

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.314.26:621.316.91:621.311.1

EDN: XCUWWH

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-489-503



Исследование влияния параметров элегазовых выключателей на величину коммутационных перенапряжений на основе анализа номинальных режимов преобразовательных трансформаторов

А.В. Тихонов^{1✉}¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия¹ООО ГК «Рутас», Красноярск, Россия

Резюме. Цель – выявление характера и степени влияния рабочих токов элегазовых выключателей на величину перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов. Проведен анализ опыта эксплуатации электрооборудования, включая изучение проблем, связанных с естественным старением изоляции, перегрузками и воздействием коммутационных перенапряжений. В работе использованы методы диагностики состояния оборудования. Согласно статистическим данным, в настоящее время около 37% коротких замыканий между фазами и 42% однофазных замыканий на землю в электрических сетях промышленных предприятий происходят из-за коммутационных перенапряжений. Отмечено в ходе испытаний, что возникающие перенапряжения при коммутации элегазовыми выключателями преобразовательных трансформаторов, используемых на алюминиевых заводах, могут достигать трехкратных значений номинального напряжения сети, что представляет опасность для изоляции обмоток трансформатора, кабельной линии и самого выключателя. Установлено, что увеличение рабочих токов элегазового выключателя марки LF2 до 27,8% от номинального тока выключателя приводит к росту перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов. При дальнейшем увеличении рабочих токов элегазового выключателя более 27,8% от номинального тока выключателя наблюдается резкое снижение величины коммутационных перенапряжений. Таким образом, установлено влияние воздействия рабочих токов элегазовых выключателей на уровень перенапряжений при переключении преобразовательных трансформаторов, а также обнаружены основные причины этого явления, которые следует учитывать для повышения надежности электроснабжения преобразовательных трансформаторов и алюминиевого производства в целом. Подтверждена целесообразность применения активно-емкостных гасителей как наиболее эффективного средства для ограничения перенапряжений при переключении преобразовательных трансформаторов.

Ключевые слова: элегазовый выключатель, срез тока, коммутационные перенапряжения, преобразовательные трансформаторы, RC-гасители

Для цитирования: Тихонов А.В. Исследование влияния параметров элегазовых выключателей на величину коммутационных перенапряжений на основе исследования номинальных режимов преобразовательных трансформаторов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 489–503. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-489-503>. EDN: XCUWWH.

POWER ENGINEERING

Original article

Effect of SF6 circuit breaker parameters on switching overvoltages evaluated based on nominal modes of converter transformers

Aleksey V. Tikhonov^{1✉}¹National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia¹LLC Research and Development Enterprise Rutas, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. In this work, we set out to investigate the influence of operating currents of SF6 circuit breakers on the magnitude of overvoltages during switching of converter transformers. The experience of electrical equipment operation is analyzed with a focus on the problems associated with the natural aging of insulation, overloads, and switching overvoltages. The methods of equipment diagnostics were used. According to statistical data, at present, about 37% of

short circuits between phases and 42% of single-phase earth faults in electrical networks of industrial enterprises occur due to switching overvoltages. The conducted tests showed that the overvoltages emerging during switching by SF6 circuit breakers of converter transformers, which are used in aluminum smelters, may reach a three-fold rated voltage of the network. This threatens the insulation of transformer windings, cable line, and the switch itself. It was established that an increase in operating currents of an LF2 circuit breaker, not exceeding 27.8% of the rated current of the switch, leads to an increase in overvoltages during switching of converter transformers. At a further increase in the operating currents of the circuit breaker by more than 27.8% of the rated current of the circuit breaker, a sharp decrease in the value of switching overvoltages is observed. Therefore, the operating currents of SF6 circuit breakers were established to affect the level of switching overvoltages of converter transformers. The underlying mechanism of this phenomenon was determined, which should be taken into account when improving the reliability of power supply of converter transformers and, consequently, the reliability of aluminum production. The feasibility of resistive-capacitive dampers as the most effective means for limiting overvoltages during switching of converter transformers was confirmed.

Keywords: SF6 circuit breaker, current cut-off, switching overvoltages, converter transformers, RC-dampers

For citation: Tikhonov A.V. Effect of SF6 circuit breaker parameters on switching overvoltages evaluated based on nominal modes of converter transformers. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):489-503. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-489-503>. EDN: XCUWWH.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые заводы являются мощными потребителями электроэнергии. Например, потребление на алюминиевых заводах Красноярска, Братска и Саяногорска составляет от 40 до 70% от выработки электроэнергии Красноярской, Братской и Саяно-Шушенской ГЭС соответственно. Электроснабжение заводов осуществляется по линиям электропередачи (ЛЭП) переменного тока с напряжением 220 кВ. Удельные затраты электрической энергии на производство 1 т алюминия на российских заводах варьируются от 14,5 до 18 МВт·ч [1, 2].

При передаче большой мощности на переменном токе в проводах ЛЭП возникают потери электрической энергии. Для снижения потерь в ЛЭП 220 кВ алюминиевые заводы располагаются как можно ближе к ГЭС. Это вызывает значительное увеличение токов короткого замыкания в сетях 10 кВ преобразовательных трансформаторов по сравнению с токами КЗ в системах электроснабжения 6–10 кВ горнодобывающих компаний, машиностроительных заводов, трубопроводного транспорта, нефтегазовой отрасли и других секторов.

При выборе коммутационных аппаратов для сетей 10 кВ на алюминиевых заводах особое внимание уделяется отключающей способности и электродинамической стойкости выключателей. Для современных технологий электролиза алюминия, использующих выпрямленный ток 350–500 кА, применяются выключатели с номинальным током от 2000 А и более, с номинальным током отключения 31,5 кА и выше. В качестве основных выключателей с указанными характери-

стиками используются аппараты марки LF2 и LF3 от компании Schneider Electric.

Опыт эксплуатации данных элегазовых выключателей на Саяногорском алюминиевом заводе показал, что при коммутации нагрузочных преобразовательных трансформаторов происходили неисправности как элегазовых выключателей, так и концевых муфт кабелей, проложенных между выключателем и трансформатором, а также самих трансформаторов. Главной причиной повреждения элегазовых выключателей является электрический пробой изоляции днища элегазовой камеры, тогда как для концевых муфт основной причиной выхода из строя является пробой изоляции одной из фаз, что приводит к однофазному замыканию на землю.

Выходы из строя преобразовательных трансформаторов обусловлены пробоем изоляции обмотки высшего напряжения из-за перенапряжений. На основании вышеизложенного целью исследования является оценка степени влияния рабочих токов элегазовых выключателей на величину перенапряжений при переключении преобразовательных трансформаторов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение ключевых закономерностей, связанных с возникновением перенапряжений при включении силовых трансформаторов с напряжением 6–10 кВ;
- исследование и анализ доли коммутационных перенапряжений в общей аварийности систем электроснабжения 6–10 кВ;
- выполнение натурных исследований коммутационных режимов преобразова-

тельных трансформаторов на Саяногорском алюминиевом заводе;

- сравнительный анализ полученных результатов с основными закономерностями возникновения перенапряжений при переключении трансформаторов;

- изучение и обоснование эффективных методов защиты преобразовательных трансформаторов от коммутационных перенапряжений.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6–10 кВ

Существует множество публикаций, посвященных исследованию закономерностей перенапряжений при включении силовых трансформаторов и электродвигателей напряжением 6–10 кВ [3–9].

При применении вакуумных и элегазовых выключателей для включения силовых трансформаторов главной причиной возникновения коммутационных перенапряжений является эффект обрыва (среза) тока при отключении трансформатора, работающего на холостом ходу или при токах нагрузки, составляющих 10–15% от номинального тока трансформатора.

Использование масляных выключателей также может сопровождаться возникновением коммутационных перенапряжений при включении и отключении трансформаторов в режиме холостого хода или близких к нему рабочих режимов за счет «виртуального среза тока» [3]. Последний обусловлен тем, что во время горения дуги между контактами вы-

ключателя генерируются высокочастотные составляющие тока, которые замыкаются за счет межфазных емкостей кабельных линий и электрооборудования, в результате чего может наблюдаться наложение в противофазе высокочастотных составляющих на основную гармонику. Как следствие, кривая тока в точке наложения будет прерываться, и будет наблюдаться процесс, похожий на эффект среза тока.

Уровень перенапряжений оценивался с помощью коэффициента кратности перенапряжений, который составляет:

$$K_{\text{КП}} = \frac{u(t)}{u_{\text{H}}}, \quad (1)$$

где $u(t)$ – максимальное мгновенное напряжение в момент времени t , В; u_{H} – номинальное амплитудное напряжение сети, В.

В свою очередь:

$$u(t) = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

где i_0 – реальный или виртуальный ток в момент среза, А; L – индуктивность трансформатора, Гн; C – емкость обмоток фаза-корпус трансформатора, Ф.

Так как на практике все расчеты и высоковольтные испытания приводятся к номинальному линейному напряжению, то для расчета взяты линейные напряжения сети.

На рис. 1 представлены закономерности изменения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений в зависимости от мощности и типа выключателя [10]:

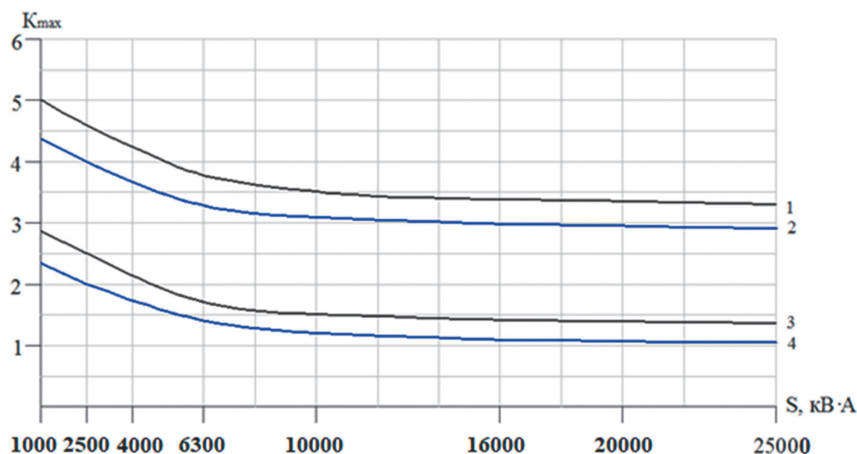


Рис. 1. Зависимость $K_{\text{КП}}$ от мощности трансформатора и типа выключателя: 1 – вакуумный; 2 – элегазовый; 3 – масляный; 4 – электромагнитный

Fig. 1. $K_{\text{КП}}$ vs transformer power and a breaker type: 1 – vacuum; 2 – gas-insulated; 3 – oil; 4 – electromagnetic

Зависимости показанных на рис. 1 графиков демонстрируют, что коэффициент кратности перенапряжений при включении силовых трансформаторов зависит от типа выключателя и мощности трансформатора, а при коммутации вакуумными выключателями имеет наибольшие величины.

При этом авторы [3, 4, 6] указывают на то, что с увеличением тока нагрузки трансформаторов коммутационные перенапряжения снижаются из-за уменьшения среза тока за счет более продолжительного горения дуги между контактами выключателя. Это обусловлено более интенсивной ионизацией межконтактного пространства выключателя и парами металла, что приводит к росту угла коммутации.

Данный процесс отображен на рис. 2.

Синусоиды 1, 2 и 3 соответствуют токам нагрузки, равным 25, 35 и 50% от номинального тока трансформатора. Угол отключения при нагрузке в 25% составляет 90–95°, следовательно, срез тока будет эквивалентен коэффициенту перенапряжений K1. При нагрузках в 35 и 50% угол отключения увеличивается до 170–180°, следовательно, срез тока будет эквивалентен коэффициентам перенапряжений K2 и K3. Как видно из рис. 2, величина коэффициента перенапряжений K1 превышает как K2, так и K3. Увеличение угла отключения в диапазоне 170–180° обусловлено процессом ионизации между контактами выключателя и металлическими парами, возникающими в результате более мощной электрической дуги.

Опыт эксплуатации преобразовательных трансформаторов показывает [11], что отключение этих трансформаторов при токах нагрузки в диапазоне 15–30% от номинального тока элегазового выключателя приводит к увеличению в пять раз аварийности кабельных муфт, элегазовых выключателей и самих преобразовательных трансформаторов в течение одного года эксплуатации.

Комплексный анализ аварийности систем электроснабжения на уровне 6–10 кВ показывает, что в настоящее время 37% коротких замыканий и 42% однофазных замыканий на землю вызваны коммутационными перенапряжениями [12–14].

Учитывая противоречивые данные о влиянии токов нагрузки на уровень перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов, проведены натурные исследования коммутационных перенапряжений при различных токах нагрузки на Саяногорском алюминиевом заводе в системе электроснабжения 10 кВ РП-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТИПА ТДЦФУД-25000/10-У1 ЭЛЕГАЗОВЫМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ Schneider Electric МАРКИ LF2

Объектом исследования выбрана схема электроснабжения РП-2 преобразователь-

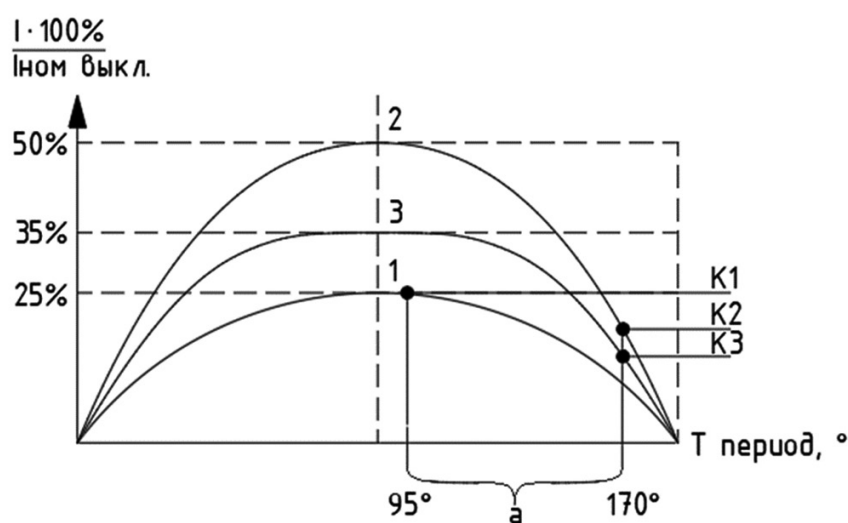


Рис. 2. Зависимость тока нагрузки выключателя от угла коммутации, приводящая к различной кратности коммутационных перенапряжений на секции шин

Fig. 2. Circuit breaker load current vs the switching angle at different ratios of switching overvoltages occurring on the busbar section

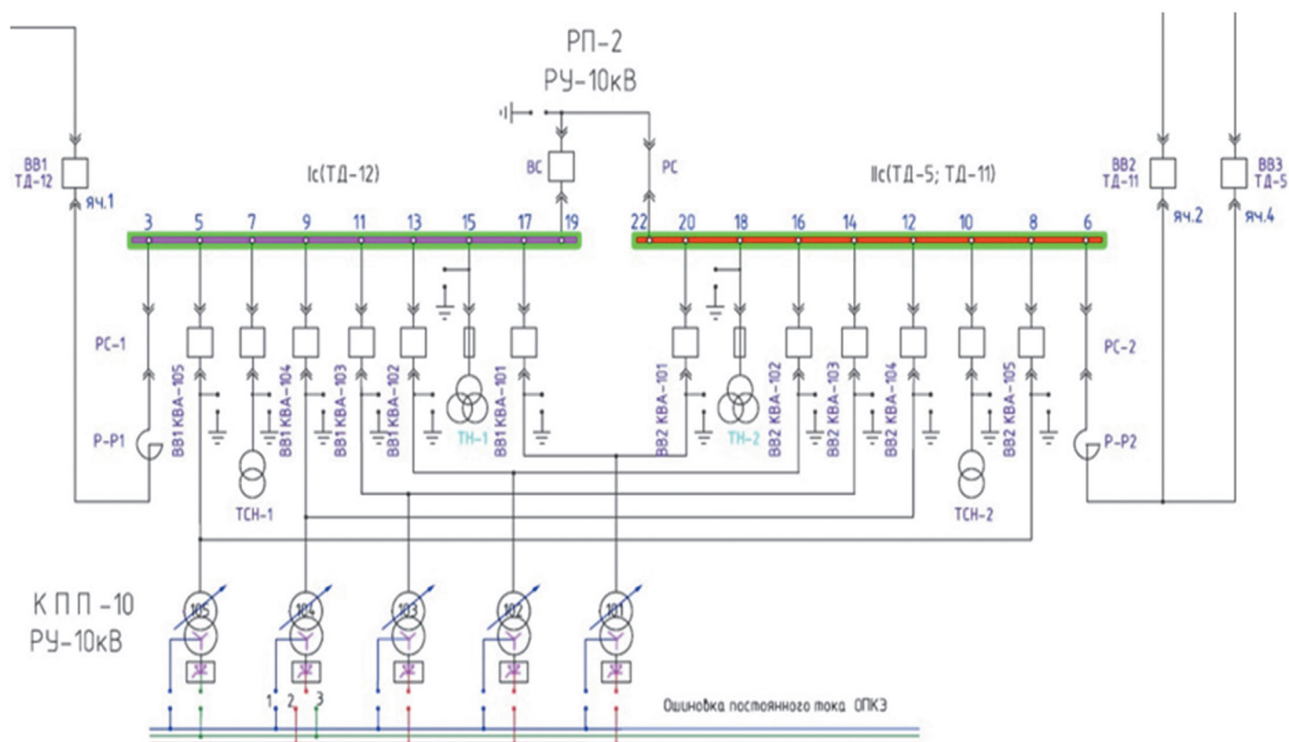


Рис. 3. Электрическая схема подключения преобразовательного трансформатора ТДЦФУД-25000/10-У1 через элегазовый выключатель Schneider Electric типа LF2

Fig. 3. Electrical connection diagram of the ТДЦФУД-25000/10-У1 converter transformer via Schneider Electric SF6-circuit breaker

ных трансформаторов Саяногорского алюминиевого завода, рис. 3.

Натурные исследования выполнялись на преобразовательном трансформаторе № 101 с использованием трехфазного активно-емкостного делителя ДНЕК-10 и четырехканального осциллографа Tektronix TDS 2024 В.

Схема подключения аппаратуры для измерения коммутационных перенапряжений приведена на рис. 4. Делитель напряжения подключался к вводу преобразовательного трансформатора.

В табл. 1 и 2 приведены основные технические характеристики преобразовательного трансформатора и элегазового выключателя.

Характерные осциллограммы коммутационных перенапряжений при включении преобразовательного трансформатора в режиме холостого хода (ХХ) приведены на рис. 5. На рис. 6–9 представлены осциллограммы включения и отключения преобразовательного трансформатора под нагрузкой.

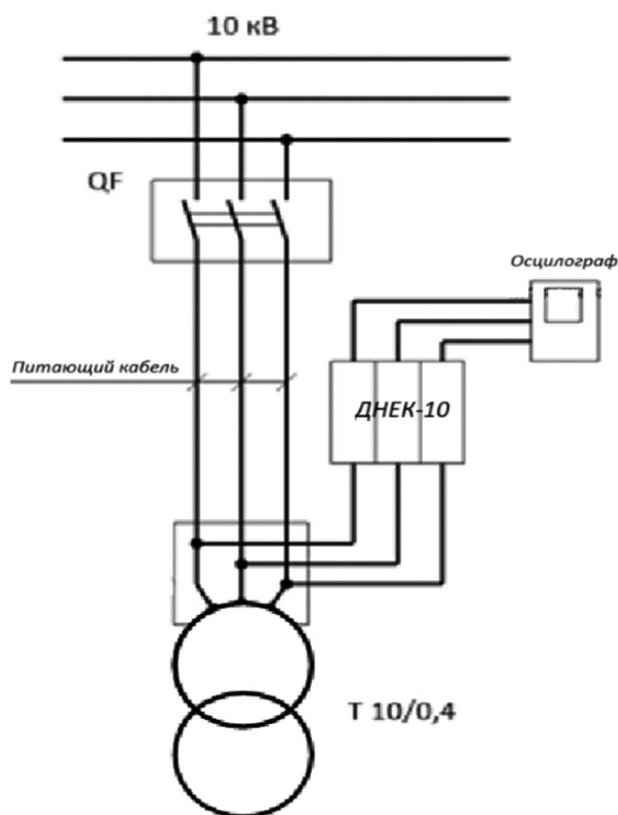


Рис. 4. Схема подключения аппаратуры для измерения коммутационных перенапряжений

Fig. 4. Connection diagram of switching overvoltage measuring equipment

Таблица 1. Основные технические характеристики преобразовательного трансформатора ТДЦПФУД-25000/10-У1 (25000 кВА – габаритная мощность трансформатора, 12860 кВА – номинальная мощность трансформатора)

Table 1. Main technical specifications of ТДЦПФУД-25000/10-У1 converter transformer (25000 kVA – transformer overall power, 12860 kVA – transformer rated power)

№	Параметр	Единица измерения	Значения
1	$U_{ном.}$	кВ	10,5
2	$S_{ном.}$	кВА	6430x2
3	$I_{ном.}$	А	740

Таблица 2. Основные технические характеристики элегазового выключателя LF2

Table 2. Main technical characteristic currents of the LF2 SF6 circuit breaker

№	Параметр	Единица измерения	Значения
1	$U_{наиб.ном.}$	кВ	10
2	$U_{наиб.раб.}$	кВ	12
3	$I_{ном.}$	А	2000
4	$I_{ном.откл.}$	кА	40
5	I_T	кА	40
6	I_A	кА	128

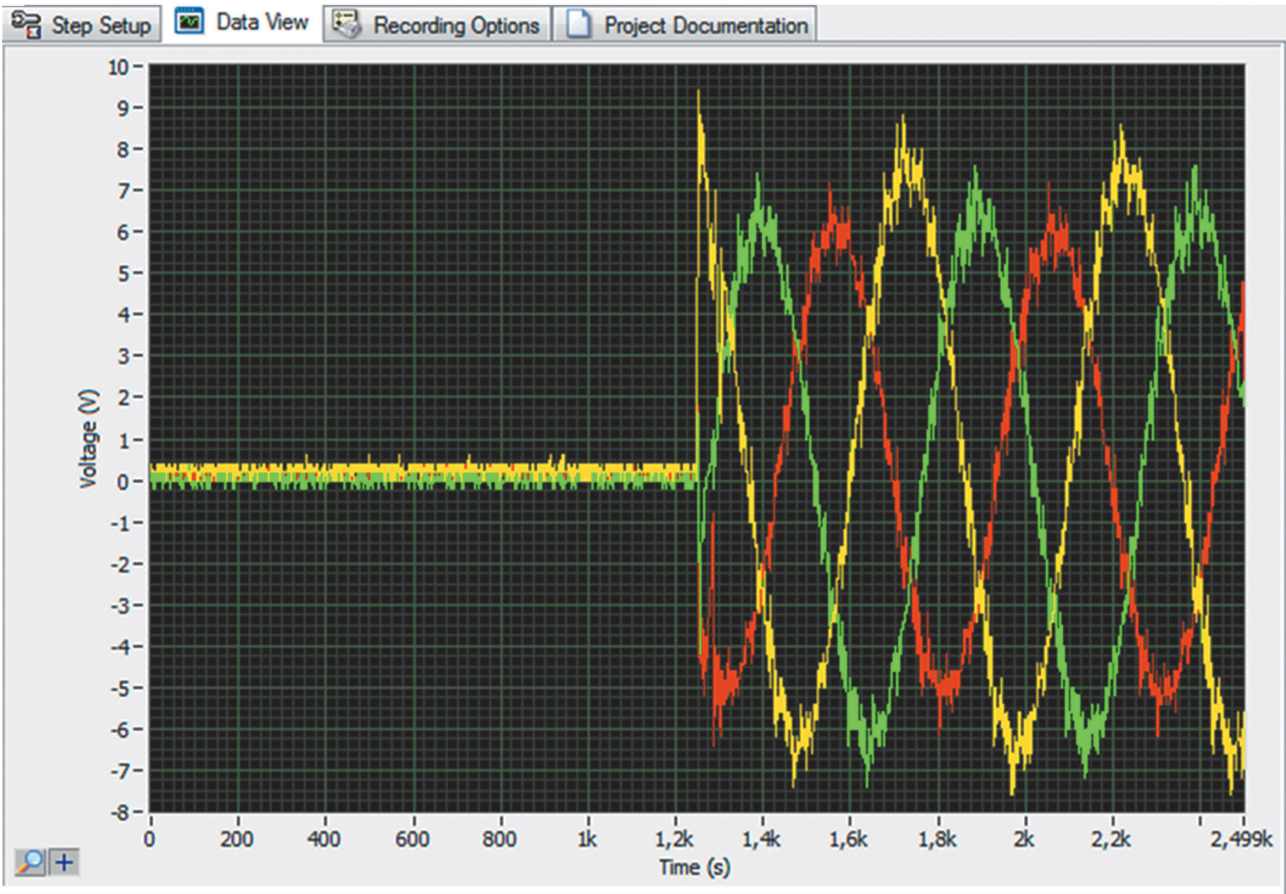


Рис. 5. Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора в режиме холостого хода $I_{нагр} = 0,05I_{н тр.}$, $u(t)_{max} = 9500$ В, $K_{КП} = \frac{u(t)_{max}}{u_H} = 0,95$

Fig. 5. A typical voltage waveform when switching on the converter transformer in an idle mode $I_{нагр} = 0,05I_{н тр.}$, $u(t)_{max} = 9500$ В, $K_{КП} = \frac{u(t)_{max}}{u_H} = 0,95$

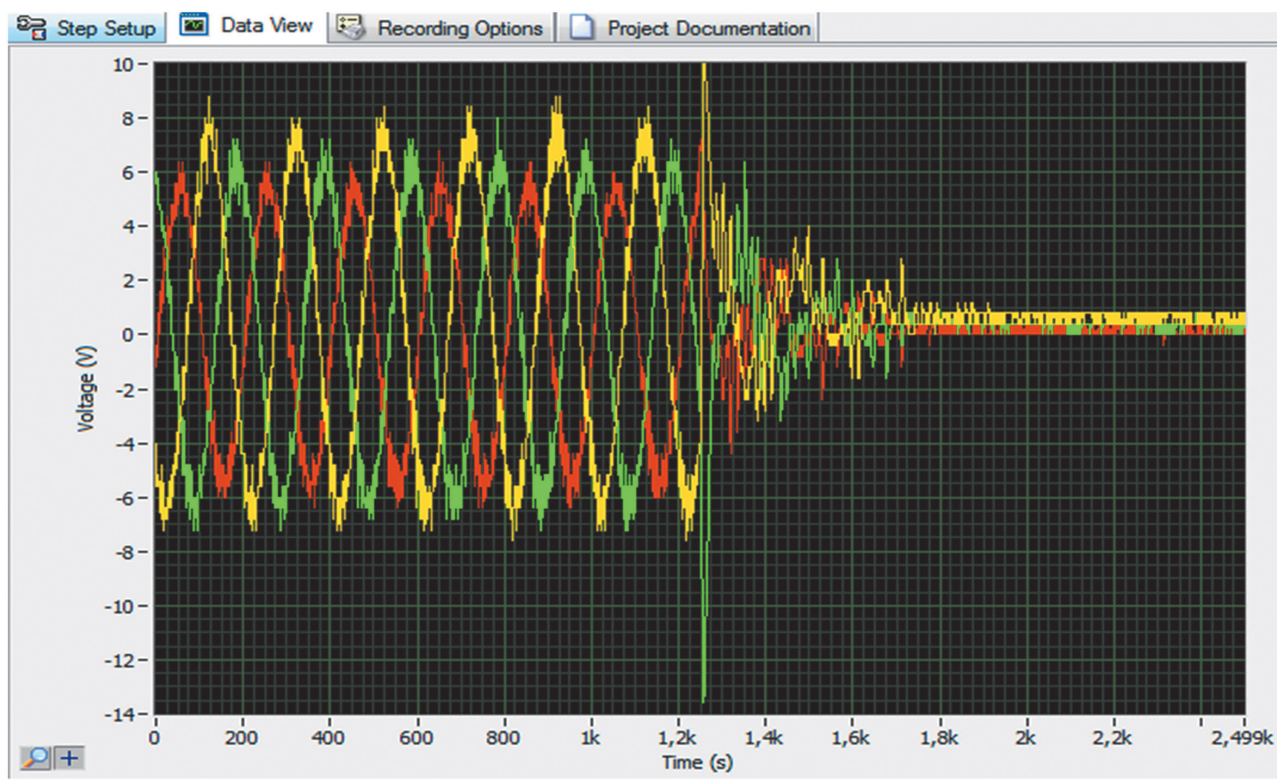


Рис. 6. Характерная осциллограмма напряжений при отключении преобразовательного трансформатора под нагрузкой
 $I_{\text{нагр}} = I, u(t)_{\text{max}} = 13500 \text{ В}, K_{\text{КП}} = 1,35$

Fig. 6. A typical voltage waveform when switching off the converter transformer under the load
 $I_{\text{нагр}} = I, u(t)_{\text{max}} = 13500 \text{ В}, K_{\text{КП}} = 1.35$

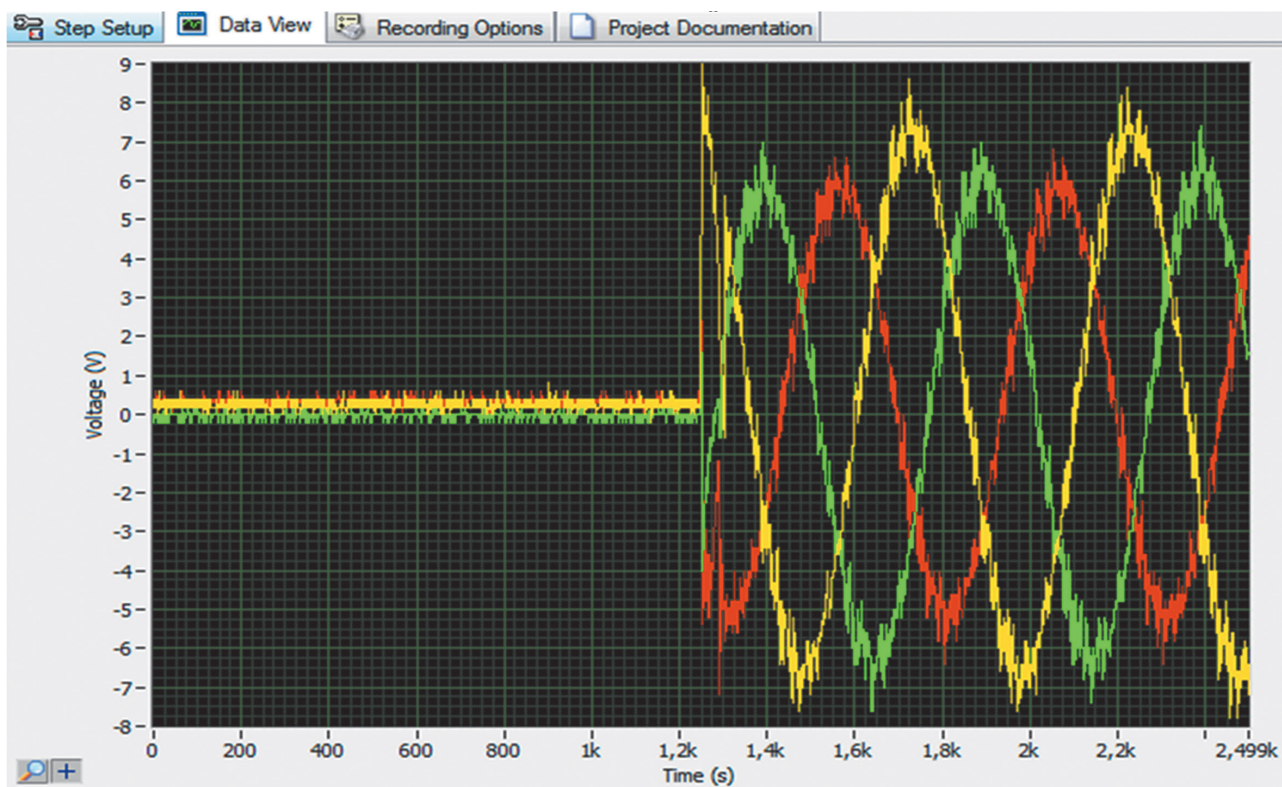


Рис. 7. Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора под нагрузкой
 $I_{\text{нагр}} = 0,25 I_{\text{н тр}}, u(t)_{\text{max}} = 9000 \text{ В}, K_{\text{КП}} = 0,9$

Fig. 7. A typical voltage waveform when switching on the converter transformer under the load
 $I_{\text{нагр}} = 0.25 I_{\text{н тр}}, u(t)_{\text{max}} = 9000 \text{ В}, K_{\text{КП}} = 0.9$

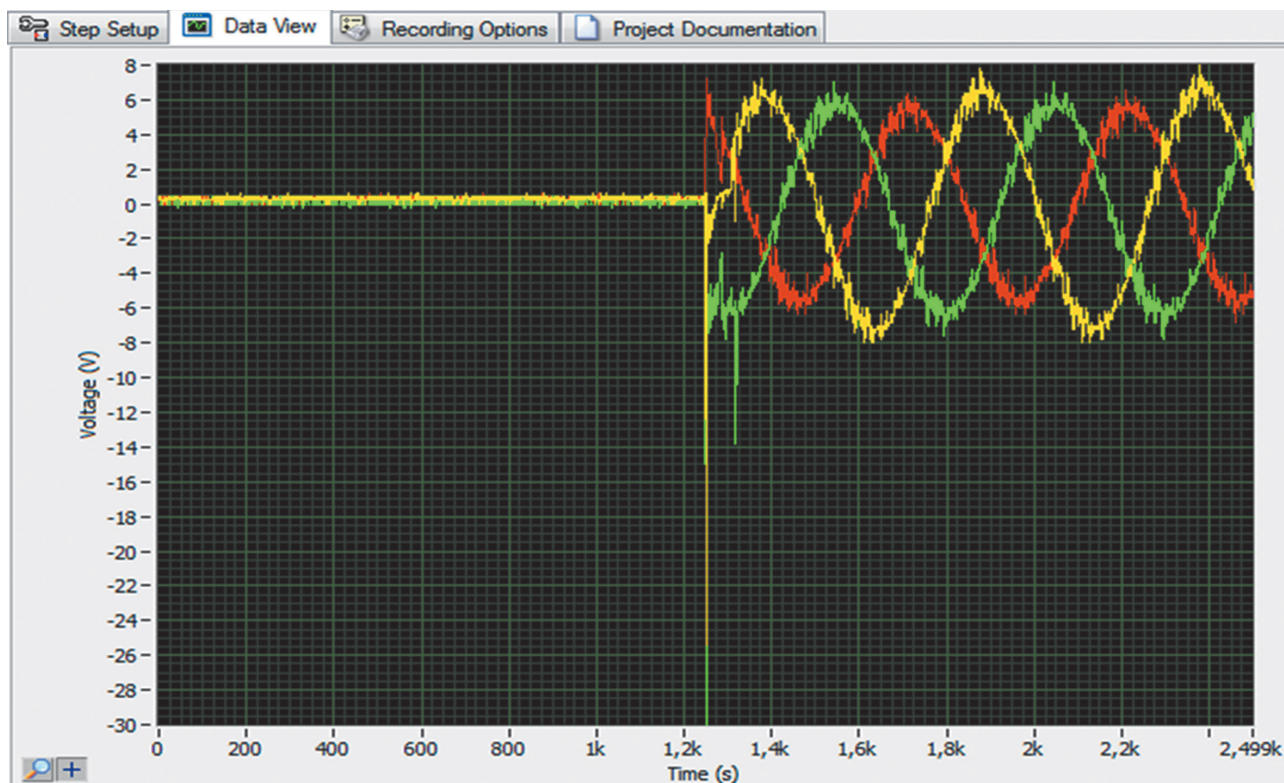


Рис. 8. Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора под нагрузкой $I_{\text{нагр}} = 0,74I$, $u(t)_{\text{max}} = 30000$ В, $K_{\text{КП}} = 3,0$

Fig. 8. A typical voltage waveform when switching on the converter transformer under the load $I_{\text{нагр}} = 0,74I$, $u(t)_{\text{max}} = 30000$ В, $K_{\text{КП}} = 3.0$

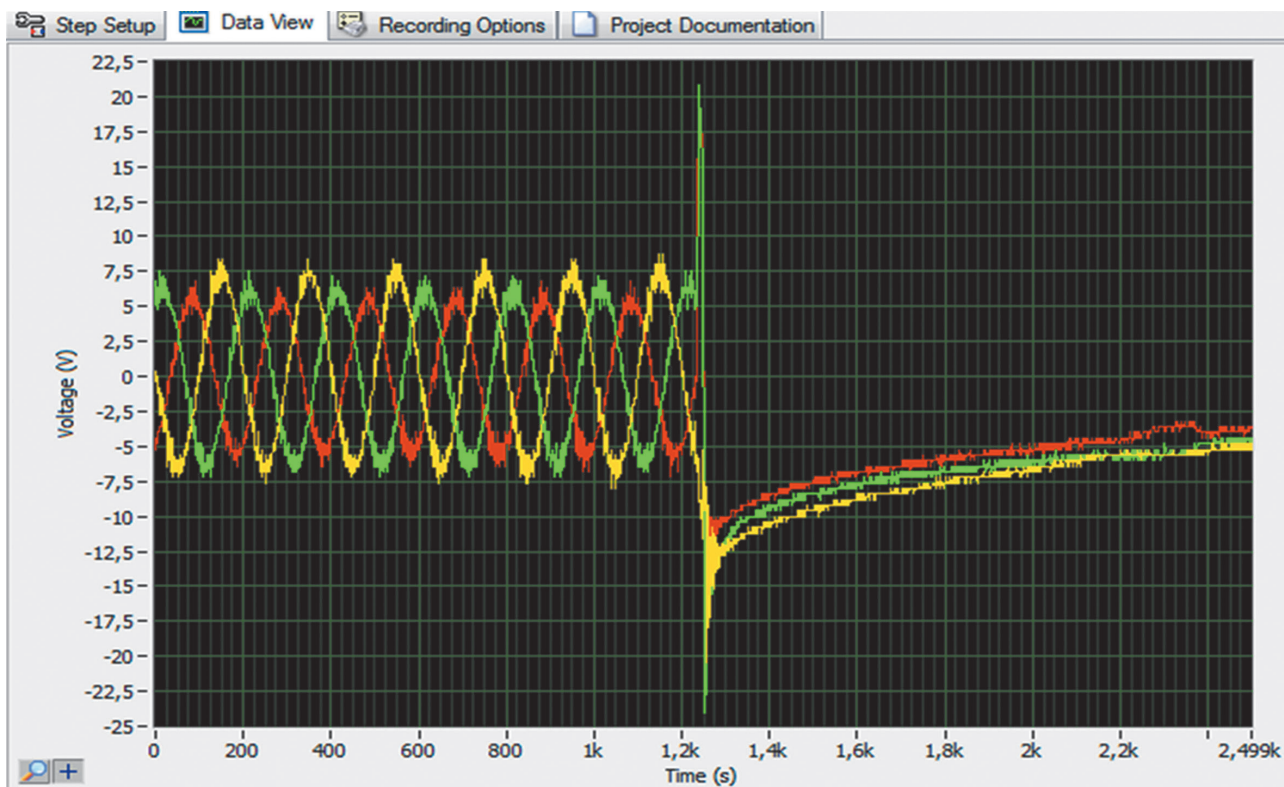


Рис. 9. Характерная осциллограмма напряжений при отключении преобразовательного трансформатора под нагрузкой $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{н тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 25000$ В, $K_{\text{КП}} = 2,5$

Fig. 9. A typical voltage waveform when switching off the converter transformer under the load $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{н тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 25000$ В, $K_{\text{КП}} = 2.5$

В табл. 3 приведены расширенные результаты натурных исследований коммутационных перенапряжений, а на рис. 10 – зависимости $K_{КП} = f(\gamma)$, где γ – отношение рабочего тока, протекающего через выключатель, к номинальному току выключателя. Анализ данных табл. 3 и зависимостей $K_{КП} = f(\gamma)$, представленных на рис. 7, показывает, что максимальная кратность коммутационных перенапряжений возникает при включении преобразовательного трансформатора, если γ находится в диапазоне 18,5–27,8% и может достигать 3,0, а при отключении максимальная кратность не превышает 2,5.

Если γ будет менее 10% и более 32,5%, тогда при коммутации преобразовательного трансформатора кратность перенапряжений не превысит 1,5.

Опыт эксплуатации преобразовательных трансформаторов показывает, что коммутация трансформаторов, применяемых в технологическом процессе производства алюминия, достаточно часто происходит при коэффициенте загрузки 0,4–0,7, что соответствует диапазону изменения коэффициента γ от 15 до 26%, т.е. создаются условия для возникновения максимальных перенапряжений.

Полученные результаты натурных исследований хорошо согласуются с данными, представленными на рис. 2, но отличаются от результатов, изложенных в [3, 4, 6]. Это обусловлено тем, что исследования проводились для выключателей с номинальным током 630–1000 А.

Очевидно, что прочих равных условиях применение выключателей с номинальным током 1000 А ($\gamma = I_{\text{ном}}/1000$ А) по сравнению с выключателями на 2000 А ($\gamma = I_{\text{ном}}/2000$ А) приводит к удвоению коэффициента γ . В этом случае значение коэффициента γ будет находиться в пределах от 30 до 52%. В этих условиях с ростом тока нагрузки кратность коммутационных перенапряжений будет снижаться.

Таким образом, необходимость использования элегазовых выключателей с номинальными токами от 2000 А и более для коммутации преобразовательных трансформаторов с увеличением токов нагрузки, приводящих к росту коэффициента γ до 28%, вызывает увеличение кратности коммутационных перенапряжений, а дальнейшее увеличение тока нагрузки сопровождается резким снижением кратности коммутационных перенапряжений, рис. 7.

Таблица 3. Расширенные результаты натурных исследований коммутационных перенапряжений
Table 3. Extended results of field studies of switching overvoltages

Вид коммутации	№ рисунка	Ток нагрузки, $I_{\text{нагр}}$		Ток выключателя		Наибольшее мгновенное значение напряжения $U(t)$, В	Кратность перенапряжения $K_{КП} = \frac{u(t)}{u_H}$
		значение, А	доля от номинального тока трансформатора	номинальное значение, А	доля от номинального значения: $\gamma = \frac{I_{\text{нагр}}}{I_H} \cdot 100\%$		
Включение	5	37	0,05	2000	1,85	9500	0,95
	7	185	0,25	2000	9,25	9000	0,9
	9	370	0,5	2000	18,5	29500	2,95
	11	555	0,74	2000	27,8	30000	3,0
	13	650	0,88	2000	32,5	10750	1,075
	15	740	1,0	2000	37	8500	0,85
Отключение	6	37	0,05	2000	1,85	12500	1,25
	8	185	0,25	2000	9,25	13000	1,3
	10	370	0,5	2000	18,5	15500	1,55
	12	555	0,74	2000	27,8	25000	2,5
	14	650	0,88	2000	32,5	14500	1,45
	16	740	1,0	2000	37	13500	1,35

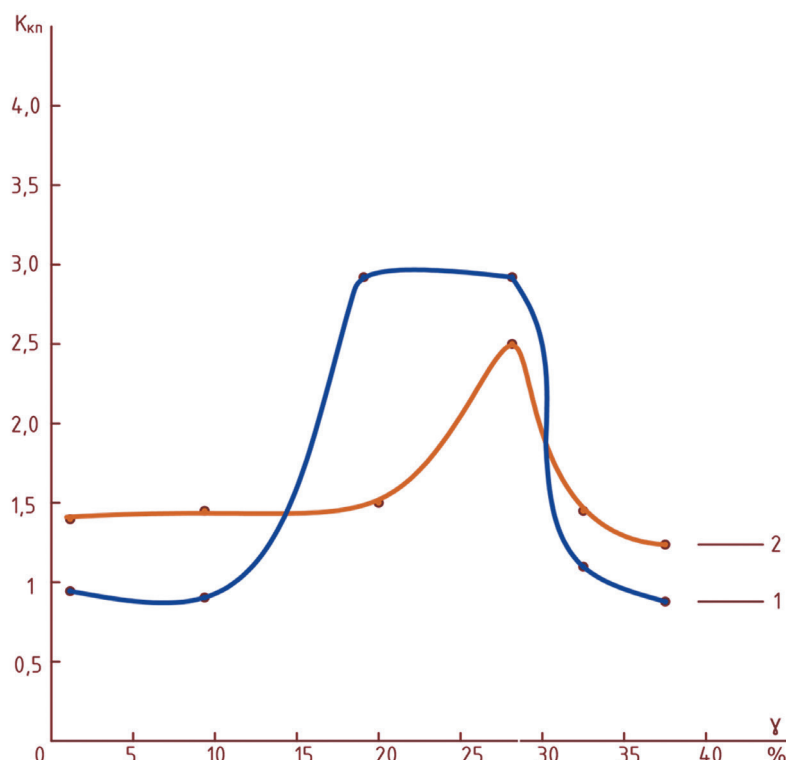


Рис. 10. Зависимость $K_{КП} = f(\gamma)$: 1 – включение; 2 – отключение

Fig. 10. Dependence $K_{КП} = f(\gamma)$: 1 – switching on; 2 – switching off

АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Согласно исследованиям, приведенным в [15–17], допустимая кратность перенапряжений для изоляции обмоток силовых трансформаторов и кабелей напряжением 6–10 кВ со сроком эксплуатации более 5 лет составляет 2,8.

Результаты полевых исследований продемонстрировали, что при переключении преобразовательных трансформаторов могут возникать перенапряжения с кратностью до 3,0. Это создает риск для изоляции обмоток трансформатора, кабельных муфт и элегазовых выключателей, поскольку, согласно данным Schneider Electric, импульсная прочность элегазовой камеры составляет 30 кВ.

В настоящее время для снижения коммутационных перенапряжений активно применяются нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и активно-емкостные RC-гасители.

Анализ литературных источников [9, 19–28] показал, что наиболее эффективными являются RC-гасители, у которых отсутствуют недостатки, присущие ОПН:

- наличие зоны замирания в работе устройства при частоте коммутационного импульса 45 кГц и выше;

- низкая термическая устойчивость к длительным однофазным токам замыкания на землю.

Полевые исследования показали, что при значениях коэффициента γ , равных 18,5 и 27,8%, эквивалентная частота коммутационного импульса находилась в диапазоне от 58 до 63 кГц (см. рис. 8, 9).

Согласно технологическим условиям, при возникновении однофазного замыкания на землю в схеме 10 кВ выключатель–кабель–преобразовательный трансформатор защита от замыканий на землю реагирует на сигнал, что позволяет замыканию сохраняться до трех часов, создавая условия для термического повреждения ОПН.

Исходя из вышеизложенного, для защиты от коммутационных перенапряжений был использован RC-гаситель модели RC-10,5-0,25/30-УХЛ1, изготовленный ООО «НПП «Рутас».

Эффективность данного устройства подтверждается характерными осциллограммами, снятыми при значении $\gamma = 27,8\%$, где наблюдались максимальные коммутационные перенапряжения, приведенные на рис. 11 и 12.

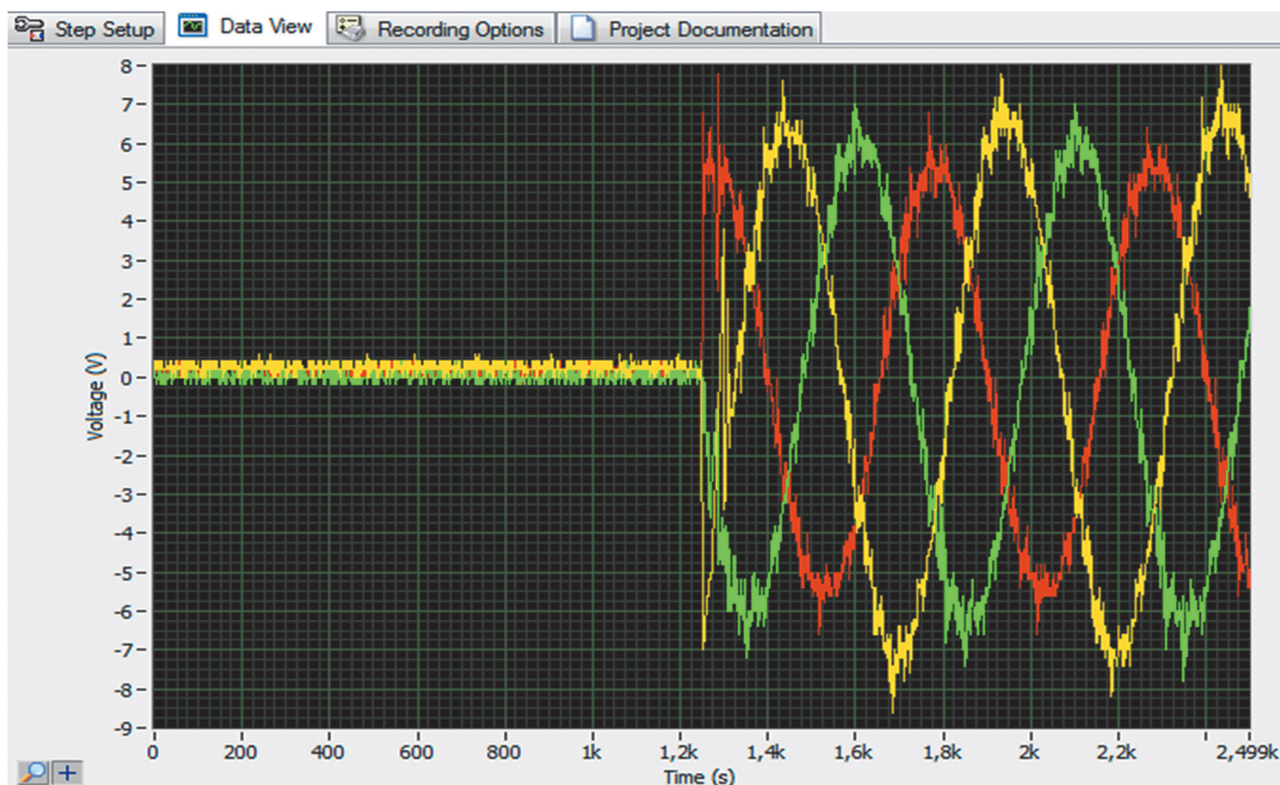


Рис. 11. Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора с RC-гасителем под нагрузкой $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{н.тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 9250$ В, $K_{\text{КП}} = 0,925$

Fig. 11. A typical voltage waveform when switching on a converter transformer with an RC damper under the load $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{н.тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 9250$ В, $K_{\text{КП}} = 0,925$

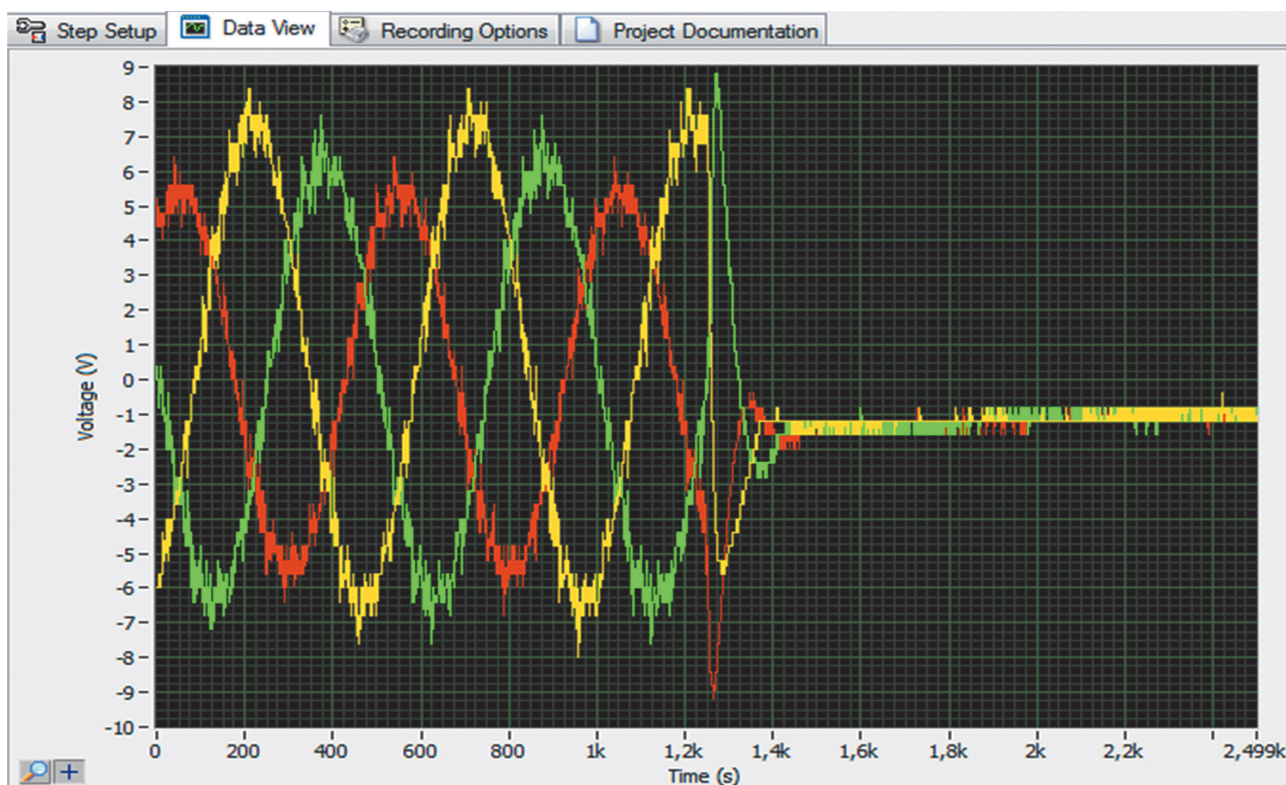


Рис. 12. Характерная осциллограмма напряжений при отключении преобразовательного трансформатора с RC-гасителем под нагрузкой $I = 0,74I_{\text{н.тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 9250$ В, $K_{\text{КП}} = 0,925$

Fig. 12. A typical voltage waveform when switching off a converter transformer with an RC damper under the load $I = 0,74I_{\text{н.тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 9250$ В, $K_{\text{КП}} = 0,925$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере увеличения отключающей способности коммутационных аппаратов возрастает и их номинальный ток. Это приводит к тому, что фактические рабочие токи выключателя редко превышают 40% от номинальных токов выключателей ($\gamma \leq 40\%$).

Исследования показали, что с увеличением рабочих токов элегазового выключателя LF2 до значения не более 27,8% от номинального тока выключателя (параметр γ) наблюдается рост кратности коммутационных перенапряжений до 3,0. При токах $\gamma \leq 27,8\%$ в элегазовых камерах выключателя LF2 практически не меняется угол коммутации, что приводит к росту среза тока и увеличению коммутационных перенапряжений.

Дальнейший рост рабочих токов элегазовых выключателей LF2, при которых $\gamma > 27,8\%$,

сопровождается резким снижением кратности коммутационных перенапряжений за счет уменьшения среза тока, обусловленного увеличением времени горения и мощности дуги. Это приводит к интенсивной ионизации межконтактного пространства и образованию паров металла, в данных условиях угол коммутации возрастает.

Кратность измеренных коммутационных перенапряжений составляет 3,0, что представляет риск для изоляции обмоток трансформатора, кабельных линий и элегазовых выключателей и требует выполнения надежной защиты от этих перенапряжений.

Исследования подтвердили [19, 20], что применение RC-гасителей предотвращает возникновение опасных для изоляции перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов.

Список источников

1. Бохмат И.С. Особенности энергопотребления предприятий алюминиевой промышленности // Алюминиевая промышленность и электроэнергетика: реальность и перспективы: материалы открытого семинара (г. Москва, 30 марта 2004 г.). М.: РАН Институт народнохозяйственного прогнозирования, 2004. С. 4–18.
2. Кугушева Н.Н., Семёнов А.С., Якушев И.А., Павлова С.Н. Техничко-экономические особенности выбора частотно-регулируемых электроприводов для технологических установок алмазодобывающих предприятий // Инновации и инвестиции. 2021. № 1. С. 145–149. EDN: NBMMNS.
3. Брыкалов С.М., Балыбердин А.С., Трифонов В.Ю., Засухин Р.В. Ключевые направления повышения энергетической эффективности крупных промышленных предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 5. С. 10–18. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>. EDN: UYSLEK.
4. Семёнов А.С., Егоров А.Н., Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Якушев И.А., Федоров А.В. Анализ работы систем частотно-регулируемого электропривода при влиянии высших гармоник // Электротехнические системы и комплексы: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 22–25 октября 2019 г.). Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2019. С. 178–184. EDN: CDLION.
5. Егоров А.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты Power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. 2017. № 4. С. 86–93. EDN: YMIGZU.
6. Клундук Г.А. Влияние преобразователя частоты на энергосбережение насосного агрегата и электромагнитная совместимость оборудования // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 21–23 апреля 2020 г.). Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2020. С. 153–157. EDN: CQCWQD.
7. Бебихов Ю.В., Егоров А.Н., Матул Г.А., Семёнов А.С., Харитонов Я.С. Поиск путей повышения эффективности применения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в условиях горного производства // Естественные и технические науки. 2018. № 8. С. 228–234. EDN: XYUMDB.
8. Шевырёв Ю.В., Шевырева Н.Ю. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // Горный журнал. 2019. № 1. С. 66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>. EDN: VTVWHN.
9. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. Iss. 2. <https://doi.org/10.3390/app11020538>.
10. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 937. Iss. 2. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>.
11. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor // Innovative Data Communication Technologies and Application. 2021. Vol. 59. P. 97–105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8.
12. Скакунов Д.А. Влияние силовой электроники на качество электрической энергии и методы фильтрации высших гармоник // Всерос. науч.-техн. конф.: сб. науч. тр. (г. Новокузнецк, 18–20 мая 2004 г.). Новокузнецк: СибГИУ, 2004. С. 253–257.

13. Каганов В.И. Способ энергосбережения при производстве алюминия на основе импульсного метода электролиза // Энергосбережение и энергоэффективность. 2013. № 2. С. 20–24. EDN: QAOKGN.
14. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. Электрометаллургия алюминия: монография. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
15. Воздвиженский В.А., Гончаров А.Ф., Козлов В.Б., Нагарёв С.В., Эпштейн И.Я. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями. М.: Энергоатомиздат, 1988. 200 с.
16. Гиндулин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 90 с.
17. Akagi H. Active Harmonic Filters // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. Iss. 12. P. 2128–2141.
18. Кузьмин С.В. Использование силовых трансформаторов для локализации высших гармоник в системах электроснабжения 0,4–10 кВ // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 2009 г.). Красноярск, 2009. С. 268–270.
19. Кузьмин Р.С., Кузьмин И.С., Меньшиков В.А., Кузьмин С.В., Куликовский В.С. Метод оценки и прогнозирования перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ как средство повышения уровня электробезопасности на горных предприятиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 5. С. 116–132. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>. EDN: JCGATU.
20. Кузьмин С.В., Майнагашев Р.А., Гаврилова Е.В., Немков С.В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 4. С. 53–54. EDN: NRAJPZ.
21. Kuzmin S.V., Umetskaia E.V., Zavalov A.A. Influence of power quality on value of switching overvoltages in networks 6–10 kV // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271527>.
22. Sowa P., Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem // International Journal of GEOMATE. 2020. Vol. 19. Iss. 72. P. 180–189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>.
23. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 122. P. 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>.
24. Fritz N., Engelmann G., De Doncker R.W. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells // 21st European Conference on Power Electronics and Applications. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>.
25. De Paula dos Santos D., Sartori C.A.F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters // IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>.
26. Кузьмин С.В., Гаврилова Е.В., Барышников Д.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6–10 кВ горнодобывающих предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 2. С. 41–44. EDN: JWVZWF.
27. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
28. Тихонов К.В. Исследование коммутационных перенапряжений в электрических сетях до 1000 В // iPolytech Journal. 2023. Vol. 27. № 2. С. 370–379. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>. EDN: LTHUGJ.

References

1. Bohmat I.S. Energy consumption features of aluminum industry enterprises. In: *Alyuminievaya promyshlennost' i elektroenergetika: real'nost' i perspektivy: materialy otkrytogo seminara = Aluminum industry and electric power industry: reality and promises: materials of the open seminar*. 30 March 2004, Moscow. Moscow: The Institute of Economic Forecasting of the RAS; 2004, p. 4–18. (In Russ.).
2. Kugusheva NN, Semenov AS, Yakushev IA, Pavlova SN. Technical and economic features of choice of frequency-controlled electric drives for technological units of diamond mining enterprises. *Innovation & Investment*. 2021;1:145–149. (In Russ.). EDN: NBMMNS.
3. Brykalov S.M., Balyberdin A.S., Trifonov V.Yu., Zasukhin R.V. Key approaches to energy efficiency improvement at large manufacturing companies. *Energy Safety and Energy Economy*. 2020;5:10–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>. EDN: UYSLEK.
4. Semyonov A.S., Egorov A.N., Haritonov Ya.S., Bebihov Yu.V., Yakushev I.A., Fedorov A.V. Analysis of the operation of variable-frequency electric drive systems under the influence of high harmonics. In: *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Electrical engineering systems and complexes: Collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 22–25 October 2019, Ufa. Ufa: Ufa University of Science and Technology; 2019, p. 178–184. (In Russ.). EDN: CDLION.
5. Egorov A.N., Semenov A.S., Fedorov O.V. The practical experience of the application of the frequency converter power flex 7000 in the mining industry. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva*. 2017;4:86–93. (In Russ.). EDN: YMIGZU.

6. Klunduk G.A. Influence of a frequency converter on the power saving of a pump unit and electromagnetic compatibility of equipment. In: *Nauka i obrazovanie. Opyt, problemy, perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Science and Education. Experience, problems, development prospects: Collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 21–23 April 2020, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2020, vol. 1, p. 153-157. (In Russ.). EDN: CQCWQD.
7. Bebikhov Yu.V., Egorov A.N., Matul G.A., Semenov A.S., Kharitonov Ya.S. Search of ways to improve the efficiency of application of high-voltage frequency-regulated electric drive in conditions of mining production. *Natural and Technical Sciences*. 2018;8:228-234. (In Russ.). EDN: XYUMDB.
8. Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019;1:66-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>. EDN: VTVWHN.
9. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(2). <https://doi.org/10.3390/app11020538>.
10. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;937(2):012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>.
11. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor. In: *Innovative Data Communication Technologies and Application*. 2021;59:97-105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8.
12. Skakunov D.A. Influence of power electronics on electric power quality and methods of higher harmonics filtering. In: *Trudy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2004, Novokuznetsk. Novokuznetsk; 2004, vol. 1, p. 253-257. (In Russ.).
13. Kaganov V.I. A possible way of energy-savings with pulse method of an electrolysis process in aluminum production. *Energoberezhenie i energoeffektivnost'*. 2013;2:20-24. (In Russ.). EDN: QAOKGN.
14. Mintsis M.Ya., Polyakov P.V., Sirazutdinov G.A. *Electrometallurgy of aluminum*. Novosibirsk: Nauka; 2001, 368 p. (In Russ.).
15. Vozdvizhenskij V.A., Goncharov A.F., Kozlov V.B., Nagaryov S.V., Epshtejn I.Ya. *Vacuum switches in electric motor control circuits*. Moscow: Energoatomizdat; 1988, 200 p. (In Russ.).
16. Gindulin F.A., Gol'dshtejn V.G., Dul'zon A.A., Halilov F.H. *Overvoltage in 6-35 kV networks*. Moscow: Energoatomizdat; 1989, 90 p. (In Russ.).
17. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(12):2128-2141.
18. Kuz'min S.V. Using power transformers for higher harmonics localization in 0.4 – 10 kV power supply systems. In: *Energoeffektivnost' sistem zhizneobespecheniya goroda: Trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Energy efficiency of city life support systems: Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2009, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2009, vol. 1, p. 268–270. (In Russ.).
19. Kuzmin R.S., Kuzmin I.S., Menshikov V.A., Kuzmin S.V., Kulikovskii V.S. Method of assessment and prediction of overvoltage caused by single-phase arc ground short circuits in the 6–10 kV mains as a way of increasing the electrical safety level in mining facilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;5:116-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>. EDN: JCGATU.
20. Kuzmin S.V., Mainagashev R.A., Gavrilova E.V., Nemkov S.V. The experience of operating the protection means against the commutation overvoltage in the systems of supplying mining companies with 6 kV electric power. *Mining equipment and electromechanics*. 2011;4:53-54. (In Russ.). EDN: NRAJPZ.
21. Kuzmin S.V., Umetskaia E.V., Zavalov A.A. Influence of power quality on value of switching overvoltages in networks 6–10 kV. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271527>.
22. Sowa P., Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem. *International Journal of GEOMATE*. 2020;19(72):180-189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>.
23. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;122:106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>.
24. Fritz N., Engelmann G., De Doncker R.W. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells. In: *21st European Conference on Power Electronics and Applications*. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>.
25. De Paula dos Santos D., Sartori C.A.F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters. In: *IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference*. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>.
26. Kuzmin S.V., Gavrilova E.V., Baryshnikov D.V. The influence of the arc extinction process in high-voltage switches on the communication overvoltage value appearing in the 6–10 kV circuits of mining enterprises. *Mining equipment and electromechanics*. 2009;2:41-44. (In Russ.). JWVZWF.
27. Mesyats G.A. *Pulsed power and electronics*. Moscow: Nauka; 2004, 704 p. (In Russ.).
28. Tikhonov K.V. Study of switching overvoltages in electrical networks up to 1000 V. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):370-379. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>. EDN: LTHUGJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тихонов Алексей Валерьевич,
аспирант,
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»,
115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9, Россия;
инженер,
ООО «НПП «Рутас»,
660025, г. Красноярск, ул. Вавилова, 72, Россия
✉ tikhonovalexey@mail.ru; rutas2004@list.ru
<https://orcid.org/0009-0004-0103-7857>

Заявленный вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.09.2024 г.; принята к публикации 10.09.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksey V. Tikhonov,
Postgraduate Student,
National University of Science and Technology MISIS,
8/9, Ordzhonikidze St., Moscow 115419, Russia;
Engineer,
LLC Research and Development Enterprise Rutas,
72, Vavilov St., Krasnoyarsk 660025, Russia;
✉ tikhonovalexey@mail.ru; rutas2004@list.ru
<https://orcid.org/0009-0004-0103-7857>

Author contribution

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the manuscript for publication.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 01.08.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 10.09.2024.