

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

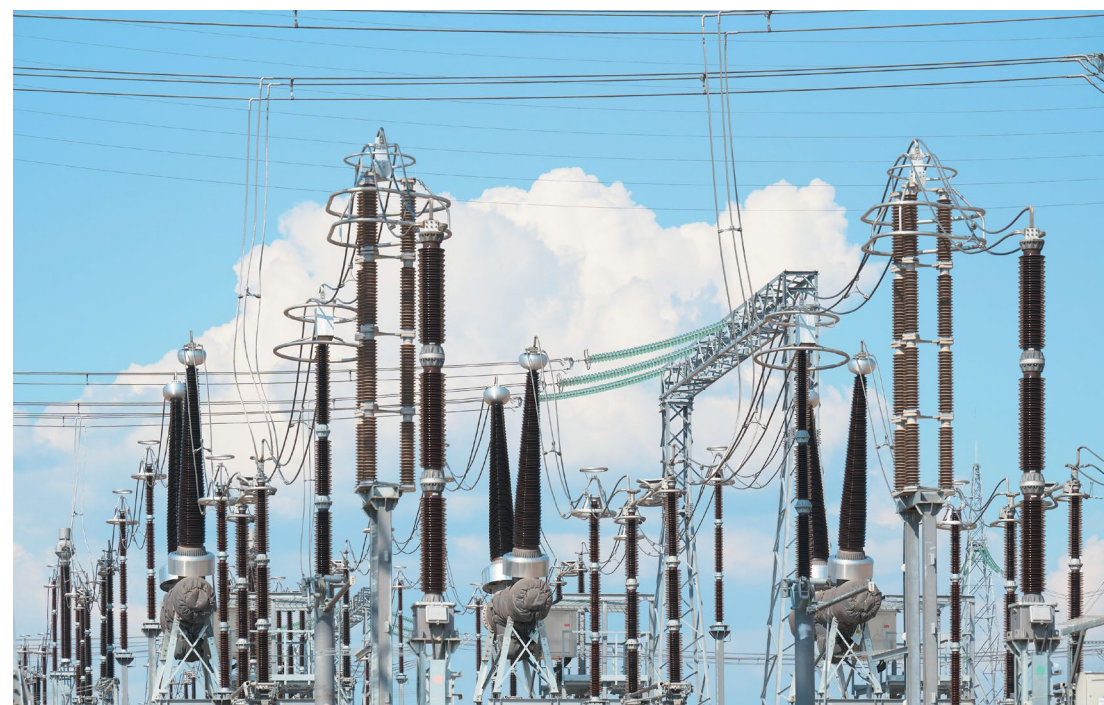
АВТОР:

А.Н. ЗАЙЦЕВ,
ФИЛИАЛ ПАО «РОССЕТИ»
НИЖЕГОРОДСКОЕ ПМЭС

Рассматриваются методы определения коммутационного ресурса выключателей 10–500 кВ в соответствии с Методическими указаниями по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации (утв. Научно-исследовательским центром по испытанию высоковольтной ап-

паратуры 23.09.1991) применительно к конкретным типам выключателей. Описан метод определения функции зависимости допустимого количества отключений от тока короткого замыкания, коммутируемого выключателем, а также применение данного метода при отсутствии возможности определения токов короткого замыкания на линии.

Ключевые слова: высоковольтные выключатели; токи короткого замыкания; коммутационный ресурс; методы определения.



Расчет механического и коммутационного ресурсов силовых выключателей 110–500 кВ позволяет точнее планировать ремонтную программу

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на объектах электроэнергетики в рамках замены физически и морально устаревших основных фондов установлено современное оборудование с высокой степенью надежности. Один из основных видов устанавливаемого оборудования — высоковольтные выключатели отечественного и импортного производства. Несмотря на высокую степень надежности, производители выключателей регламентируют эксплуатационной документацией средний или капитальный ремонт по времени эксплуатации и (или) исчерпанию механического или коммутационного ресурсов.

Например, для выключателя ВГТ-110III-40/2000 производства ООО «ЗЭТО-Газовые Технологии» средний ремонт проводится после 25 лет его эксплуатации и (или) по исчерпанию механического или коммутационного ресурсов аппарата. Для выключателя HPL-550 B2 производства ABB капитальный ремонт дугогасительной камеры проводится при достижении допустимого количества отключений токов КЗ.

Если механический ресурс современных выключателей составляет от 5000 до 50000 коммутаций и является недостижимой величиной за весь срок службы выключателя, то коммутационный ресурс зависит от величины тока, протекающего через выключатель в момент отключения (включения).

Следует отметить, что случаи достижения допустимого количества коммутаций номинальных токов и токов КЗ выключателями 110–500 кВ носят единичный характер и в большинстве случаев дефекты контактной части дугогасительной камеры, способные привести к превышению ресурса выключателей, устраняются в рамках средних и капитальных ремонтов путем ремонта контактной части либо ее полной замены.

За все время учета коммутационного ресурса выключателей 110–500 кВ на подстанциях предприятия ремонт выключателя по достижении предельной величины коммутационного ресурса выполнялся только на одном выключателе 110 кВ типа ВМТ, который использовался при частых коммутациях номинальных токов батареи статического компенсатора. После замены в 2017 г. данного выключателя на элегазовый необходимость в таком ремонте отсутствует.

В настоящее время существуют отечественные программно-технические комплексы для расчета и учета механического и коммутационного ресурсов выключателей 10–500 кВ:

- комплексная система диагностики выключателей (КСДВ) производства ЗАО «Энергомаш — Уралэлектротяжмаш». Система учета коммутационного ресурса обеспечивает расчет и учет выработанного и остаточного механического и коммутационного ресурсов выключателя, контроль превышения времени горения дуги, а также диагностику электрических отказов выключателя;
- интеллектуальные устройства релейной защиты БМРЗ производства НТЦ «Механотроника». Имеют встроенный функционал расчета остаточного ресурса выключателя. Он основан на данных производителей высоковольтных выключателей, а также на информации, собранной в момент отключения выключателя;
- устройства релейной защиты присоединений 6–35 кВ на базе терминалов ЭКРА 217 производства группы компаний «Экра». Терминалы имеют функцию учета коммутационного ресурса выключателей 6–35 кВ;
- система автоматизации контроля за коммутационным ресурсом выключателя «Ресурс» производства ПО «Госан».

ПАО «ФСК — Россети» ведутся НИОКР по теме «Разработка алгоритмов и ПТК для контроля состояния силового электрооборудования 110–500 кВ на базе синхронизированных измерений и мониторинга параметров нормальных и аварийных режимов работы и внедрение его на одном из объектов заказчика».

В электросетевом комплексе существует несколько нормативно-технических документов (НТД), регламентирующих способы задания и методы определения коммутационного ресурса выключателей:

1. ГОСТ 687–78. Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия (для выключателей, выпущенных до 1 января 2007 г.).
2. ГОСТ Р 52565–2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия (для выключателей, выпущенных после 1 января 2007 г.).
3. Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации (далее — МУ, утв. Научно-исследовательским центром по испытанию высоковольтной аппаратуры 23.09.1991).

ГОСТ 687–78 и ГОСТ Р 52565–2006 регламентируют общие способы задания коммутационного ресурса выключателей, изготовленных в разные годы на территории СССР и России.

МУ описывают методы определения коммутационного ресурса выключателей в зависимости от способов задания ресурса в эксплуатационных документах завода — изготовителя выключателей. Методы определения коммутационного ресурса выключателей, описанные в данных МУ, сводятся к графическому построению зависимости (или к определению по имею-

КОММУТАЦИОННЫЙ РЕСУРС ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ВВБ-220-2000/31,5

Значение тока	Допустимое суммарное число операций О и В
Токи короткого замыкания	
- свыше 60 до 100% номинального тока отключения	12 (8)
- свыше 30 до 60% номинального тока отключения	21 (14)
- до 30% номинального тока отключения	30 (21)
Токи нагрузочные	
- до 100% номинального тока	500 (250)

Таблица 1

ЧИСЛОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ТОКОВ ОТКЛЮЧЕНИЯ И СООТВЕТСТВУЮЩЕЕ ИМ ДОПУСТИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ОТКЛЮЧЕНИЙ

При номинальных токах (Iоткл < 2000 А)	250 отключений
При токах (2000 А < Iоткл < 9,45 кА)	21 отключений
При токах (9,45 кА < Iоткл < 18,9 кА)	14 отключений
При токах (18,9 кА < Iоткл < 31,5 кА)	8 отключений

Таблица 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКА В СЕРЕДИНЕ ИНТЕРВАЛА

Интервал тока	Iн, кА	Iк, кА	Точка на графике (середина интервала)	Значение тока в точке, кА	Значение Nоткл в точке
0 кА < Iоткл < 2 кА	0	2	1	1,0	250
2 кА < Iоткл < 9,45 кА	2	9,45	2	5,725	21
9,45 кА < Iоткл < 18,9 кА	9,45	18,9	3	14,175	14
18,9 кА < Iоткл < 31,5 кА	18,9	31,5	4	25,2	8

Таблица 3

щемся графику завода-изготовителя) допустимого количества отключений от тока КЗ, коммутируемого выключателем, с последующим определением коммутационного ресурса выключателя и его расхода.

Условности, описанные в МУ, и высокая степень погрешностей при построении графиков не позволяют однозначно трактовать полученные результаты. Например, построение кривой по одному из способов

задания коммутационного ресурса в соответствии с МУ:

коммутационный ресурс задан в виде одного, двух или трех значений допустимого количества отключений, отнесенных к интервалам значений отключаемого тока, например от $0,6I_{0,НОМ}$ до $I_{0,НОМ}$, от $0,3I_{0,НОМ}$ до $0,6I_{0,НОМ}$, от $0,1I_{0,НОМ}$ до $0,3I_{0,НОМ}$. Строится ступенчатая линия по заданным допустимым количествам отключений и заданным интервалам тока. По возможности ступенчатая линия заменяется плавной кривой. Плавная кривая проводится предпочтительно через середины интервалов.

Ключевые слова *по возможности* и *предпочтительно* вносят погрешность, определяемую человеческим фактором при построении кривых. То есть два независимых друг от друга работника при равных условиях получат различные значения коммутационного ресурса.

Для некоторых типов выключателей (МКП-110, ВВД-220, ВМПЭ-10) в руководстве по эксплуатации отсутствуют значения допустимого количества коммутаций в интервале тока от $0,1I_{0,НОМ}$ до $0,3I_{0,НОМ}$, при этом отсутствует возможность построения кривой через этот интервал.

Определение функции зависимости в виде математического выражения допустимого количества отключений (включений) от тока при определении коммутационного ресурса выключателей позволит исключить погрешность в построении графических зависимостей и унифицировать метод расчета коммутационного ресурса выключателя любого типа и производителя. Следует отметить, что описываемый метод имеет высокую погрешность для токов близких к номинальным токам выключателей. Но так как коммутационный ресурс при номинальных токах в большинстве случаев практически неисчерпаем за весь срок службы (или за цикл капитального ремонта)

выключателя, то в условиях эксплуатации данной погрешностью можно пренебречь.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ЗАВИСИМОСТИ В ВИДЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ ДОПУСТИМОГО КОЛИЧЕСТВА ОТКЛЮЧЕНИЙ (ВКЛЮЧЕНИЙ) ОТ ТОКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Условия определения функции зависимости допустимого количества отключений от тока имеет вид степенной функции,

1. Зависимость допустимого количества отключений от тока имеет вид степенной функции,

$$N = a \cdot I(k/kз), \quad (1)$$

где a и k — коэффициенты, зависящие от типа выключателя;

$I_{кз}$ — ток короткого замыкания, протекающий через выключатель во время отключения.

2. При отсутствии в документации производителя сведений о коммутационном ресурсе выключателей, данные берутся из ГОСТ 687-78 или ГОСТ Р 52565-2006 в зависимости от даты изготовления выключателя.

Для примера определим функцию зависимости допустимого количества отключений от тока выключателя ВВБ-220-2000/31,5.

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СЕРЕДИНЫ ИНТЕРВАЛОВ

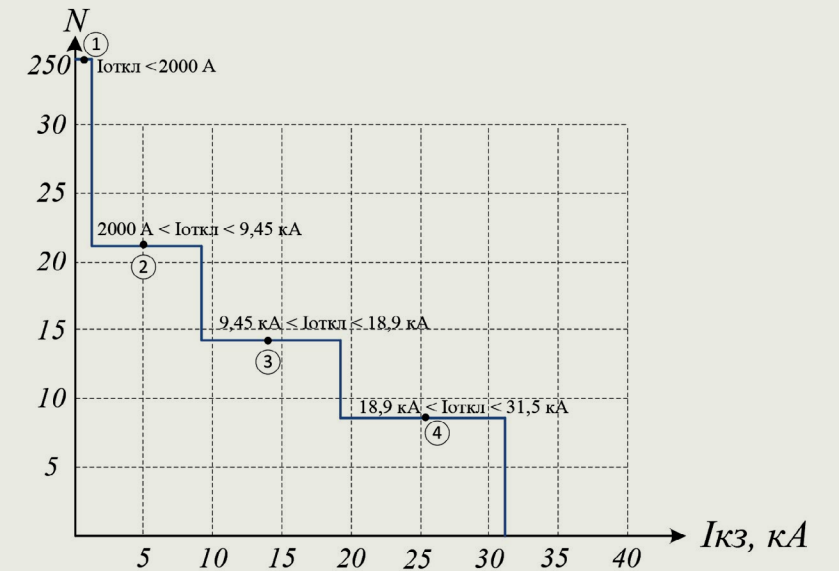


Рис. 1

ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ДОПУСТИМОГО КОЛИЧЕСТВА ОТКЛЮЧЕНИЙ (О) И ВКЛЮЧЕНИЙ (В) ОТ ТОКА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ВВБ-220-2000/31,5

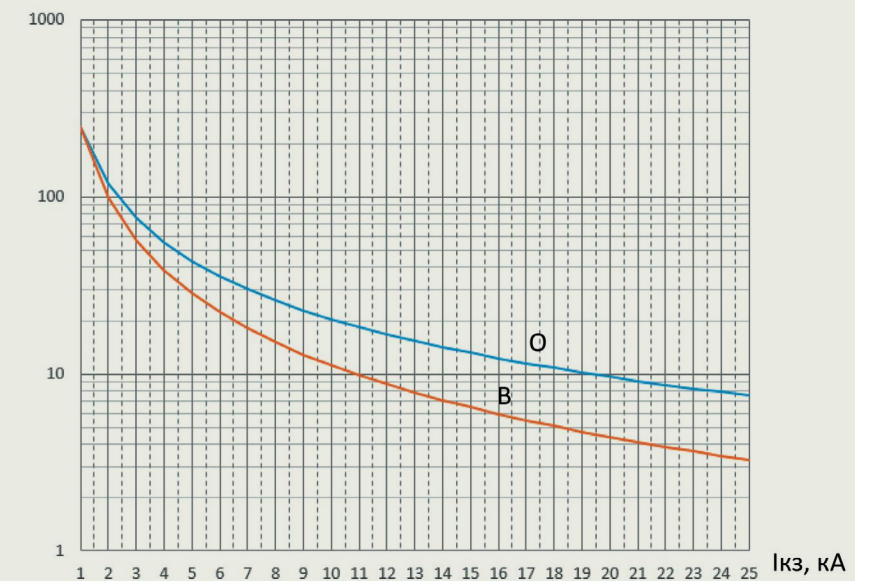


Рис. 2

ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ ДОПУСТИМОГО КОЛИЧЕСТВА ОТКЛЮЧЕНИЙ ОТ ТОКА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ЗАР1-FG 245 ($I_{НОМ} = 2000 \text{ А}$, $I_{ОТКЛ} = 31,5 \text{ кА}$) ПРОИЗВОДСТВА SIEMENS

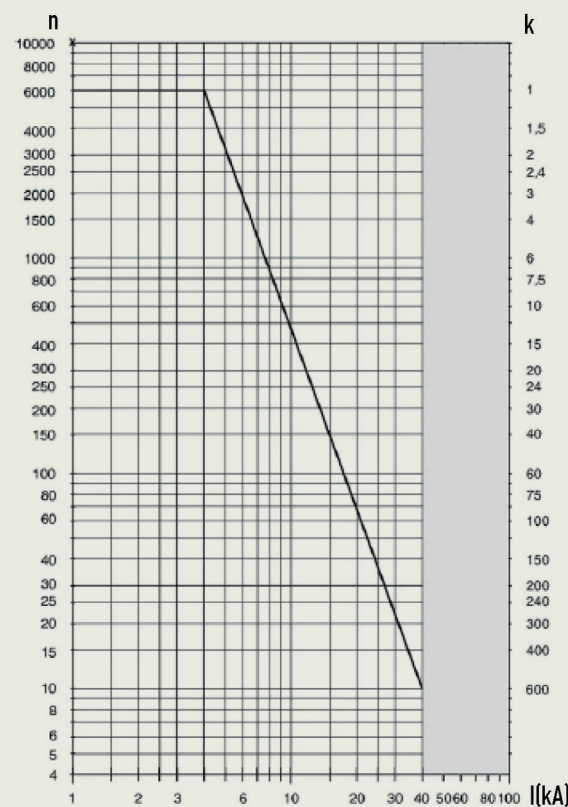


Рис. 3

Коммутационный ресурс выключателя ВВБ-220-2000/31,5 задан производителем в виде таблицы.

В соответствии с МУ определим середины интервалов тока. Обозначим середины интервалов точками 1-4 и определим значения тока в середине интервала (табл. 3). Графически метод представлен на рис. 1.

Определяем значение коэффициентов a и k в степенной функции $N = a \cdot I(k/k_3)^k$ по двум известным точкам:

при $I_{к31} = 1 \text{ кА}$, $N_1 = 250 = a$ (первая точка);

при $I_{к32} = 14,175 \text{ кА}$, $N_2 = 14,175$ (вторая точка).
 $k = \log_{I_{к32}/I_{к31}}(N_2/N_1) = -1,087$.

Решая систему уравнений, получим функцию зависимости допустимого количества отключений от тока выключателя ВВБ-220-2000/31,5:

$$N = 250 \cdot I_{к3}^{-1,087}$$

Аналогичным образом определяем функцию зависимости допустимого количества включений от тока выключателя ВВБ-220-2000/31,5:

$$N = 250 \cdot I_{к3}^{-1,3485}$$

На рис. 2 приведены графики зависимости допустимого количества отключений и включений от тока выключателя ВВБ-220-2000/31,5 по определенным выше функциям.

Определим функцию зависимости допустимого количества отключений от тока выключателя ВГТ-110 производства ЗЭТО.

Коммутационный ресурс выключателя ВГТ-110 задан производителем в виде табл. 4.

В данном случае при определении функции зависимости допустимого количества отключений и включений от тока выключателя необходимо подставить в степенную функцию имеющиеся значения токов и соответствующие им значения допустимого числа отключений.

При решении системы из двух уравнений получаем следующие выражения:

- зависимости допустимого количества отключений от тока для ВГТ-110-40/2000 — $N = 10000 \cdot I_{к3}^{-1,6847}$;
- зависимости допустимого количества включений от тока для ВГТ-110-40/2000 — $N = 10000 \cdot I_{к3}^{-1,8726}$;
- зависимости допустимого количества отключений от тока для ВГТ-110-40/3150 — $N = 4200 \cdot I_{к3}^{-1,4495}$;
- зависимости допустимого количества включений от тока для ВГТ-110-40/3150 — $N = 4200 \cdot I_{к3}^{-1,6374}$.

Определим функцию зависимости допустимого количества отключений от тока выключателя ЗАР1-FG 245 ($I_{НОМ} = 2000 \text{ А}$, $I_{ОТКЛ} = 31,5 \text{ кА}$) производства Siemens.

Производителем выключателей данного типа в эксплуатационной документации коммутационный ресурс задан в виде кривой в логарифмическом масштабе (рис. 3).

КОММУТАЦИОННЫЙ РЕСУРС ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ВГТ-110

Значение	Допустимое число операций	
	ВГТ-110-40/3150	ВГТ-110-40/2000
Ресурс выключателя по коммутационной стойкости до среднего ремонта, число операций отключений при токе 40 кА ($I_{О.НОМ}$) включений при токе 40 кА ($I_{О.НОМ}$)		20
отключений при токе 24 кА ($0,6I_{О.НОМ}$) включений при токе 24 кА ($0,6I_{О.НОМ}$)		34
при токах номинальных и близких к номинальному		17
«включение – произвольная пауза – отключение»	4 200	10 000

Таблица 4

Функцию зависимости допустимого количества отключений от тока выключателя также определяем по двум точкам на графике.

Решая систему из двух уравнений, получаем следующее выражение:

$$N = 285984 \cdot I_{к3}^{-2,7638}$$

ОЦЕНКА ДОПУСТИМОГО КОЛИЧЕСТВА ОТКЛЮЧЕНИЙ (ВКЛЮЧЕНИЙ) ПРИ ОТСУТСТВИИ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ТОКОВ КЗ НА ЛИНИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

В соответствии с МУ допустимое количество отключений (включений) полюса выключателя определяется по выражению:

$$n_{п} = \left(-\frac{1,3\sigma_p}{2m_p} + \sqrt{\left(\frac{1,3\sigma_p}{2m_p}\right)^2 + \frac{1}{m_p}} \right)^2$$

Значения τ_p и σ_p определяются из выражений:

$$m_p = \int_{I_k}^{I_n} \rho(I) f(I) dI;$$

$$\sigma_p = \left[\int_{I_k}^{I_n} \rho^2(I) f(I) dI - m_p^2 \right]^{1/2},$$

где I_n — ток при КЗ в начале линии (принимается ток КЗ на шинах ПС);

I_k — ток при КЗ в конце линии;

$\rho(I)$ — зависимость расхода ресурса от тока, $\rho_{oI} = \frac{1}{n_{oI}}$, $\rho_{вI} = \frac{1}{n_{вI}}$;

$f(I)$ — плотность распределения

вероятности токов КЗ при равной вероятности расположения места КЗ вдоль линии:

$$f(I) = \begin{cases} 0 & \text{при } I \leq I_k, I > I_n \\ \frac{I_n I_k}{I^2 (I_n - I_k)} & \text{при } I_k \leq I \leq I_n \end{cases}$$

Определим допустимое количество отключений выключателем типа ЗАР1-FG 145, установленным на ВЛ 110 кВ Арзамасская — Сатис на ПС 500 кВ «Арзамасская».

Ток короткого замыкания в начале линии (на 2 СШ 110 кВ): $I_n = 19,3 \text{ кА}$;

ток короткого замыкания в конце линии: $I_k = 4,8 \text{ кА}$.

Определив функцию зависимости допустимого количества отключений от тока выключателя ЗАР1-FG 245 методом, описанным выше, получим выражение:

$$N = 285984 \cdot I_{к3}^{-2,7638}$$

Зависимость расхода коммутационного ресурса выключателя от тока — $1/N$

$$\rho(I) = \frac{I^{2,7638}}{275984};$$

$$f(I) = \frac{I_n I_k}{I^2 (I_n - I_k)}$$

Преобразовав оба выражения и подставив численные значения токов, получим:

$$n_{п} = \left(-\frac{1,3\sigma_p}{2m_p} + \sqrt{\left(\frac{1,3\sigma_p}{2m_p}\right)^2 + \frac{1}{m_p}} \right)^2 = 421.$$

Таким образом, допустимое количество отключений полюса выключателя типа ЗАР1 FG 245, установленного на ВЛ 110 кВ Арзамасская — Сатис, составляет 421.

Определим допустимое количество отключений выключателем типа У-110-40/2000, установленным на ВЛ 110 кВ Кудьма — Пропилен на ПС 220 кВ «Кудьма».

Ток короткого замыкания в начале линии (на СШ 110 кВ): $I_n = 22,3 \text{ кА}$;

ток короткого замыкания в конце линии $I_k = 5,6 \text{ кА}$.

Определив функцию зависимости допустимого количества отключений от тока выключателя У-110-40/2000 методом, описанным выше, получим выражение:

Подставляя значения в выражения выше, получим, что допустимое

ПРИМЕРНАЯ ФОРМА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА РАСХОДА КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Паспортные данные

Подстанция: Арзамасская | Диспетчерское наименование выключателя: В-1-500 Осиновка

Тип выключателя: ЗАР2- F1 550 | Дата капитального ремонта: не проводился

Номинальное напряжение, кВ: 500 | Наличие приборов ОМП: есть

Номинальный ток, А: 2000 | Предельный коммутационный ресурс: 0,936

Номинальный ток отключения, кА: 40 | Допустимое количество отключений: 421

Вводимые данные

Дата события: 28.10.2022

Вид короткого замыкания: однофазное

Вид коммутации: отключение

Токи КЗ по фазам, кА: Ia=5,75, Ib=0, Ic=0

Расчетные данные

	фаза А	фаза В	фаза С
Расход коммутационного ресурса на отключение	0,56	0	0
Количество коммутаций токов КЗ при отключении	1	0	0
Общий расход коммутационного ресурса	0,94	0	0
Общее количество отключений токов КЗ	2	0	0

Рис. 4

количество отключений полюса выключателя типа У-110-40/2000, установленного на ВЛ 110 кВ Кудьма — Пропилен составляет 30.

Трудность использования данного метода заключается в отсутствии данных о токах КЗ в конце линии, особенно на ВЛ и КЛ классов напряжения 35 и 10 кВ.

При отсутствии данных о конкретном месте КЗ на линии, следует считать, что КЗ произошло вблизи подстанции, а ток КЗ принимается равным току КЗ на шинах подстанции.

Описанные выше методы позволяют применять программные способы расчетов как самих функций, так и расхода коммутационного ресурса выключателей.

Ниже представлена примерная форма программы (рис. 4), которая

составлена на основании полученных данных и может применяться для расчета и учета коммутационного ресурса выключателей. Программа позволяет произвести оценку допустимого количества отключений выключателя при отсутствии возможности регистрации токов КЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

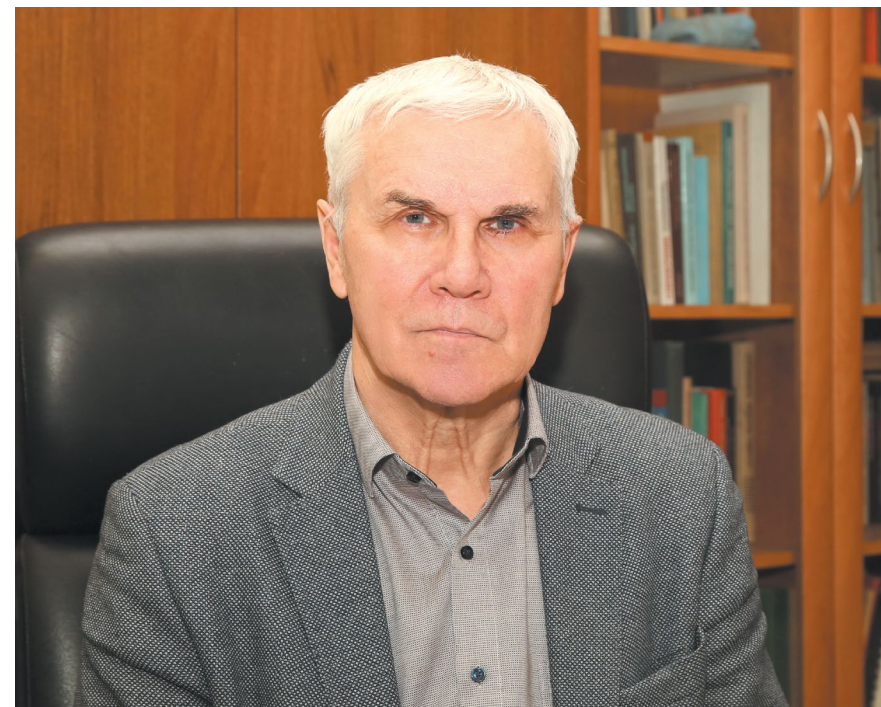
Выполнены определения функции зависимости допустимого количества отключений от тока для выключателей типа ВВБ-220-2000/31,5, типа ВГТ-110 производства ЗЭТО и типа ЗАР1-FG 245 производства Siemens в виде степенной функции. Аналогичным способом можно определить функции зависимости допустимого количества отключений от тока для любого выключа-

теля. Данные функции позволяют использовать их при оценке коммутационного ресурса выключателей с применением ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия.
2. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.
3. Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации (утв. Научно-исследовательским центром по испытанию высоковольтной аппаратуры 23.09.1991).
4. Распоряжение ПАО «ФСК ЕЭС» от 30.06.2014 № 334 р «О пересмотре Инструкции по определению коммутационного ресурса высоковольтных выключателей».

СТАНИСЛАВ ИВАНОВИЧ ГУСЕВ



деятельности Станислава Ивановича был посвящен электроэнергетике, где он успешно применял свои фундаментальные знания и творческие способности для обеспечения надежности работы магистрального сетевого комплекса ПАО «ФСК ЕЭС». В качестве заместителя генерального директора ВЭИ с 2010 г. Станислав Иванович работал над проектами по созданию активных фильтров, ограничителей токов короткого замыкания, сверхпроводящих трансформаторов. При его непосредственном участии возродилась и обновилась школа создания и испытаний энергетических трансформаторов, был достигнут новый класс напряжений и токов управляемых вакуумных разрядников, сформированы теория и методики активной фильтро-компенсации и симметрирования.

С 2014 г. Станислав Иванович руководит ООО «НПП ЛМ Инвертор», которое действует как научно-исследовательский институт с производственной базой и осуществляет сложные комплексные проекты с разнообразной тематикой для решения задач электроэнергетического комплекса.

Станислав Иванович не только эффективный руководитель и ученый, но и человек с выдающимися личностными качествами. В первую очередь это безусловная постоянная и безоговорочная нацеленность на общественное благо, сочетающаяся с благожелательностью ко всем сотрудникам; способность распознать и оценить достижения коллег, а затем с заинтересованностью и энергией содействовать осуществлению задуманного. Желаем Станиславу Ивановичу здоровья, бодрости духа и продолжения плодотворной деятельности на благо семьи, сотрудников, Родины и Человечества.

Друзья, коллеги и редакция журнала.

В декабре 2022 г. исполнилось 75 лет видному деятелю отечественной электрофизики и электроэнергетики, кандидату технических наук, автору 70 публикаций, включая две монографии, авторских свидетельств и патентов, генеральному директору Научно-производственного предприятия «ЛМ Инвертор» Станиславу Ивановичу Гусеву.

С успехом окончив МЭИ в 1972 г., С.И. Гусев более 30 лет посвятил силовой электронике. Будучи одним из лидеров творческого коллектива НИЦ Силовой электроники, он обеспечивал системную организацию и аппаратную базу самых разнообразных проектов, среди которых:

- вакуумные электронно-лучевые установки для плавки редкоземельных и тугоплавких металлов;
- мощные исследовательские импульсные сильноточные установки;
- пучково-плазменные усилители СВЧ;
- системы загоризонтной радиолокации с мощными электронно-вакуумными лампами (триоды и тетроды).

В своих проектах Станислав Иванович осуществлял аппаратное обеспечение выполнявшихся исследований, создавал оборудование для действующих установок, он стал специалистом в различных областях электротехники — теории и практики высокочастотных силовых трансформаторов и реакторов, техники высоких напряжений, твердой терморезистивной изоляции, преобразовательной техники. Многочисленные системы питания электронных пушек типа ВИП-30-XXX, разработанные при его непосредственном участии, работают на металлургических заводах в России, Китае, Японии, Казахстане и Эстонии; системы питания типа КВИП-8-150 действуют в России, Китае и Беларуси. Большой период профессиональной