME028-02.pdf> (дата обращения 20.12.2012).

8. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1969, 600 с.

9. **Патент РФ № 121964.** Управляемый вакуумный разрядник. Д.Ф. Алферов, М.Р. Ахметгареев, В.П. Иванов., В.А. Сидоров. – БИ, 2012, № 31.

10. **Залесский А.М., Кукеков Г.А.** Тепловые расчеты электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1967.

[15.01.2020]

А в т о р ы: **Алфёров Дмитрий Фёдорович** – доктор техн. наук, главный научный сотрудник проектного офиса сверхпроводникового и коммутационного оборудования акционерного общества «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации», докторскую диссертацию защитил в 2010 г.

Бардин Александр Николаевич – начальник отдела Всероссийского НИИ железнодорожного транспорта.

Будовский Александр Исаакович – старший научный сотрудник проектного офиса сверхпроводникового и коммутационного оборудования акционерного общества «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации».

Володин Виктор Михайлович – инженер проектного офиса сверхпроводникового и коммутационного оборудования акционерного общества «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации».

Калинов Алексей Валерьевич – кандидат техн. наук, руководитель проекта проектного офиса сверхпроводникового и коммутационного оборудования акционерного общества «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации», диссертацию защитил в 1993 г.

Цхай Евгения Викторовна – научный сотрудник проектного офиса сверхпроводникового и коммутационного оборудования (ПО СКО) акционерного общества «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации».

Increased throughput of surge arrestors in DC vacuum circuit breakers

ALFEROV Dmitry F. (JSC «NIITFA» — National Technical Physics and Automation Research Institute, Moscow, Russia) — Chief Scientist, Dr. Sci. (Eng.)

BARDIN Alexander N. (JSC «VNIIZHT — Railway Research Institute, Moscow, Russia), Head of Department

BUDOVSKIY Alexander I. (JSC «NIITFA» — National Technical Physics and Automation Research Institute, Moscow, Russia) Senior Scientist

VOLODIN Victor M. (JSC «NIITFA» — National Technical Physics and Automation Research Institute, Moscow, Russia) — Engineer

KALINOV Alexey V. (JSC «NIITFA» — National Technical Physics and Automation Research Institute, Moscow, Russia) Project Manager, Cand. Sci. (Eng.)

TSKHAI Evgeniya V. (JSC «NIITFA» — National Technical Physics and Automation Research Institute, Moscow, Russia), Scd. Scientist

One of the problems that must be solved when short-circuit currents breakdown in a DC vacuum circuit breaker is the dissipation of electromagnetic energy stored in the inductance of the L_c network and brought by the source at the time of the current breakdown, as well as limiting the overvoltages on the circuit breaker elements. The high level of overvoltages $U \gg L_c di/dt$ is due to the rapid fall of the di/dt trip current in the network with inductance L_c , which, for example, in traction networks of electrified rail transport reaches 15 mH. To solve this problem, a nonlinear overvoltage arrestors (NOA) is used, which is installed parallel to the circuit breaker and provides for the overvoltage limiting and also serves to absorb electromagnetic energy stored in the inductance of the network. The amount of absorbed energy should not exceed the amount of energy dissipated into the outer space. Otherwise, there will be a constant increase in the temperature of the arrester and its subsequent thermal destruction. The energy absorbed in the arrester unit when the current is breakdown ($I_{br} 2L_c/2$) depends on the breakdown current I_{br} and the inductance of the network L_c . The energy dissipated depends on the design of the arrester unit and the mass of the supply tires. The balance between absorbed and dissipated energy determines the throughput of the arrester unit without degrading it. The throughput of surge arresters with high current pulses is determined by its ability to withstand the max supply tires. The balance between absorbed and dissipated energy determines the throughput of the arrester unit without degrading it. The throughput of surge arresters with high current pulses is determined by its ability to withstand the maximum value of current pulses with duration of several milliseconds. This paper presents the results of numerical simulation and experimental research of ways to increase the throughput of an oxide-zinc (ZnO) surge arrester as part of a DC vacuum circuit breaker.

Key words: electric networks, short-circuit fault, fault clearing, arc chute, overvoltage limitation

REFERENCES

1. **Vyklyuchateli avtomaticheskoye bystrodeystvuyushchiye postoyannogo toka seriy VAB, VAT** (Automatic high-speed direct current circuit breakers of the VAB, BAT series) [Electron. Resource] www.uetm.ru/files/katalog_VAB_VA_2.pdf (Data of apple 20.12.2020).
2. **Bogolepov A.V.** *Izv. Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya — in Russ. (Izv. Petersburg State University of Railway Engineering)*, 2008, No. 1, pp. 149–163.
3. **Alferov D.F., Budovskiy 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.F., Yermilov I.V., Ivanov V.P.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 11, pp. 14–19.
5. **Sayenko I.V., Kuznetsov V.V., Pinskaya D.B., Genel't A.Ye.** *Energiya yedinoi seti — in Russ. (Energy of a unified network)*, 2016, No. 1, pp. 65–61.
6. **Alferov D.F., Yeysin D.V., Zen'kovich G.A., Tskhay Ye.V.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 10, pp. 30–36.
7. **Katalog «LME» 028-02. Ogranichiteli perenapryazheniy dlya zashchity elektrooborudovaniya. Rezhim dostupa** (Catalog «LME» 028-02. Surge arresters to protect electrical equipment. Access mode [Electron. Resource] <http://www.lme-opn.ru/catalog/LME028-02.pdf> (Data of apple 20.12.2020).
8. **Lykov A.V.** *Teoriya teploprovodnosti.* (Theory of thermal conductivity). Moscow, Vysshaya shkola, 1969, 600 p.
9. **Patent RF № 121964. Upravlyayemyy vakuurnyy razryadnik.** (RF patent No. 121964. Guided vacuum spark gap)/ D.F. Alferov, M.R. Akhmetgareh, V.P. Ivanov, V.A. Sidorov. Bulletin of inventions, 2012, No. 31.
10. **Zalesskiy A.M., Kukekov G.A.** *Teplovyye raschety elektricheskikh apparatov* (Thermal calculations of electrical apparatus). Leningrad, Energiya, 1967.

[15.01.2020]