

УДК 621.311

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-28-32

Расчет переходных восстанавливающихся напряжений при выборе выключателей для электроустановок напряжением 110 кВ и выше

Ю.П. Гусев, К. Насыр уулу, Дж.Б. Рахимов, К.А. Скурихина

При отключении коротких замыканий между контактами выключателя возникает переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН), способное инициировать повторное загорание электрической дуги. Для современных выключателей, в том числе элегазовых и вакуумных, предельно допустимые значения скорости нарастания и пикового значения ПВН приведены в ГОСТ Р 52565—2006. Более ранние стандарты содержали требования только к воздушным и масляным выключателям. Пренебрежение учетом ПВН при выборе выключателей для современных электроустановок приводит к авариям с тяжелыми последствиями.

Проведено расчетно-теоретическое сопоставление нормативных документов, распространяющихся на выключатели 110 кВ и выше, даны рекомендации по расчету параметров ПВН, на которые можно ориентироваться при проверке отключающей способности высоковольтных выключателей. Рассмотрены и сопоставлены методы расчета параметров ПВН с экспоненциальной, одночастотной и пилообразной формами кривой. Приведены примеры расчетов переходных процессов с разными формами кривой ПВН.

Применительно к элегазовым и вакуумным выключателям отмечена необходимость расчета ПВН с пилообразной формой кривой. Для уточнения расчетных условий, при которых могут возникать максимальные скорости нарастания и пиковые значения ПВН, рекомендовано продолжить исследования. Следует определить критическую удаленность короткого замыкания со стороны линии, обусловленную комплексным действием на ПВН параметров линий и значений токов короткого замыкания.

Ключевые слова: переходные восстанавливающиеся напряжения, экспоненциальная, одночастотная и пилообразная формы кривой напряжения, отключающая способность выключателей, отключение короткого замыкания.

Для цитирования: Гусев Ю.П., Насыр уулу К., Рахимов Дж.Б., Скурихина К.А. Расчет переходных восстанавливающихся напряжений при выборе выключателей для электроустановок напряжением 110 кВ и выше // Вестник МЭИ. 2017. № 3. С. 28—32. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-28-32.

Calculating the Transient Recovery Voltages in Selecting Circuit Breakers for Electrical Installations with Rated Voltages of 110 kV and Higher

Yu.P. Gusev, K. Nasyr uulu, J.B. Rahimov, K.A. Skurikhina

In clearing short-circuit faults, a transient recovery voltage (TRV) arises between the circuit breaker contacts, which may initiate repeated ignition of electric arc. For modern circuit breakers, including SF₆ and vacuum ones, the maximum permissible TRV peak and rate of rise values are given in the GOST(State Standard) R 52565-2006. Earlier editions of the relevant standards contained the requirements only for air blast and oil circuit breakers. The use of modern electrical installations with circuit breakers selected without paying proper attention to TRV may lead to accidents with severe consequences.

The article presents a theoretical and calculated comparison of the regulatory documents applicable to circuit breakers for rated voltages of 110 kV and higher and contains recommendations on calculating the TRV parameters that can be used as reference ones in checking the breaking capacity of high-voltage circuit breakers. Methods for calculating the parameters of TRVs with exponential, single-frequency and sawtooth waveforms are considered and compared with one another. Examples of calculating transients involving different TRV waveforms are given.

The necessity of calculating TRV with a sawtooth waveform for SF₆ and vacuum circuit breakers is pointed out. For updating the design conditions under which the maximum TRV rate of rise and peak values may occur, it is recommended to continue the study. In particular, it is advisable to determine the critical remoteness of a short circuit fault on the line side determined by the combined effect of power line parameters and short-circuit current values on the TRV.

Key words: transient recovery voltages, exponential, single-frequency and sawtooth voltage waveforms, circuit breaker's breaking capacity, short-circuit fault clearing.

For citation: Gusev Yu.P., Nasyr uulu K., Rakhimov J.B., Skurikhina K.A. Calculating the Transient Recovery Voltages in Selecting Circuit Breakers for Electrical Installations with Rated Voltages of 110 kV and Higher. MPEI Vestnik. 2017; 3:28—32. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-28-32.

Успешность отключения коротких замыканий (КЗ) определяется не только соответствием периодической и аperiodической составляющих отключаемого тока предельно допустимым значениям, но и соответствием параметров переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) между контактами выключателя электрической прочности межконтактного промежутка и скорости ее восстановления [1]. Переходное восстанавливающееся напряжение — это напряжение, появляющееся между контактами полюсов выключателя после погасания электрической дуги. Оно зависит от тока КЗ, а также от схемы и параметров сети, места КЗ. Переходное восстанавливающееся напряжение определяет требования к выключателю и успешность отключения им тока КЗ [2].

Проверка отключающей способности выключателей по ПВН при проектировании электростанций и подстанций до настоящего времени осуществлялась по одному из трех известных методов [3, 4]. В связи с ростом уровней токов КЗ и появлением в электрических сетях элегазовых и вакуумных выключателей, а также благодаря увеличению быстродействия выключателей [5], выбор метода расчета ПВН для проверки отключающей способности выключателей нуждается в дополнительном рассмотрении и обосновании. Пренебрежение учетом ПВН при выборе выключателей для современных электроустановок может приводить к авариям с тяжелыми последствиями.

Проведено сопоставление известных расчетно-теоретических методов определения пиковых значений и максимальных скоростей нарастания ПВН по параметрам основных элементов коммутируемой цепи. Целью исследования является разработка рекомендаций по расчету ПВН при выборе выключателей для распределительных устройств напряжением 110 кВ и выше электростанций и подстанций.

Действующие требования к характеристикам ПВН современных выключателей, в том числе элегазовых и вакуумных, приведены в [6]. Более ранние стандарты, например [7], содержали требования только к воздушным и масляным выключателям.

Отличие стандартов [6, 7] состоит в том, что нормированные характеристики ПВН для отключения токов КЗ $I_{кз}$, кроме 30, 60 и 100 %, еще приводятся для 10 % от номинального тока отключения выключателей $I_{о.ном}$. Кроме этого, в [6] для каждого из вышеуказанных процентных соотношений $I_{кз}/I_{о.ном}$ независимо от значений $I_{о.ном}$ задается одна нормированная характеристика ПВН, а в [7] для каждого соотношения $I_{кз}/I_{о.ном}$ и в зависимости от значений $I_{о.ном}$ нормированные характеристики ПВН задаются отдельно. Поэтому при проверке высоковольтных выключателей по отключающей способности по ПВН следует использовать именно тот стандарт, в соответствии с которым был изготовлен рассматриваемый выключатель. При выборе стандарта ориентироваться можно на дату производства выключателя.

Для проверки отключающей способности выключателей следует использовать один из трех известных ме-

тодов, обеспечивающих получение расчетных параметров ПВН: экспоненциальной кривой, одночастотной кривой для напряжения между контактами выключателя и землей со стороны источника тока КЗ либо пилообразной кривой ПВН со стороны КЗ. Выбор метода расчета скорости нарастания и пикового значения ПВН осуществляется в зависимости от места КЗ, а также от соотношения эквивалентного волнового сопротивления линии $Z_{эк}$ и критического сопротивления сети $Z_{к*}$.

Метод, основанный на экспоненциальной форме кривой ПВН (рис. 1, 2) применяется при эквивалентном волновом сопротивлении n линий, параллельно подключенных к сборным шинам подстанции, который меньше критического сопротивления

$$Z_{эк} = \alpha Z_1/n,$$

где Z_1 — волновое сопротивление линии прямой последовательности [3]; α — коэффициент, равный 1,5 в случае трехфазного КЗ [3],

$$Z_{к*} = 0,5\sqrt{L_{эк}/C_{эк}},$$

где $L_{эк}$, $C_{эк}$ — эквивалентные индуктивность и емкость сетевого источника [4].

При малых значениях емкости $C_{эк}$ выражение для расчета ПВН можно представить в виде, соответствующем названию формы кривой ПВН:

$$U_{в}(t) = E_1 \left(1 - e^{-\frac{Z_{эк}t}{nL_{эк}}} \right),$$

где E_1 — возвращающееся напряжение, определяется согласно [8],

$$E_1 = 1,5\sqrt{2}I^{(3)}\omega L,$$

где $I^{(3)}$ — трехфазный ток КЗ, кА; $\omega = 2\pi f$ при частоте 50 Гц, $\omega = 314$ рад/с.

Метод, основанный на одночастотной форме кривой ПВН (рис. 3), необходим при эквивалентном волновом сопротивлении больше критического сопротивления [4].

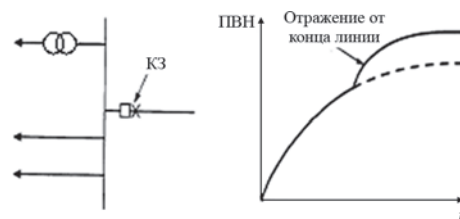


Рис. 1. Экспоненциальная форма кривой ПВН

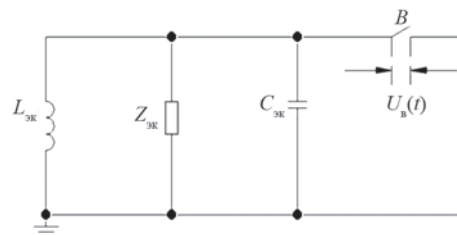


Рис. 2. Схема замещения сети

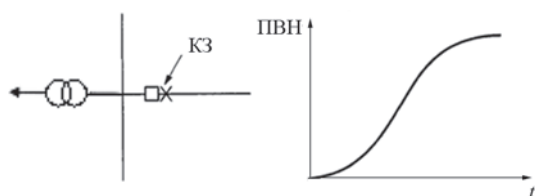


Рис. 3. Одночастотная форма кривой ПВН

Выражение для расчета ПВН с одночастотной формой кривой имеет следующий вид:

$$U_B(t) = E_1(1 - \cos\omega_0 t),$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{эк}} C_{\text{эк}}}}$ — собственная угловая частота.

Метод, основанный на пилообразной форме кривой ПВН (рис. 4), используется при КЗ на линии. Поскольку кабели и воздушные линии имеют распределенные параметры, напряжение на контактах выключателя со стороны линии имеет пилообразную форму. Скорость нарастания ПВН со стороны линии на начальной стадии переходного процесса значительно больше, чем со стороны источника. Эта особенность характерна для сетей с номинальным напряжением 110 кВ и выше и должна учитываться при выборе выключателей.

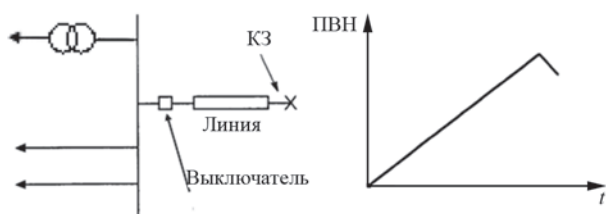


Рис. 4. Пилообразная форма кривой ПВН

Пиковое значение восстанавливающегося напряжения со стороны линии определяется следующим выражением [9]:

$$U_{\text{л}} = dU_0 = dX_{\text{л}} \lambda I_{\text{л}} \sqrt{2},$$

где d — коэффициент пика, принимается равным 1,6 [9]; $X_{\text{л}}$ — индуктивное сопротивление со стороны линии, Ом; λ — расстояние от выключателя до места КЗ, км; $I_{\text{л}}$ — ток КЗ со стороны линии, кА.

Количественный анализ рассмотренных методов расчета скорости и пиковых значений ПВН выполнен на примере схемы, представленной на рис. 5. В качестве расчетного вида КЗ принято трехфазное КЗ.

Емкостные параметры схем замещения были определены с учетом того, что к сборным шинам подстанции присоединены 7 элегазовых выключателей, 10 разъединителей, 16 трансформаторов тока, 2 трансформатора напряжения. Длина шин — 100 м. Эквивалентное волновое сопротивление определено с учетом присоединения к шинам подстанции четырех воздушных линий.

При расчете ПВН, имеющего пилообразную форму кривой, расстояние от выключателя до места КЗ при-

нято равным 1 км. Дополнительная индуктивность линии — $L_{\text{л}} = 2,12$ мГн.

Индуктивность системы L_c установлена исходя из значения тока короткого замыкания на шинах ПС при номинальном напряжении шин $U_c = 110$ кВ и действующем значении тока трехфазного короткого замыкания $I_{\text{кз}}^{(3)} = 24$ кА:

$$L_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} I_{\text{кз}}^{(3)} \omega} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 24 \cdot 314} = 8,43.$$

Входные емкости аппаратов для расчетов высокочастотных перенапряжений выбираются согласно [10]:

$$C_c = C_{\text{ш}} + 2C_{\text{СТ}} + 2C_{\text{ТН}} + 14C_{\text{ТТ}} + 9C_{\text{Р}} + 6C_{\text{В}} = \\ = 1 \cdot 10^{-9} + 2 \cdot 1,99 \cdot 10^{-9} + 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-9} + 14 \cdot 0,3 \cdot 10^{-9} + \\ + 9 \cdot 0,1 \cdot 10^{-9} + 6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-9} = 11,08 \text{ нФ}.$$

На рис. 6 приведены расчетные и нормированные кривые ПВН для $I_{\text{кз}}$ соответствующих 60 % $I_{\text{н.ном}}$.

Из рис. 6 следует, что при КЗ на выводах выключателя ПВН с экспоненциальной кривой не превышает нормируемых значений. Расчетное ПВН с одночастотной кривой превышает нормируемые значения. Однако в рассматриваемой схеме рис. 6 применение одночастотной формы кривой ПВН при проверке выключателей по отключающей способности неуместно согласно критерию $Z_{\text{эк}} < Z_{\text{к}}$. Поэтому в данном случае при проверке выключателей по отключающей способности по ПВН при КЗ на выводах выключателя необходимо использовать экспоненциальную кривую ПВН.

Также из рис. 6 видно, что расчетные ПВН с пилообразными кривыми в начальный момент времени превышают нормируемые значения.

Расчетные и нормируемые параметры ПВН: скорость нарастания S и пиковое значение U_c приведены в таблице. Расчетные пиковые значения ПВН определены как максимальное напряжение на контактах выключателя, скорость нарастания ПВН — как тангенс угла наклона касательной, проведенной из начала координат к кривой восстанавливающегося напряжения [11].

Таким образом, проверку отключающей способности элегазовых и вакуумных выключателей следует проводить на основе сравнения нормированных значений ПВН с расчетными параметрами, учитывающими наличие пилообразной кривой напряжения со стороны КЗ.

Расчетные и нормируемые параметры ПВН

Форма кривой ПВН	Расчетные параметры ПВН		Нормируемые параметры ПВН по [6]	
	S , кВ/мкс	U_c , кВ	S , кВ/мкс	U_c , кВ
Экспоненциальная	2,64	134,4	3	200
Одночастотная	10,09	269,4		
Экспоненциальная с пилообразной	5,29	89,6		
Одночастотная с пилообразной	6,5	160,4		

Примечание: S — скорость нарастания ПВН (U_c/t_c), кВ/мкс; U_c — пиковое значение ПВН, кВ

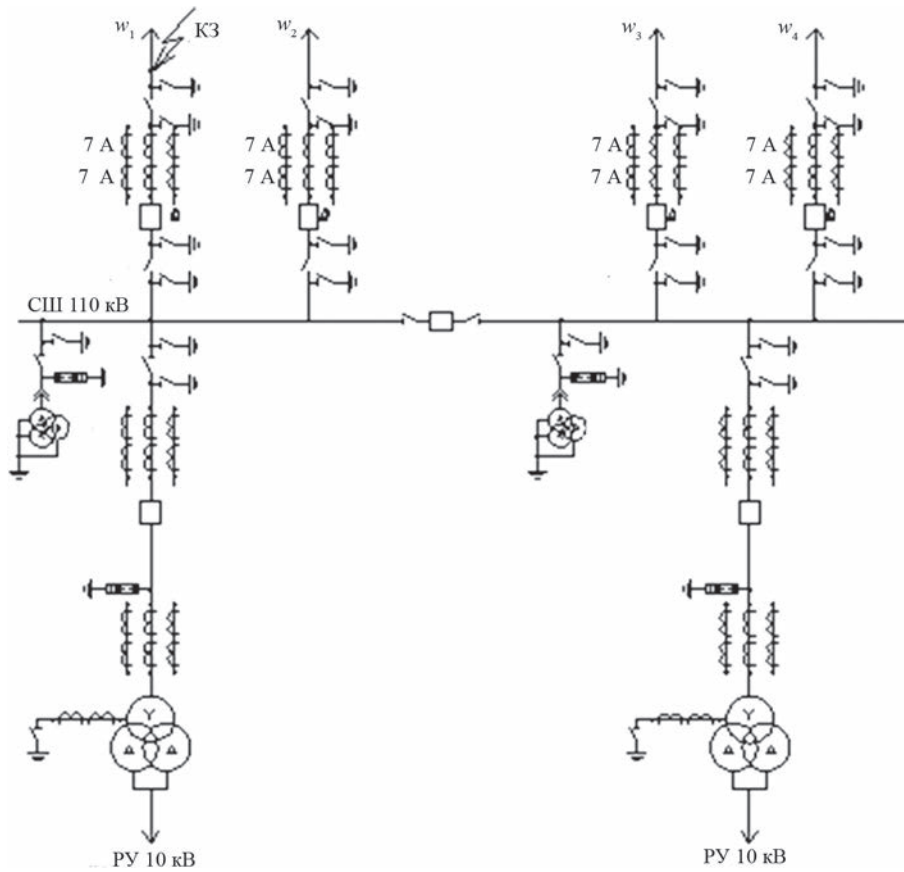


Рис. 5. Однолинейная схема подстанции 110/10 кВ

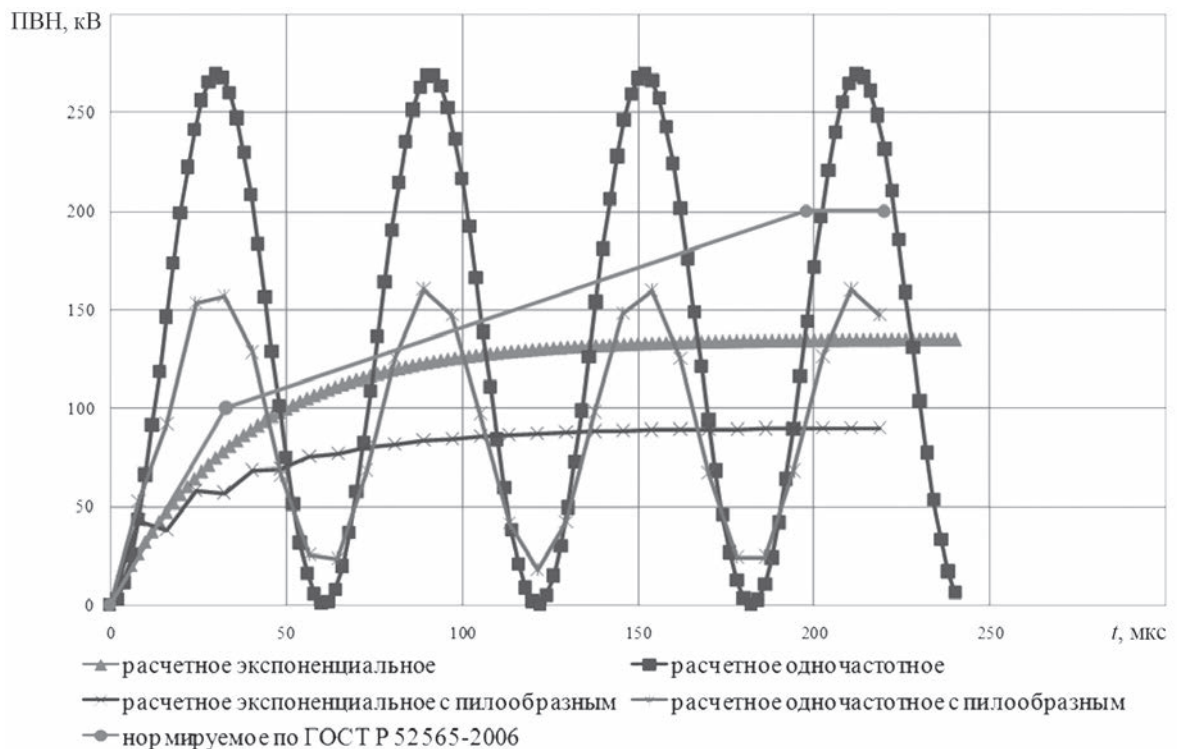


Рис. 6. Расчетные кривые и нормированные параметры ПВН

Исследования ПВН должны быть продолжены для уточнения расчетных условий, при которых возникают максимальные пиковые значения и скорости восстанавливающихся напряжений.

Литература

1. **Челазнов А.А.** Статические основы эксплуатационной надежности выключателей в режиме отключения токов короткого замыкания: автореф. дис... докт. техн. наук. Новосибирск: НГТУ, 2000.

2. **Акодис М.М., Корзун П.А.** Определение восстанавливающихся напряжений на контактах выключателя. М.: Энергия, 1968.

3. **Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф., Околович М.Н.** Электрическая часть станций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1990.

4. **Denis D.** Transient Recovery Voltages (TRVs) for High-Voltage Circuit Breakers Pt. 1. Chair CIGRE WG A3.28 & IEEE WG C37.011. San Antonio (USA), 2013.

5. **Гусев Ю.П., Омокеева А.А.** Исследование электромагнитных переходных процессов в цепях генераторного напряжения малых ГЭС // Наука и образование. 2012. № 12. С. 557—570.

6. **ГОСТ Р 52565—2006.** Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.

7. **ГОСТ 687—78.** Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия.

8. **Ruben D. Garzon.** High Voltage Circuit Breakers. N.-Y.: Marcel Dekker, 2002.

9. **IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers.** N.-Y. (USA), 2011.

10. **Методические указания** по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. М.: СПО ОРГРЭС, 1998.

11. **Волков М.С., Гусев Ю.П.** Оценка влияния характеристик токоограничивающего реактора на переходные восстанавливающиеся напряжения на контактах выключателя при отключении токов короткого замыкания // Наука и образование. 2013. № 7. С. 329—334.

References

1. **Chelaznov A.A.** Sticheskie Osnovy Ekspluatatsionnoy Nadezhnosti Vyklyuchateley v Rezhime Otklyucheniya Tokov Korotkogo Zamykaniya: Avtoref. Dis... Dokt. Tekhn. Nauk. Novosibirsk: NGTU, 2000. (in Russian).

2. **Akodis M.M., Korzun P.A.** Opredelenie Vosstanavlivayushchikhsya Napryazheniy na kontaktakh vyklyuchatelya. M.: Energiya, 1968. (in Russian).

3. **Vasil'ev A.A., Kryuchkov I.P., Nayashkova E.F., Okolovich M.N.** Elektricheskaya Chast' Stantsiy i Podstantsiy. M.: Energoatomizdat, 1990. (in Russian).

4. **Denis D.** Transient Recovery Voltages (TRVs) for High-Voltage Circuit Breakers Pt. 1. Chair CIGRE WG A3.28 & IEEE WG C37.011. San Antonio (USA), 2013.

5. **Gusev Yu.P., Omokeeva A.A.** Issledovanie Elektromagnitnykh Perekhodnykh Protseessov v Tsepyakh Generatornogo Napryazheniya Malyykh GES. Nauka i Obrazovanie. 2012;12:57—570. (in Russian).

6. **GOST R 52565—2006.** Vyklyuchately Peremennogo Toka na Napryazhenie ot 3 do 750 kV. Obshchie Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).

7. **GOST 687—78.** Vyklyuchately Peremennogo Toka Na Napryazhenie Svyshye 1000 V. Obshchie Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).

8. **Ruben D. Garzon.** High Voltage Circuit Breakers. N.-Y.: Marcel Dekker, 2002.

9. **IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers.** N.-Y. (USA), 2011.

10. **Metodicheskie Ukazaniya** po Ogranicheniyu Vysokochastotnykh Kommutatsionnykh Perenapryazheniy i Zashchite ot Nih Elektrotekhnicheskogo Oborudovaniya v Raspredelel'nykh Ustroystvakh 110 kV i Vyshe. M.: Spo Orgres, 1998. (in Russian).

11. **Volkov M.S., Gusev Yu.P.** Otsenka Vliyaniya Kharakteristik Tokoogranichivayushchego Reaktora na Perekhodnye Vosstanavlivayushchiesya Napryazheniya na Kontaktakh Vyklyuchatelya pri Otklyuchenii Tokov Korotkogo Zamykaniya. Nauka i Obrazovanie. 2013;7:329—334. (in Russian).

Сведения об авторах

Гусев Юрий Павлович — кандидат технических наук, зав. кафедрой электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: GusevYP@mpei.ru

Насыр уулу Канат — аспирант кафедры электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: 8707741@mai.ru

Рахимов Джамшед Бобомуродович — аспирант кафедры электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: jam-rahimov@mai.ru

Скурихина Ксения Алексеевна — аспирант кафедры электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: kseniya.skurikhina@ieeee.org

Information about authors

Gusev Yuriy P. — Ph.D. (Techn.), Head of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: GusevYP@mpei.ru

Nasyr uulu K. — Ph.D.-student of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: 8707741@mai.ru

Rakhimov Dzhamshed B. — Ph.D.-student of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: jam-rahimov@mai.ru

Skurikhina Ksenia A. — Ph.D.-student of Electrical Stations Dept., NRU MPEI, e-mail: kseniya.skurikhina@ieeee.org

Статья поступила в редакцию 12.12.2016