

Рис.6. Вид окна формирования срезов.

При нажатии кнопки «Сформировать архив срезов» генерируется база эталонных срезов, которые в дальнейшем зашумляются. Сформированный архив сохраняется как объект или как матрица в формате *.mat для использования в среде MATLAB.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный исследовательский программно-вычислительный комплекс позволяет симитировать приближенное к действительности функционирование ЭЭС. Приближение к реальности достигается использованием типовых или фактических графиков нагрузки при вычислении установившихся режимов. Результаты работы программно-вычислительного комплекса (срезы измерений) могут быть использованы для проверки разрабатываемых методов и алгоритмов задач диспетчерского управления, например, для проверки работоспособности алгоритмов обнаружения несанкционированного проникновения в систему сбора данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
2. A.G. Phadke. Synchronized Phasor Measurements. A Historical Overview // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, 2002, vol. 1, pp. 476-479.
3. Н. А. Мельников. Электрические сети и системы. М.: Энергия, 1969. 456 с.

А.М.Глазунова к.т.н., старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ

Ю.П.Загайнова, А.П. Шубенкина
Энергетический институт ТПУ

Известно, что пропускная способность электрических сетей ограничивается условиями устойчивости. Особенно остро проблема сохранения устойчивости стоит при

вводе новых генерирующих мощностей, а также при резервировании системообразующих линий 220 кВ линиями более высокого класса напряжения.

Данную проблему можно решить, в том числе за счет применения управляемых устройств продольной компенсации (УУПК) и фазоповоротных устройств (ФПУ), которые позволяют в режиме реального времени изменять параметры линии электропередачи (ЛЭП) и, как следствие, их пропускную способность, а также перераспределять потоки мощности между линиями разных классов напряжений.

Предельную передаваемую по ЛЭП активная мощность без учета потерь, можно определить по формуле [1]:

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{\text{л}}} \sin \delta, \quad (1)$$

где U_1 и U_2 – напряжение в начале и в конце линии;

$X_{\text{л}}$ – индуктивное сопротивление линии;

δ – угол между векторами U_1 и U_2 .

Предельная передаваемая мощность может быть увеличена за счет снижения сопротивления линии путем введения в рассечку линии УУПК с емкостным сопротивлением $X_{\text{с}}$.

УУПК широко применяются в странах, где источники энергии удалены от потребителей. В России их планируется применить на ВЛ 220 кВ Ухта – Микунь, ВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС (СШГЭС) – ПС Новокузнецкая [2].

Каждая фаза УУПК состоит из последовательно включенных модулей, представляющих собой параллельное соединение батареи конденсаторов, и встречно включенных тиристоров с токоограничивающими реакторами, искрового разрядника, системы защиты, демпфирующей цепи и байпасного выключателя. Переключение индуктивного на емкостное сопротивление, и наоборот, может быть использовано для управления потоком мощности и для демпфирования колебаний мощности.

Ключевым компонентом устройства является микропроцессорный контроллер, непрерывно отслеживающий текущее состояние электрической сети и оценивающий потребность в подключении или отключении конденсаторных ступеней [3].

Количество параллельных ветвей и последовательно соединенных конденсаторов в каждой из них зависит от параметров используемых конденсаторов. Как показывает практика сооружения УУПК, количество параллельных ветвей в фазе может составлять 10-20 штук на каждую цепь линии, а количество последовательно соединенных конденсаторов – 80-140 штук в зависимости от степени компенсации, передаваемой мощности и длины линии. Общее количество конденсаторов для УУПК двухцепной передачи 500 кВ достигает 8-10 тыс. штук [4].

Конденсаторы следует изолировать от земли и обеспечить междуфазную изоляцию. Оборудование конденсаторной установки монтируется на стальной платформе, опирающейся на колонки изоляторов, и крепится оттяжками гирлянд изоляторов, рассчитанных в соответствии с напряжением системы [3].

Одним из недостатков УУПК является повышение напряжения на выводах конденсаторной батареи, входящей в ее состав, из-за генерации избыточной реактивной мощности конденсаторными батареями УУПК, которая не компенсируется потерями в индуктивном сопротивлении линии, поэтому на выводы конденсаторных батарей обычно включают шунтирующие реакторы (управляемые или неуправляемые).

В настоящее время выдача максимальной мощности СШГЭС ограничена. Установленная мощность станции составляет 6400 МВт, но часть этой мощности оказалась «запертой» в силу сетевых ограничений, связанных с малой пропускной способностью ВЛ СШГЭС – ПС Новокузнецкая и СШГЭС – ПС Означенное.

Основной целью установки УУПК на ВЛ 500 кВ, связывающей СШГЭС и ПС Новокузнецкая, является снятие ограничений на выдачу мощности СШГЭС после ее полного

восстановления. Выбор данной электропередачи обусловлен тем, что именно через линию СШГЭС – ПС Новокузнецкая осуществляется основной межсистемный транзит в Кузбасскую ЭС.

На примере двух линий 500 кВ СШГЭС – ПС Новокузнецкая, выполненных проводом ЗХАС–330/40, покажем, что при введении в рассечку УУПК с определенной степенью компенсации можно повысить её пропускную способность, если в настоящее время передаваемая мощность составляет 1540 МВт.

На рисунке 1 представлена схема включения УУПК в рассечку рассматриваемой линии. Двухцепная схема УУПК состоит из двух одинаковых параллельных цепей, каждая из которых делится на две равные, последовательно соединенные части.

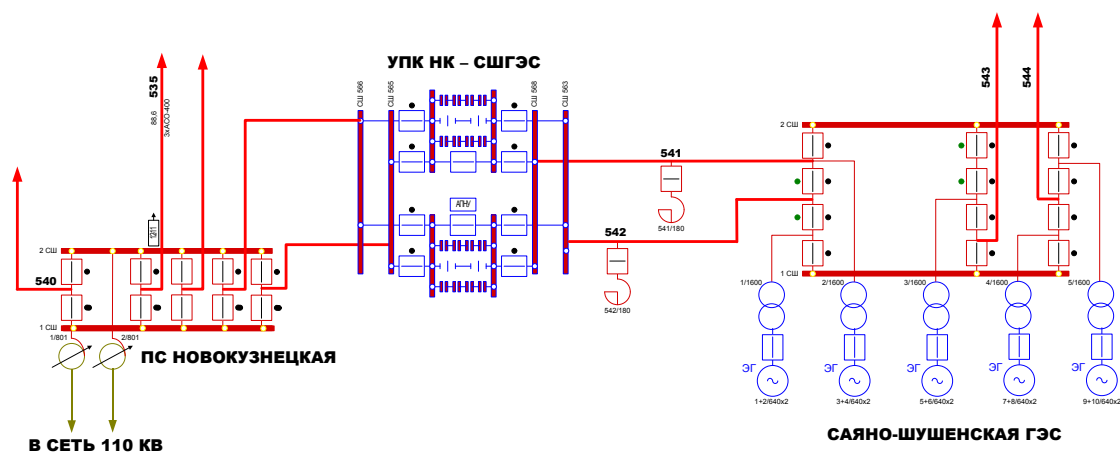


Рис.1. Схема включения УУПК в рассечку электропередачи 500 кВ СШГЭС – ПС Новокузнецкая

Расчет представлен для двух типов конденсаторов: 1) конденсаторного завода «Электроинтер» (Россия: г.Серпухов), с единичными параметрами: $Q_{\text{кном}} = 240$ квар, $U_{\text{ном}} = 2,1$ кВ; 2) компании «General Electric» (США: Фэрфилд, штат Коннектикут) с единичными параметрами: $Q_{\text{кном}} = 422,2$ квар, $U_{\text{ном}} = 8,444$ кВ;

Исходные данные для расчета:

1. Номинальное напряжение электропередачи: $U_{\text{ном}} = 500$ кВ
2. Погонные параметры двухцепной электропередачи: $r_0 = 0,015$ Ом/км, $x_0 = 0,154$ Ом/км, $b_0 = 7,604 \cdot 10^{-6}$ См/км;
3. Длина линии: $l = 450$ км;
4. Степень компенсации: $k_k = 0,3[3]$;
5. Мощность нагрузки на ПС Новокузнецкая: $S_2 = 586,5 + j451,9$ МВА, $\cos\varphi = 0,95$.

Алгоритм расчета:

1. Определим волновое сопротивление линии: $Z_d \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = 146,168$, Ом
2. Вычислим коэффициент фазы: $\alpha_0 = \sqrt{x_0 \cdot b_0} = 1,054 \cdot 10^{-3}$, рад/км
3. Волновая длина электропередачи: $\lambda = \alpha_0 \cdot l = 0,474$
4. Предел пропускной способности некомпенсированной линии: $P_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{Z_d \cdot \sin\lambda} = 3746$, МВт
5. Сопротивление устройства компенсации, необходимое для обеспечения заданной степени компенсации: $x_{\text{комп}} = k_k \cdot x_0 \cdot l = 20,79$, Ом
6. Предельная нагрузка компенсированной линии. Так как УУПК находится в середине электропередачи, то коэффициент четырехполюсника:
 $A1=D1=A2=D2 = \cos \frac{\lambda}{2} = 0,972$;
 $B1=B2 = i \cdot Z_d \sin \frac{\lambda}{2} = i34,326$;

$$C1=C2=i \cdot \frac{l \cdot \sin^2 \lambda}{Z_d} = i8,033 \cdot 10^{-4}$$

При представлении всех элементов электропередачи четырехполюсниками коэффициенты эквивалентного четырехполюсника:

$$\begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,972 & i34,326 \\ 1,607i \cdot 10^{-3} & 0,972 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -20,79i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,972 & i34,326 \\ 1,607i \cdot 10^{-3} & 0,972 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 0,922 & 47,089i \\ 3,177i \cdot 10^{-3} & 0,922 \end{pmatrix}$$

$$\text{Предельная мощность передачи после компенсации: } P_{\text{пред}} = \frac{U_n^2}{B_3} = \frac{500^2}{47,089} = 5309 \text{ МВт.}$$

$$6. \text{ Максимальный компенсированной линии: } I = \frac{P_{\text{пред}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = 6453 \text{ А}$$

7. Число конденсаторов разных компаний-производителей, необходимое для осуществления заданной степени компенсации:

Конденсаторный завод «Электроинтер»

$$\text{Сопротивление одного конденсатора: } x_{\text{кном}} = \frac{U_{\text{кном}}^2}{Q_{\text{кном}}} = 18,375, \text{ Ом}$$

$$\text{Номинальный ток одного конденсатора: } I_{\text{кном}} = \frac{Q_{\text{кном}}}{U_{\text{кном}}} = 114,286, \text{ А}$$

$$\text{Количество параллельных цепей: } m = \frac{I}{I_{\text{кном}}} = 57$$

$$\text{Количество последовательно включенных конденсаторов: } n = \frac{x_{\text{комп}} \cdot m}{x_{\text{кном}}} = 65, \text{ шт}$$

$$\text{Общее число конденсаторов: } N = 3 \cdot m \cdot n = 11110, \text{ шт}$$

Мощность УУПК с учетом числа конденсаторов и номинальной мощности единичного конденсатора: $Q_{\text{уПК}} = 3 \cdot m \cdot n \cdot Q_{\text{кном}} = 2668, \text{ Мвар}$

Компания «General Electric»

$$\text{Сопротивление одного конденсатора: } x_{\text{кном}} = \frac{U_{\text{кном}}^2}{Q_{\text{кном}}} = 168,88, \text{ Ом}$$

$$\text{Номинальный ток одного конденсатора: } I_{\text{кном}} = \frac{Q_{\text{кном}}}{U_{\text{кном}}} = 50, \text{ А}$$

$$\text{Количество параллельных цепей: } m = \frac{I}{I_{\text{кном}}} = 130, \text{ шт}$$

$$\text{Количество последовательно включенных конденсаторов: } n = \frac{x_{\text{комп}} \cdot m}{x_{\text{кном}}} = 17, \text{ шт}$$

$$\text{Общее число конденсаторов: } N = 3 \cdot m \cdot n = 6630, \text{ шт}$$

$$\text{Мощность УУПК: } Q_{\text{уПК}} = 3 \cdot m \cdot n \cdot Q_{\text{кном}} = 2799, \text{ Мвар.}$$

По результатам расчета двухцепная УУПК с компенсацией 30% реактивного сопротивления ВЛ со следующими параметрами: сопротивление УУПК – 20,79 Ом; число конденсаторов – 11110 шт, мощность УУПК – 2668 Мвар (Конденсаторный завод «Электроинтер»); число конденсаторов – 6630 шт, мощность УУПК – 2799 Мвар – (Компания «General Electric») увеличит предельную передаваемую мощность с 3746 до 5309 МВт.

Применение ФПУ для перераспределения потоков мощности покажем на примере Томской ЭС.

Электроснабжение потребителей в Томской ЭС обеспечивается от двухцепной, многоподстанционной ВЛ 220 кВ Нижневартовская ГРЭС (Тюменская ЭС) – ПС Советско-Соснинская – ПС Чапаевка – ПС Раскино – ПС Вертикос – ПС Парабель – ПС Чажемто – ПС Володино – ПС Томская протяженностью 800 км.

Одним из путей повышения пропускной способности является усиление электросетевой части введением в эксплуатацию до 2016 г. одноцепной ВЛ 500 кВ ПС Советско-Соснинская – ПС Парабель – ПС Томская по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» [5].

На практике это будет соответствовать случаю, когда к сети более низкого класса напряжения при развитии подключена ВЛ более высокого класса напряжения. Согласно результатам расчета, приведенным в таблице 1, при естественном распределении потоков

мощности по ВЛ 220 и 500 кВ желаемого эффекта увеличения пропускной способности не будет наблюдаться: ВЛ 500 кВ будет недогружена, а ВЛ 220 кВ Нижневартовская ГРЭС – ПС Советско-Соснинская будет работать практически на пределе пропускной способности, что приведет к суммарному росту потерь мощности и энергии в ЭС.

Таблица 1. Сведения о потоках мощности по ВЛ при естественном распределении потоков

Наименование ВЛ	Напряжение ВЛ, кВ	Потоки мощности по ВЛ	
		P, МВт	Q, Мвар
Советско-Соснинская – Чапаевка	220	98	14
Нижневартовская ГРЭС – Советско-Соснинская (поток мощности по двум цепям)	220	230	128
Советско-Соснинская – ПарABELь	500	50	136

Выходом из сложившейся ситуации может быть применение принудительного перераспределения потоков мощности между ВЛ 220 и 500 кВ, если установить на ПС Советско-Соснинская ФПУ.

Основные технические характеристики ФПУ представлены в таблице 2. Согласно рисунку 2 ФПУ состоит из двух трансформаторов: регулируемого Т1 и серийного Т2, создающего вектор дополнительного напряжения в ВЛ, перпендикулярно направленный к вектору напряжения в начале ВЛ и формирующего фазовый сдвиг по отношению к основному напряжению на некоторый регулируемый угол.

Изменяя напряжение на серийной обмотке с помощью регулируемого трансформатора, можно осуществлять поворот вектора суммарного напряжения в начале ВЛ и, следовательно, управлять фазовым углом напряжения в начале и в конце ВЛ, изменяя поток мощности, передаваемой по ней [6].

Таблица 2. Технические характеристики ФПУ

Параметр	Значение параметра
Номинальная мощность, МВА	226
Допустимый ток в ВЛ, А	787
Регулирование фазового сдвига (угла) напряжения: диапазон, град. эл.	±40
Число ступеней	±15
Шаг ступени, град. эл.	2,67
Время изменения фазового сдвига (угла), с (не более)	0,02

При существовании параллельных ВЛ управление величиной фазового угла позволяет контролировать распределение потока мощности между ними.

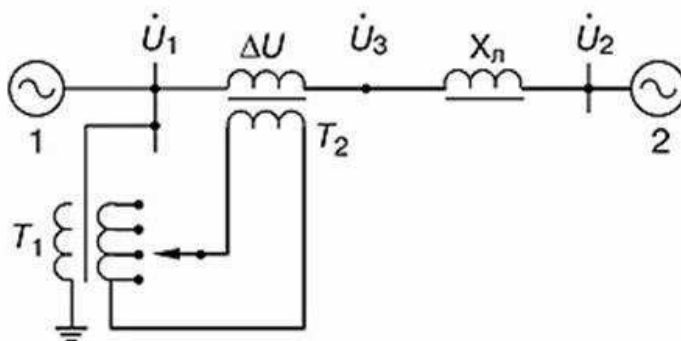


Рис.2. Принципиальная схема ФПУ

Расчет режима с установленным на ПС Советско-Соснинская ФПУ, проводился с помощью программного комплекса (ПК) RastrKZ. Согласно рисунку 3 ФПУ моделировалось посредством задания в соответствующих ветвях комплексного коэффициента трансформации: $K_{T/g}, K_{T/i}$, который определяется по формуле:

$$K_T = K_{T/g} + jK_{T/i} = K_T(\cos\delta_{ФПУ} + j\sin\delta_{ФПУ}),$$

где $\delta_{ФПУ}$ – угол сдвига между векторами напряжения, град. эл.

	O	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	Название	R	X	G	B	Kт/i	Kт/g
37	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	21	22	1	Раскино - Чапаевка	10,38	38,28		-229,0		
38	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	21	22	2	Раскино - Чапаевка	10,38	38,28		-229,0		
39	<input type="checkbox"/>		Тр-р	22	23	1	Чапаевка - Сов.-соснинс...	14,16	52,20		-312,0	0,407	0,913
40	<input type="checkbox"/>		Тр-р	22	23	2	Чапаевка - Сов.-соснинс...	14,16	52,20		-312,0	0,407	0,913
41	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	23	24	1	Сов.-соснинская - Н.Вар...	3,92	14,44		-86,0		
42	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	23	24	2	Сов.-соснинская - Н.Вар...	3,92	14,44		-86,0		

Рис. 3. Моделирование ФПУ в ПК RastrKZ

На первом шаге расчета сопротивление соответствующей трансформаторной ветви ФПУ было принято равным нулю, что соответствовало комплексному коэффициенту трансформации, равному $0,99 \pm j0,046$. Далее посредством изменения комплексного коэффициента трансформации было выявлено оптимальное перераспределение потоков мощности, приведенные в таблице 3.

Таблица 3. Перераспределение потоков мощности при включении ФПУ на ПС Советско-Соснинская

$\delta_{ФПУ}$, град. эл.	Суммарные потери мощности, МВА	Поток мощности по линии, МВА		
		Советско-Соснинская – Чапаевка (220кВ)	Нижневартовская ГРЭС – Советско-Соснинская 220кВ (переток по двум цепям)	Советско-Соснинская – Парабель (500кВ)
0	54,1+j635	98-j14	230-j128	-50+j136
+10,68	54+j635	16+j14	188-j106	-92+j141

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что оптимальный угол включения $\delta_{ФПУ} \approx 11^\circ$. При данном угле включения ВЛ 220 кВ будут разгружены, а ВЛ 500 кВ более загружена при том же значении суммарных потерь мощности, что и при отсутствии ФПУ.

Таким образом, установка в расщелку линии УУПК с 30% степенью компенсации повысит пропускную способность ВЛ СШГЭС – ПС Новокузнецкая, осуществляющей основной межсистемный транзит в Кузбасскую ЭС.

Расчитанный угол включения ФПУ позволит оптимально перераспределять потоки мощности между линиями разного класса напряжения в Томской ЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова – М., Энергия, 1979. – 456 с, ил.
2. «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ОАО «ФСК ЕЭС») [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru>, свободный;
3. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока с энергосистемах – М.: Торус пресс, 2011. – 311 с.;
4. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения учебник для вузов/ – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.;
5. О схеме и программе перспективного развития электроэнергетики Томской области на период 2013-2017 г.г. [официальный сайт Администрации Томской области]. URL: docs.pravo.ru/document/view/26481664/26384921 (дата обращения 17.08.2013).

6. Стельмаков В.Н. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Электричество.-2010.-№8.-С. 20-23.

Научный руководитель: Н.Л.Бацева, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических сетей и электротехники, Энергетического института ТПУ.

КОНСТРУКТОР ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ SIEMENS 3AP1DT-145kV

О.С.Возисова, А.В.Трембач, Д.А.Фирсова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина.

Уральский энергетический институт.

Автоматизированные электрические системы.

В настоящее время обучение будущих специалистов электроэнергетической отрасли не в полной мере отвечает современным требованиям и отличается значительными финансовыми и временными затратами. Доступ к реальным объектам и оборудованию энергосистемы имеет круг людей, ограниченный персоналом предприятия, обслуживающего энергообъект. Основное же обучение методам проектирования, монтажа и эксплуатации выполняется по технологии плоских чертежей на бумажном или электронном носителе. При таких условиях отсутствует возможность донесения знаний о внешнем виде и устройстве оборудования, принципах его действия, назначения, оперативного управления, проблемах монтажа, правилах сборки и технической эксплуатации.

С сентября 2013 г. кафедра АЭС УралЭНИН УрФУ (г.Екатеринбург) реализует долгосрочный проект «Конструктор электроэнергетических систем». Одной из последних работ стало создание уменьшенной модели выключателя Siemens 3AP1DT-145. Данная модель представляет собой конструктор выключателя выполненного в масштабе 1/35 (Рисунок 1).

Конструктор выключателя выполняется на основе методов и технологий масштабного моделирования с применением новейших промышленных систем объёмного проектирования, 3D принтеров, обрабатывающих станков с числовым программным управлением и микропроцессорной техники. Такой подход к производственному процессу позволяет производить уменьшенные копии (масштабные модели) силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем и обеспечить их высокую внешнюю точность и идентичность (копийность). Очевидным преимуществом масштабного моделирования является обеспечение наглядности изучаемого или управляемого объекта (Рисунок 1).

Малые размеры оборудования, собираемого из такого конструктора позволяют эффективно решить задачи обучения студентов и персонала на предприятии, проектирования и инжиниринга, и что немаловажно, сделать обучение увлекательным, познавательным, интересным, интерактивным, дистанционным и самостоятельным. Также подобная постановка образовательного процесса позволяет вести дошкольную и довузовскую подготовку будущих специалистов электроэнергетической отрасли, что в дальнейшем, существенно повышает интеллектуальные способности будущих инженеров и конструкторов. Очевидно, что такое оборудование, не находящееся под опасным напряжением, совершенно безопасно для учащегося и преподавателя, т.к. отсутствует риск поражения электрическим током.