

## УЧРЕДИТЕЛИ

МИНЭНЕРГО РОССИИ,  
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ  
КОМПАНИЯ ЕЭС,  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ  
"КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК",  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИРМА  
"ЭНЕРГОПРОГРЕСС",  
НП "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС"

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **Ольховский Г.Г.**,  
доктор техн. наук, чл.-кор. РАН  
Зам. главного редактора **Антипов К.М.**,  
канд. техн. наук  
**Бондаренко А.Ф.**, Волков Э.П., академик РАН,  
Воротницкий В.Э., доктор техн. наук,  
Денисов В.И., доктор эконом. наук,  
Долматов И.А., канд. эконом. наук,  
Зорченко Н.В., канд. техн. наук, Касьянов Л.Н.,  
Корниенко А.Г., Кошечев Л.А., доктор техн. наук,  
Лейзерович А.Ш., доктор техн. наук (США),  
Львов М.Ю., доктор техн. наук,  
Любарский Д.Р., доктор техн. наук,  
Ляшенко В.С., Мисриханов М.Ш., доктор техн.  
наук, Нецаев В.В., канд. техн. наук,  
Новак В., доктор техн. наук (Польша),  
Орфеев В.М., Охотин В.Н., Пикин М.А., канд.  
техн. наук, Решетов В.И., канд. техн. наук,  
Савваитов Д.С., канд. техн. наук,  
Седлов А.С., доктор техн. наук,  
Сокур П.В., канд. техн. наук,  
Соловьёва Т.И., Тулов В.Б., доктор техн. наук,  
Широкова М.И., Шульгинов Н.Г., канд. техн. наук

## РЕДАКЦИЯ

Зам. главного редактора  
Соловьёва Т.И.  
Ответственный секретарь  
Широкова М.И.  
Научный редактор  
Попова О.А.  
Секретарь редакции  
Басина С.А.  
Компьютерный набор  
Коновалова О.Ф.

## АДРЕС РЕДАКЦИИ

115280, Москва,  
3-й Автозаводский проезд, 4, корп. 1

## ТЕЛЕФОНЫ

Редакция  
(495) 234-7417, 234-7419  
Главный редактор  
(495) 234-7617  
Факс  
(495) 234-7417  
Internet  
www.elst.energy-journals.ru  
E-mail  
для переписки: el-stantsii@rambler.ru  
для статей: el.stantsii@gmail.com

Редакция не несёт ответственности за  
достоверность информации, опубликованной  
в рекламных объявлениях.  
При перепечатке ссылка на журнал  
«Электрические станции» обязательна.

Сдано в набор 22.06.2015  
Подписано в печать 16.07.2015  
Формат 60×84 1/8  
Бумага Galerie Art Silk. Печать офсетная  
Печ. л. 7. Тираж 1800. Цена свободная

Оригинал-макет  
выполнен в издательстве «Фолиум»  
127411, Москва, Дмитровское ш., 157  
Тел/факс: (499) 258-0828  
Internet: www.folium.ru  
E-mail: prepress@folium.ru

Отпечатано  
в типографии издательства «Фолиум»

© НТФ «Энергопрогресс»,  
«Электрические станции», 2015



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2015 7

Издаётся  
с января 1930 г.  
1008-й выпуск  
с начала издания

## Содержание

### К 85-летию МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

- Трофимов А. В., Поляков А. М., Абдухалилов Г. А., Горбунов Р. А.** Формирование алгоритмов оперативной блокировки по информационным моделям однолинейных схем электроустановок . . . . . 2
- Волков М. С., Гусев Ю. П., Монаков Ю. В., Чо Г. Ч.** Влияние токоограничивающих реакторов на процесс отключения коротких замыканий в высоковольтных электроустановках . . . . . 6
- Самогин Ю. Н., Серков С. А., Чирков В. П.** Оценка порога устойчивости ротора на подшипниках скольжения с источником аэродинамических возмущающих сил на основе метода квазидиагонализации . . . . . 9
- Крутиков К. К., Рожков В. В., Бутримов С. Г., Перфильев Е. А., Спиридонов А. В., Макаренков С. В.** Проблемы внедрения передвижных дизель-генераторных установок на атомных электростанциях . . . . . 15
- Очков В. Ф., Орлов К. А., Очков А. В., Ильина И. П.** Теплотехнические расчёты с «облачными» функциями по свойствам воды и водяного пара . . . . . 21

### ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

- Сидоркин В. Т., Тугов А. Н., Мошников А. Н., Верещетин В. А., Берсенов К. Г.** Влияние рециркуляции дымовых газов на работу котла и его экологические показатели . . . . . 27
- Зверков В. В.** Организации блочных пунктов управления в новых проектах АЭС . . . . . 32
- Иофьев И. М., Крикунчик А. Б., Юкин Д. А.** Проектирование щитов управления крупных электростанций (репринт статьи из журнала «Электрические станции», 1932, № 4) . . . . . 36

### ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

- Куликов А. Л., Лачугин В. Ф., Ананьев В. В., Вуколов В. Ю., Платонов П. С.** Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения . . . . . 45
- Кушербаев Ж. Е., Аксенов П. В., Кушербаев Д. Ж., Есенбаев Е. Б.** Техническое и финансовое состояние регионального энергетического комплекса Кызылординской области Республики Казахстан . . . . . 53

### ХРОНИКА

- Новости** электротехнических и электроэнергетических компаний . . . . . 62
- Петров С. Я.** (Некролог) . . . . . 69
- Редько И. Я.** (К 65-летию со дня рождения) . . . . . 70
- Content, Abstracts, Keywords** . . . . . 71
- Правила** оформления рукописи статьи . . . . . 73

# Влияние токоограничивающих реакторов на процесс отключения коротких замыканий в высоковольтных электроустановках

- **Волков М. С.**, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Москва
- **Гусев Ю. П.**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Москва
- **Монаков Ю. В.**, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Москва
- **Чо Г. Ч.**, канд. техн. наук, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Москва

Установка токоограничивающих реакторов в электроустановках напряжением 110 и 220 кВ вызывает изменение параметров переходных восстанавливающихся напряжений (ПВН) на контактах выключателей при отключении коротких замыканий, что может стать причиной увеличения продолжительности короткого замыкания, повреждения электротехнического оборудования и возникновения ущерба в электроэнергетической системе. Представлены результаты математического моделирования переходных процессов, вызванных отключением короткого замыкания в реактированной линии электропередачи, и приведены данные о негативном влиянии токоограничивающего реактора на скорость нарастания и пиковое значение ПВН. Предложены и проанализированы способы обеспечения нормативных требований к параметрам ПВН при использовании токоограничивающих реакторов в высоковольтных электроустановках электростанций и подстанций.

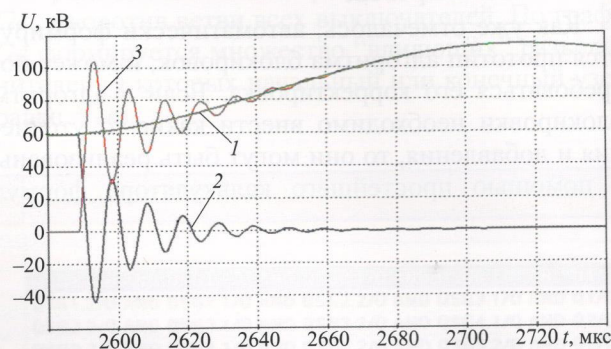
**Ключевые слова:** высоковольтные электроустановки, короткое замыкание, переходное восстанавливающееся напряжение, ограничение токов короткого замыкания, токоограничивающий реактор.

Рост уровней токов короткого замыкания (ТКЗ), обусловленный ростом генерирующих мощностей объектов традиционной энергетики, характерен для развивающихся энергосистем. Проблема координации ТКЗ существует и в высоковольтных сетях Москвы и Санкт-Петербурга. Ограничение ТКЗ путём стационарного деления сети, активно применяющееся в Московском регионе, исчерпало свои технические возможности. Применение для ограничения ТКЗ вставок постоянного тока, токоограничивающих устройств на сверхпроводниках требует значительных инвестиций, проведения опытно-промышленной эксплуатации и не может рассматриваться в краткосрочной перспективе. На этом фоне использование высоковольтных токоограничивающих реакторов (ТОР) представляется эффективным и относительно недорогим способом ограничения уровней ТКЗ.

В статье рассмотрено влияние ТОР на параметры переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) при отключении короткого замыкания (КЗ) на воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ, подключённой к сборным шинам подстанции 110 кВ через выключатель и ТОР. При расчёте восстанавливающихся напряжений использован ряд общепринятых допущений [1–4].

<sup>1</sup> Гусев Юрий Павлович: GusevYP@mpei.ru

В момент начала расхождения дугогасящих контактов выключателя напряжение на них определяется напряжением промышленной частоты. После погасания дуги с обеих сторон от выключателя возникают свободные колебания напряжения относительно земли (рис. 1). Частоты свободных колебаний зависят от соотношения ёмкостей фаз на землю и их индуктивностей. Наличие подключённых к сборным шинам трансформаторов, кабельных линий, трансформаторов тока и напряжения и другого оборудования обуславливает ко-



**Рис. 1.** Изменение напряжений на контактах выключателя при отключении короткого замыкания:

1 — напряжение на контакте со стороны источника электроэнергии; 2 — то же со стороны короткого замыкания; 3 — переходное восстанавливающееся напряжение

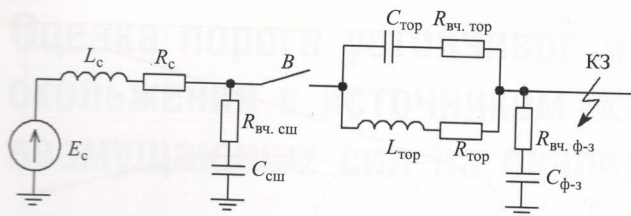


Рис. 2. Схема замещения

лебательный процесс восстановления напряжения на контакте выключателя со стороны подстанции с частотой порядка нескольких кГц.

Восстановление напряжения на контакте выключателя со стороны ТОР формируется в процессе колебательного разряда ёмкостей в резонансном контуре ТОР, частота переходного процесса определяется собственной резонансной частотой реактора и может достигать 50 – 100 кГц. Амплитуды свободных колебаний будут пропорциональны силе отключаемого тока.

Переходное восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя, в соответствии с [5, 6], описывается пиковым значением и скоростью нарастания напряжения. Пиковое значение напряжения в процессе отключения КЗ будет зависеть от амплитуды свободных составляющих, а скорость нарастания напряжения – от частоты свободных колебаний, т.е. от параметров цепи с реактором. Таким образом, возникают предпосылки к ограничению области применения реакторов в сетях высокого напряжения по условию допустимых значений ПВН.

Представляется актуальной количественная оценка области применения реакторов в электрических сетях напряжением 110 и 220 кВ. Для решения поставленной задачи было проведено исследование ПВН при отключении реактированных линий электропередачи в специализированном программном комплексе EMTP-RV. Расчётная схема замещения, представленная на рис. 2, включает в себя  $E_c$  – ЭДС,  $R_c$ ,  $L_c$  – эквивалентные активное сопротивление и индуктивность сетевого источника;  $R_{вч.сш}$  – активное сопротивление, отражающее высокочастотные потери в элементах примыкающего участка сети и в трансформаторах подстанции;  $C_{сш}$  – ёмкость на землю оборудования, присоединённого к сборным шинам ПС;  $L_{тор}$ ,  $R_{тор}$ ,  $C_{тор}$  – индуктивность, активное сопротивление и ёмкость между фазными выводами реактора;  $R_{вч.тор}$  – сопротивление, обусловленное высокочастотными потерями в резонансном контуре между выводами реактора;  $C_{ф-з}$  – ёмкость фаза – земля реактора;  $R_{вч.ф-з}$  – сопротивление, соответствующее высокочастотным потерям в резонансном контуре между землёй и реактором. Параметры элементов, характеризующих высокочастотные потери оборудования, определены согласно [7].

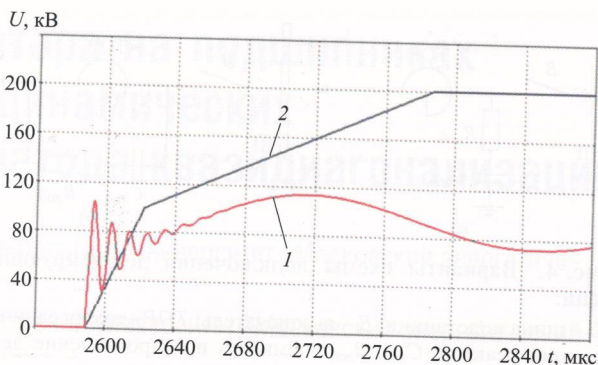


Рис. 3. Расчётная (1) и нормированная (2) характеристики переходного восстанавливающегося напряжения

В расчётной схеме замещения отсутствует отключаемая линия, что соответствует случаю возникновения короткого замыкания в начале линии, наибольшему отключаемому току и наибольшей скорости и амплитуде свободных колебаний восстанавливающегося напряжения. Исключение ёмкости на землю повреждённой линии из схемы замещения приводит к увеличению частоты свободных колебаний напряжения со стороны КЗ и скорости восстановления напряжения.

Оценка допустимости установки реактора в линии электропередачи напряжением 110 и 220 кВ производилась путём сопоставления расчётных кривых ПВН при отключении реактированной линии и нормативной характеристики ПВН в соответствии с [5, 6, 8]. На рис. 3 приведено сопоставление кривых напряжения при отключении тока 50 кА в присоединении линии с реактором 2 Ом. Значение собственной резонансной частоты реактора составляет 100 кГц.

После расхождения дугогасительных контактов фазы выключателя напряжение между его контактами (кривая 1 на рис. 3) имеет принуждённую составляющую 50 Гц от внешнего источника, свободную аperiodическую составляющую и свободную высокочастотную составляющую, обусловленную наличием реактора в отключаемом присоединении. Амплитуда и частота свободных колебаний напряжения на контакте со стороны сборных шин небольшие и не оказывают существенного влияния на ПВН. Из рисунка видно, что свободная составляющая напряжения в кривой 1 приводит к увеличению скорости восстановления напряжения до 28 кВ/мкс и выходу расчётной кривой в область недопустимых значений напряжения. Скорость нарастания напряжения в 10 раз превышает нормированную. На практике это приведёт к тепловому пробую межконтактного промежутка, сопровождающемуся повторными загораниями дуги. Результатом этого процесса может стать физическое разрушение выключателя [2].

В процессе исследования были проведены расчёты ПВН на контактах выключателей напряжением 110 и 220 кВ, выпущенных в соответствии

