

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2005 4

МОСКОВСКОМУ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ (ТУ) — 75 ЛЕТ

Московскому
энергетическому институту — 75 лет

Кафедре тепловых электрических
станций МЭИ — 75 лет

Технические решения
по регулированию электрической нагрузки
одновольных энергетических ГТУ.
Российский и зарубежный опыт

Расчет коэффициента теплопередачи
в испарителе кипящего типа на практике

О проблеме координации
уровней токов короткого замыкания
в энергосистемах

К развитию компьютерных технологий
в эксплуатации электрооборудования
электростанций

Еще раз о составляющих модели
отказа выключателя

Расчет электродинамической стойкости
и других параметров жесткой ошиновки ОРУ
высоких и сверхвысоких напряжений

Защита низковольтных электроустановок
с.н. электростанций от коротких замыканий

Технико-экономический анализ
параметров распределительных электрических
сетей городов с учетом их развития

Комплексные анализаторы
процессов функционирования
электрооборудования электростанций

К истории энергетики России

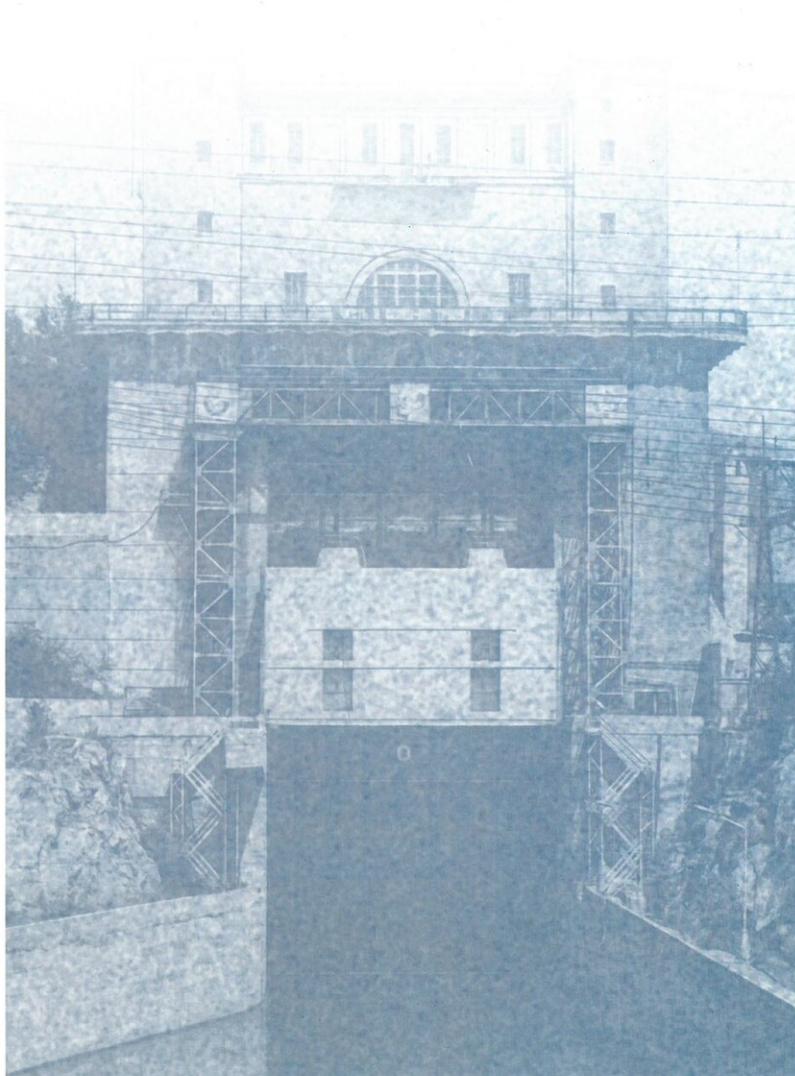
ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ

Системные аварии
и меры по их предупреждению

ХРОНИКА

Научно-технический семинар
“Водно-химические режимы
и водоподготовка на тепловых
электростанциях”

Выставка
“Power Kazakhstan 2004”





ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2005 4

Издается
с января 1930**УЧРЕДИТЕЛИ**

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
РОССИЙСКОЕ ОАО ЭНЕРГЕТИКИ
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ "ЕЭС РОССИИ",
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ
"КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК",
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИРМА
"ЭНЕРГОПРОГРЕСС",
РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБЩЕСТВО ЭНЕРГЕТИКОВ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Ольховский Г.Г.

Зам. главного редактора

Антипов К.М.

Бондаренко А.Ф., Волков Э.П., Денисов В.И.,
Зотов В.М., Корниенко А.Г., Кошечев Л.А.,
Ляшенко В.С., Мисриханов М. Ш.,
Неклепаев Б.Н., Нечаев В.В., Орфеев В.М.,
Охотин В.Н., Ремезов А.Н., Решетов В.И.,
Савваитов Д.С., Седлов А.С., Соловьева Т.И.,
Федосеев Б.С., Широкова М.И.

РЕДАКЦИЯ

Зам. главного редактора

Соловьева Т.И.

Ответственный секретарь

Широкова М.И.

Научный редактор

Шишорина Г.Д.

Литературный редактор

Евсеева Е.Б.

Секретарь редакции

Васина С.А.

Компьютерный набор

Коновалова О.Ф.

Раздел "Энергохозяйство за рубежом"

Научные редакторы

Алексеев Б.А., Котлер В.Р.**АДРЕС РЕДАКЦИИ**

115280, Москва,
ул. Ленинская слобода, 23

ТЕЛЕФОНЫ

Редакция

(095) 234-7417, 234-7419

Главный редактор

(095) 234-7617

Факс

(095) 234-7417

Internet

www.energy-journals.ru/elst

E-mail

tis@mail.magelan.ru

Сдано в набор 28.02.2005

Подписано в печать 23.03.2005

Формат 60×84 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная

Печ. л. 9. Тираж 2000. Цена свободная

Оригинал-макет

выполнен в издательстве "Фолиум"

127238, Москва, Дмитровское ш., 58

Тел/факс: (095) 482-5590, 482-5544, 488-7210

Internet: www.folium.ru

E-mail: prepress@folium.ru

Отпечатано

в типографии издательства "Фолиум"

Содержание**МОСКОВСКОМУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ (ТУ) - 75 ЛЕТ**

Воронов В. Н. Московскому энергетическому институту – 75 лет	2
Седлов А. С., Федорович Л. А., Цанев С. В. Кафедре тепловых электрических станций МЭИ – 75 лет.	4
Цанев С. В., Буров В. Д., Карташев Д. В. Технические решения по регулированию электрической нагрузки однофазных энергетических ГТУ. Российский и зарубежный опыт	9
Седлов А. С., Кузма-Кичта Ю. А., Карцев А. С., Дегтярев И. К., Комов А. А. Расчет коэффициента теплопередачи в испарителе кипящего типа на практике	13
Антипов К. М., Востросаблин А. А., Жуков В. В., Кудрявцев Е. П., Крючков И. П., Кузнецов Ю. П., Мозгаев К. В., Неклепаев Б. Н., Пираторов М. В., Пойдо А. И., Шунтов А. В. О проблеме координации уровней токов короткого замыкания в энергосистемах	19
Васин В. П., Лоскутов В. Ф., Старшинов В. А., Поляков А. М. К развитию компьютерных технологий в эксплуатации электрооборудования электростанций	33
Абдурахманов А. М., Мисриханов М. Ш., Неклепаев Б. Н., Шунтов А. В. Еще раз о составляющих модели отказа выключателя	41
Долин А. П., Кудрявцев Е. П., Кознинова М. А. Расчет электродинамической стойкости и других параметров жесткой ошиновки ОРУ высоких и сверхвысоких напряжений	49
Беспалов А. В., Борисова Е. С., Гусев О. Ю., Гусев Ю. П., Старшинов В. А. Защита низковольтных электроустановок с.н. электростанций от коротких замыканий	53
Киселев А. Н., Глазунов А. А. Технично-экономический анализ параметров распределительных электрических сетей городов с учетом их развития	61
Старшинов В. А., Пойдо А. И., Рубашкин А. С., Рубашкин В. А. Комплексные анализаторы процессов функционирования электрооборудования электростанций	66
Елизаров Д. П. К истории энергетики России	74

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ

Алексеев Б. А. Системные аварии и меры по их предупреждению	78
--	----

ХРОНИКА

Научно-технический семинар "Водно-химические режимы и водоподготовка на тепловых электростанциях"	85
Выставка "Power Kazakhstan 2004"	87
А. Ф. Бондаренко (К 60-летию со дня рождения)	86
Е. М. Щукин (Некролог)	88

одинакова. Таким образом, имеется необходимость количественно учитывать основные влияющие факторы в модели отказа выключателей различного типа притом, что сама модель может быть общей.

Выводы

1. Отказы собственно выключателей с приводами и отказы выключателей из-за нарушений работы устройств РЗА являются основными причинами повреждаемости коммутационных аппаратов. Причем доля отказов выключателей из-за нарушений работы устройств РЗА в ряде случаев превышает число отказов собственно выключателей с приводами, при этом по организационным причинам свыше половины отказов могут возникнуть по вине персонала энергосистем.

2. Отказы выключателей в статическом состоянии, при оперативных переключениях и при отключении КЗ проявляются достаточно равномерно: их частота возникновения в среднем составляет 30 – 40%. Следовательно, в модели отказа выключателя не имеет большого смысла особо выделять режимы КЗ.

3. Известные типы отказов выключателя [“КЗ в одну (каждую) сторону”, “КЗ в обе стороны”, “разрыв”] фактически можно рассматривать в качестве условно независимых случайных событий, поскольку на каждого из них ориентировочно пришлось 1/4 общего числа отказов выключателей. Поэтому публикуемые последние десятилетия в специализированной литературе значения коэффициента, характеризующего долю отказов типа “КЗ в обе стороны”, на уровне 0,6–0,7 представляются завышенными.

4. Большая доля отказов выключателей в статическом состоянии, при оперативных переключениях, а также из-за нарушений работы устройств

РЗА по вине персонала требует, по мнению авторов, сделать соответствующие выводы работникам энергосистем и электропромышленности.

5. Относительно ограниченная статистическая выборка, использованная в данной статье, и важность рассматриваемого вопроса для обоснования и выбора конструкций выключателей, схем электрических соединений, а также планирования их ремонтно-эксплуатационного обслуживания требуют дальнейшего и более полного анализа структуры и параметров отказов выключателей различного типа.

Список литературы

1. Мисриханов М. Ш., Мозгалева К. В., Шунтов А. В. О надежности КРУЭ и коммутационных аппаратов с традиционной изоляцией. – Электрические станции, 2003, № 11.
2. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник / Под общ. ред. Руленко Ю. Н. М.: Энергоатомиздат, 2000, т. 2.
3. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. Рокотяна С. С. и Шапиро И. М. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Грудинский П. Г. Анализ повреждаемости и условий эксплуатации в распределительных устройствах 110 – 220 кВ и выводы для проектирования. М.: Министерство электростанций, 1957.
5. Сильчугов Ф. И. Надежность электрических сетей энергосистем. М.: ЭНАС, 1998.
6. Китущин В. Г. Надежность энергетических систем. М.: Высшая школа, 1984.
7. РД 34.35.516-89 Инструкция по учету и оценке работы релейной защиты и автоматики электрической части энергосистем. М.: Союзтехэнерго, 1990.
8. Инструкция по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей. М.: Энергосервис, 2001.
9. Балаков Ю. Н., Мисриханов М. Ш., Шунтов А. В. Схемы выдачи мощности электростанций: Методологические аспекты формирования. М.: Энергоатомиздат, 2002.

Расчет электродинамической стойкости и других параметров жесткой ошиновки ОРУ высоких и сверхвысоких напряжений

Долин А. П., канд. техн. наук, Кудрявцев Е. П., доктор техн. наук, Козина М. А., инж. Московский энергетический институт (Технический университет) – НПО “Техносервис-Электро”

В последние годы в нашей стране и за рубежом в открытых распределительных устройствах (ОРУ) напряжением 110 кВ и выше наряду с гибкой ошиновкой все шире используются экономичные, прогрессивные конструкции с жесткими шинами.

Нагрузки на изоляторы и напряжения в шинах при коротких замыканиях (КЗ) определяются в результате расчета колебаний шинной конструкции под действием электродинамических нагрузок. Упругую систему шины – изоляторы можно рассматривать как раму. Расчет колебаний рамных систем весьма трудоемкая задача, требующая значительной аналитической проработки. Одним из основных параметров для расчета колебаний жесткой шины является частота собственных колебаний шины. Традиционный способ ее нахождения описан в [1–3], другой изложен далее.

В настоящей статье рассматриваются конструкции, где шинами служат горизонтальные ригели рамы, а поддерживающие шины изоляторы представляют собой ее вертикальные стойки. Обсуждаемые в статье расчетные схемы шинных конструкций изображены на рис. 1.

При КЗ достаточно “жесткие” шинные конструкции ОРУ совершают неустановившиеся колебательные движения, отвечающие всему спектру частот электродинамической нагрузки [4]. В конструкциях с большой упругой податливостью (в “податливых” конструкциях) колебания с частотами, соизмеримыми с преобладающими частотами возмущающей электродинамической нагрузки, несущественны, и комплекс шина – опоры ведет себя подобно упругой системе, внезапно нагруженной распределенными по длине шины постоянной во времени и аperiodической составляющими электродинамической нагрузки. Если шины параллельны, то электродинамические нагрузки распределены вдоль шин равномерно.

Естественно, удобные для практического использования способы оценки электродинамической стойкости “жестких” и “податливых” рам (рис. 1) оказываются существенно различными. Расчеты и опыты показали, что действием периодических составляющих электродинамических сил на колебания рам можно пренебречь, если частота f_1 собственных колебаний рамы с формой, близкой к ее

прогибам под действием электродинамических сил, составляет не более 20% промышленной частоты переменного тока, т.е. примерно 10 Гц. Приступая к расчету электродинамической стойкости рамных конструкций ОРУ, необходимо прежде всего определить частоту собственных колебаний рамы f_1 . В случаях рамных конструкций, у которых параметр частоты r_1 [1] не изучен, для принятия инженерных решений при проектировании достаточно точным будет вычисление приближенного значения угловой собственной частоты рамы методом Рейля [3, 5, 6]

$$\Omega_1 = 2\pi f_1 = \sqrt{U_{\max}/T_{\max}}, \quad (1)$$

где U_{\max} – потенциальная энергия деформации стержней расчетной рамы при максимальном отклонении ее в процессе собственных колебаний от положения равновесия, Н · м; T_{\max} – максимальная кинетическая энергия стержней расчетной рамы в процессе собственных колебаний с точностью до множителя Ω_1^2 , Н · м · с²; Ω_1 – угловая собственная частота, рад/с.

Энергии U_{\max} и T_{\max} вычисляются для принимаемой в расчете формы колебаний. Обычно ее принимают совпадающей с деформациями при статическом приложении к раме единичной нагрузки (в нашем случае электродинамической нагрузки на единицу длины шины $q_0 = 1$). Если учитывать только деформации изгиба стержней расчетной рамы, для энергий U_{\max} и T_{\max} будем иметь формулы

$$U_{\max} = 0,5 \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} (\overline{M}_{iq}^2 / (E_i J_i)) dz, \quad (2)$$

где \overline{M}_{iq} – изгибающие моменты в стержне с номером i при действии статической приложенной к шине единичной электродинамической нагрузки, Н · м; E_i и J_i – соответственно модуль упругости, Па, и изгибная жесткость i -го стержня рамы; l_i – длина i -го стержня, м; n – число стержней в расчетной раме;

$$T_{\max} = 0,5 \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} m_i \dot{Y}_{iq}^2 dz, \quad (3)$$

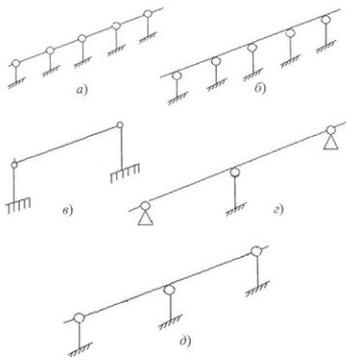


Рис. 1. Расчетные схемы шинных конструкций:

а – многопролетная шина на упругих опорах с равными пролетами, в сечениях шины над опорами врезаны шарниры; б – многопролетная неразрезная шина на упругих опорах с равными пролетами, в – шарнирно-опертая однопролетная шина на упругих опорах; г – двухпролетная неразрезная шина с абсолютно жесткими крайними и упругой средней опорой; д – двухпролетная неразрезная шина с упругими опорами

где m_i – масса стержня с номером i на единицу его длины; Y_{iq} – прогибы стержня с номером i при действии на шину статической приложенной единичной электродинамической нагрузки q .

Формула (1) с учетом выражений (2) и (3) для равнопролетных конструкций приводится к традиционному виду [1, 2]

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E_{ш} J_{ш}}{m_{ш}}}, \quad (4)$$

где $E_{ш}$ – модуль упругости, Па; $J_{ш}$ – момент инерции, m^4 ; $m_{ш}$ – погонная масса шины, кг/м; l – длина пролета шины, м.

В качестве примера на рис. 2 построены кривые зависимости первой частоты собственных колебаний r_1 для шинных конструкций, изображенных соответственно на рис. 1, а, б, г, д. Кривые построены в зависимости от безразмерного параметра $C_{оп} l^3 / E_{ш} J_{ш}$ при различных значениях отношения $M_{оп} / m_{ш} l$ ($M_{оп} / m_{ш} l = 0, 2, 4, 7$), где $C_{оп}$ – жесткость опоры, которая для изоляционных опор может быть определена экспериментально; $M_{оп}$ – приведенная масса опоры, которая для опор с постоянными по длине погонными массами и жесткостью приближенно может быть принята равной

$$M_{оп} \approx M \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^2 \approx \frac{M}{4}, \quad (5)$$

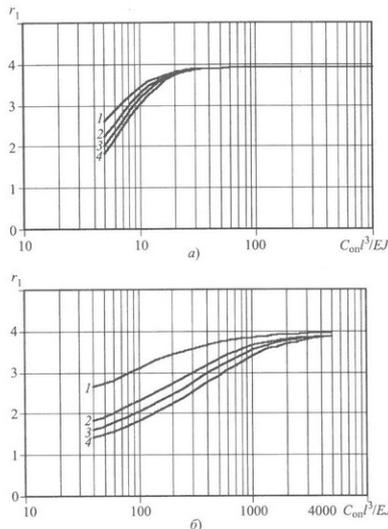


Рис. 2. Зависимости параметров первой частоты собственных колебаний r_1 системы шины – опоры (изоляторы) от $C_{оп} l^3 / E J$ при различных значениях $M_{оп} / m l$:

а – конструкция с двумя пролетами без шарнира на средней упругой опоре с неподвижными крайними шарнирными опорами (рис. 1, а); б – конструкция с двумя пролетами без шарнира на средней опоре с тремя одинаковыми упругими опорами (рис. 1, б); 1 – $M_{оп} / m l = 0$; 2 – $M_{оп} / m l = 2$; 3 – $M_{оп} / m l = 4$; 4 – $M_{оп} / m l = 7$

где M – масса опоры, кг; H_1 и H_2 – расстояния от основания опоры соответственно до центра массы опоры (изолятора) и до точки крепления шины к изолятору.

Кривые (рис. 2), полученные с использованием метода Рейля, практически совпадают с точным решением задачи.

При $f_1 \geq 10$ Гц расчет электродинамической стойкости наиболее часто встречающихся типов конструкций регламентирован действующими документами [4]. Конструкции, не рассмотренные в нормативных документах, рассчитываются по методикам, имеющимся в литературе [1, 2]. Расчеты “жестких” шинных конструкций ОРУ ведутся с учетом всех составляющих электродинамической нагрузки.

Расчеты многопролетных “жестких” конструкций регулярной структуры (рис. 1, а, б, г, д) с шарнирным или неподвижным закреплением на одинаковых опорах – шинах производятся по методике [6], подробно разработанной для шинных линий с шинами – стержнями, лежащими на одинаковых невесомых упругоподатливых опорах с

приведенными точечными массами в местах соединения шин с опорами. Чтобы использование этой методики стало возможным, в расчетной схеме рамы опоры с распределенной массой заменяются на невесомые опоры с соответственно подобранными жесткостями и точечными массами, расположенными в местах крепления шин к опорам. Подобранные “приведенные” жесткости и массы должны обеспечивать равенство частот f_1 шинной конструкции и его расчетной схемы с сосредоточенными в точках расчетными массами опор. Рекомендации по определению приведенных параметров содержатся в [1].

Электродинамические нагрузки, возникающие при токах КЗ в общем случае, записываются в виде

$$q(x, t) = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n(x) T_n(t), \quad (6)$$

где a – расстояние между фазами, м; $I_m = \sqrt{2} I_{п0}$ – амплитуда периодической составляющей тока КЗ, А; $I_{п0}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ, А; $D_n(x)$ – коэффициенты, зависящие от взаимного расположения проводников шин и угла включения тока КЗ; $T_n(t)$ – функции времени, равные

$$T_1 = 1; T_2 = e^{-2t/T_a}; T_3 = e^{-t/T_a} \cos \omega t; \\ T_4 = e^{-t/T_a} \sin \omega t; T_5 = \cos 2\omega t; T_6 = \sin 2\omega t,$$

где t – время, с; ω – угловая частота тока; T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с.

Для параллельных шин значения D_1, \dots, D_6 остаются постоянными по длине проводников. Коэффициенты D_n , при которых электродинамические нагрузки достигают максимума, для ряда конструкций приводятся, например в [2].

Максимальные значения электродинамических нагрузок для параллельных шин можно представить в виде

$$q_{max} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \max \left(\sum_{n=1}^6 D_n T_n \right) \approx \alpha i_{уд}^2, \quad (7)$$

где q – электродинамическая нагрузка, Н/м; $\alpha = \sqrt{3} \cdot 10^{-7}$ Н/А² при трехфазном КЗ и $\alpha = 2 \cdot 10^{-7}$ при двухфазном КЗ; $i_{уд} \approx \sqrt{2} I_{п0} K_{уд}$ – ударный ток КЗ, А; $K_{уд}$ – ударный коэффициент.

В этом случае напряжения в материале шины (без учета собственного веса) и нагрузки (силы) на изоляторы при КЗ могут быть приведены к традиционному виду

$$\sigma_{max} = \frac{\alpha l^2}{\lambda a W} i_{уд}^2 \eta, \quad (8)$$

$$R_{max} = \beta \frac{\alpha l^2}{a} i_{уд}^2, \quad (9)$$

где β и λ – параметры, зависящие от условий опирания шин на изоляторы и пролета [1]; W – момент сопротивления поперечного сечения шины, m^3 [2]; η – динамический коэффициент [2].

При $f_1 < 10$ Гц определяющими колебания конструкции будут экспоненциальная и постоянная составляющие электродинамической нагрузки.

Внезапное нагружение расчетной упругой конструкции постоянными во времени электродинамическими силами вызывает движение конструкции, подобное вызванному колебаниям, со смещением положением устойчивого равновесия. При собственных колебаниях смещения и деформации стержней расчетной конструкции меняются во времени по гармоническому закону.

Задание формы колебаний позволяет свести задачу о колебаниях упругой системы с бесконечно большим числом степеней свободы к задаче о колебаниях конструкции, обладающей только одной степенью свободы.

В этом случае изгибающие моменты $M_{эл}(t)$ в поперечных сечениях стержней конструкции

$$M_{эл}(t) = M_{эл,ст} q_{ст}(1 + \sin \Omega_1 t), \quad (10)$$

где $M_{эл,ст}$ – совокупность изгибающих моментов во всех стержнях расчетной рамы от статической приложенной единичной электродинамической нагрузки. В этом случае максимальное значение суммы $(1 + \sin \Omega_1 t)$, равное 2, в правой части формулы (10) является динамическим коэффициентом, отвечающим случаю внезапно приложенной нагрузки.

Расчетной постоянной во времени нагрузкой $q_{ст}$ в данном случае будет нагрузка, равная произведению постоянной составляющей электродинамической нагрузки и эквивалентного импульса от аperiodической составляющей, т.е.

$$q_{ст} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 (D_1 + \Delta D) = \\ = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \gamma D_1, \quad (11)$$

где D_1 – коэффициент при временной составляющей T_1 электродинамической нагрузки; $\gamma = (1 + \Delta D / D_1)$; ΔD определяется как импульс от аperiodической составляющей электродинамической нагрузки за полупериод собственной частоты колебания $T/2 = 1/(2f_1)$

$$\Delta D = \frac{2D_2}{T} \int_0^{T/2} T_2(t) dt = \\ = T_n D_2 f_1 \left(1 - e^{-\frac{1}{\sqrt{T_a}}} \right), \quad (12)$$

Для крайних фаз системы параллельных шин, расположенных в одной плоскости, при трехфазном КЗ $D_1 = 0,375$ и $D_2 = 0,808$ [2].

При продолжительности КЗ больше половины периода собственных колебаний конструкций с частотой f_1 расчетные изгибающие моменты от действия тока КЗ в произвольном стержне i шинной конструкции равны

$$M_{расч.и} = 2\overline{M}_{эл.ст.ст.} \quad (13)$$

Прочность шины круглого или кольцевого поперечного сечения при коротких замыканиях (с учетом собственного веса шины) будет обеспечена при выполнении во всех сечениях шины условия

$$\sigma_{max} = (M_{расч.ш}^2 + M_g^2)^{0.5} / W_{ш} \leq [\sigma], \quad (14)$$

где $M_{расч.ш}$ – расчетный изгибающий момент в шине от действия тока КЗ, Н·м; $M_g = m_{ш}g l^2 / \lambda W$ – изгибающий момент от собственного веса шины, Н·м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $[\sigma]$ – допустимое напряжение в материале шины при изгибе, Па.

Прочность изоляционных опор при КЗ будет обеспечена при выполнении условия

$$R_{max} = (M_{расч.оп}/H) \leq [R], \quad (15)$$

где $M_{расч.оп}$ – расчетный изгибающий момент в изоляционных опорах от действия тока КЗ, Н·м; H – высота опоры (изолятора), м; $[R]$ – допустимая поперечная нагрузка на вершину изолятора, Н.

Пример. Определить наибольшие нагрузки на изоляционные опоры внутрирейковых связей ОРУ напряжением 330 кВ. Шинная конструкция отвечает расчетной схеме, изображенной на рис. 1, г. Конструкция выполнена трубами с внешним диаметром $D = 150$ мм и внутренним $d = 140$ мм. Шины изготовлены из сплава 1915Т (модуль упругости $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па, плотность $\delta = 2770$ кг/м). Длина неразрезной шины 21 м. В середине, т.е. на расстоянии от крайней точки $l = 10,5$ м, шина опирается на упругую опору жесткостью $C_{оп} = 190 \text{ кН/м}$ и массой $M_{оп} = 270$ кг. Крайние опоры абсолютно жесткие. Расстояние между фазами $a = 3,5$ м. Трехфазный ток короткого замыкания $I_{кз} = 50 \text{ кА}$, постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ $T_a = 0,1$ с.

Площадь поперечного сечения шины и момент инерции трубчатой шины

$$S = \pi(D^2 - d^2)/4 = 3,14(0,15^2 - 0,14^2)/4 = 0,00227 \text{ м}^2;$$

$$J = \pi(D^4 - d^4)/64 = 3,14(0,15^4 - 0,14^4)/64 = 5,99 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Масса шины определяется по формуле

$$m_{ш} = \delta S = 2770 \cdot 0,00227 = 6,3 \text{ кг}.$$

Для того чтобы воспользоваться кривыми (рис. 2, а), необходимо определить параметры $C_{оп} l^3 / (E_{ш} J_{ш})$ и $M_{оп} / (m_{ш} l)$:

$$C_{оп} l^3 / (E_{ш} J_{ш}) = (190 \cdot 10^3 \cdot 10,5^3) / (7 \cdot 10^{10} \cdot 5,99 \cdot 10^{-6}) = 524,$$

$$M_{оп} / (m_{ш} l) = 270 / (6,3 \cdot 10,5) = 4,08.$$

По кривым (рис. 2, а) определяем $r_1 = 3,9$.

По формуле (4) вычисляем основную частоту собственных колебаний шины

$$f_1 = \frac{3,9^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 10,5^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 5,99 \cdot 10^{-6}}{6,3}} = 5,6 \text{ Гц}.$$

Согласно выражению (15) из решения статической неопределимой задачи для равномерно распределенной по длине шины (рис. 1, е) при постоянной во времени нагрузке для центральной (упругой) опоры имеем

$$\frac{R_{ст}}{q_{ст} l} = \beta = \frac{5}{4 + 24 E_{ш} J_{ш} / (C_{оп} l^3)} = 1,23. \quad (16)$$

При трехфазном КЗ коэффициенты электродинамических нагрузок расчетных крайних шин (фаз А и С) согласно [2] и уравнению (12) равны

$$D_1 = 0,375;$$

$$\Delta D = 0,1 \cdot 0,808 \cdot 5,6(1 - e^{-1/(5,6 \cdot 0,1)}) = 0,376.$$

Наибольшие нагрузки на среднюю (упругую) изоляционную опору в соответствии с уравнениями (15) и (16) определяются по формуле

$$R_{max} = \beta \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_{кз} (\sqrt{2} I_{кз})^2 (D_1 + \Delta D) \cdot 2 = 1,23 \frac{2 \cdot 10^{-7}}{3,5} 10,5 (\sqrt{2} \cdot 50)^2 \times 10^6 (0,375 + 0,376) \cdot 2 = 5500 \text{ Н}.$$

Сравним полученное значение R_{max} с результатами расчетов по формуле (9). Предварительно определяем ударный ток КЗ из формулы (7)

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{кз} (1 + e^{-0,01/T_a}) = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 1,9 = 134 \text{ кА}.$$

Далее по кривым, приведенным в [2], в зависимости от f_1 и T_a находим динамический коэффициент $\eta = 0,45$. Согласно уравнению (9) наибольшая нагрузка на среднюю опору

$$R'_{max} = (1,23 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 10,5 \cdot 134^2 \cdot 10^6 \cdot 0,45) / 3,5 = 5200 \text{ Н}.$$

Таким образом, разница между R_{max} и R'_{max} составляет около 5%, следовательно, предложенная

методика вполне отвечает точности инженерных расчетов.

Выводы

1. Предлагаемая методика расчета позволяет проводить расчеты электродинамической стойкости жесткой ошиновки различного конструктивного исполнения, в том числе шинных конструкций ОРУ 330 – 750 кВ.

2. Разработанный инженерный подход значительно упрощает решение задачи по оценке электродинамической стойкости различных типов шинных конструкций с низкой частотой собственных колебаний, сохраняя при этом достаточно высокую точность решений.

3. Для жесткой ошиновки любого конструктивного исполнения оценку частот собственных колебаний удобно проводить методом Релея, позволя-

ющим получать значения с достаточной степенью точности.

Список литературы

1. Кудрявцев Е. П., Долин А. П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981.
2. Долин А. П., Шонин Г. Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Кудрявцев Е. П. Колебания и прочность жестких шинных линий при коротких замыканиях. Механика управляемых систем, машин и механизмов. – Сборник научных трудов МЭИ, 1987, № 140.
4. ГОСТ Р 50254-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. М.: Изд-во стандартов, 1993.
5. Болотин В. В. Вибрации в технике. Справочник. М.: Машиностроение, 1978, т. 1.
6. Биргер И. А., Панко Я. Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. М.: Машиностроение, 1968, т. 3.

Защита низковольтных электроустановок с.н. электростанций от коротких замыканий

Беспалов А. В., Борисова Е. С., Гусев О. Ю., инженеры, Гусев Ю. П., Старшинов В. А., кандидаты техн. наук

Московский энергетический институт (Технический университет)

Исторически сложилось так, что в последние десятилетия вопрос совершенствования электроустановок переменного тока напряжением 0,4 кВ собственных нужд (с.н.) электростанций уделялось недостаточное внимание со стороны отраслевой и вузовской науки. Увеличение единичных мощностей основного оборудования атомных, тепловых и гидравлических электростанций, ужесточение требований к качеству электроэнергии для питания новых систем управления технологическими процессами на электростанциях, усиление требований к надежности и живучести энергетических объектов и электроэнергетических систем в целом обуславливает необходимость поиска новых технических решений в организации системы электроснабжения с.н. электростанций. Опыт эксплуатации показывает, что гарантии высокого уровня надежности работы с.н. электростанций является обеспечение эффективной защиты электроустановок с.н. от коротких замыканий (КЗ). На действующих электростанциях значительная часть коротких замыканий имеет недопустимо большую продолжительность. Следствием таких замыканий являются пожары, повреждение оборудования, останова энергетических блоков.

Можно выделить три основные причины неудовлетворительной работы защит низковольтных электроустановок. Первая – выбор защитных аппаратов и их уставок при проектировании ныне действующих электростанций выполнялся на основе упрощенных методик расчета токов КЗ, что приводило к завышению расчетных значений токов и, как следствие, к ошибкам в выборе уставок автоматических выключателей. В настоящее время эта проблема в основном решена: действуют новые государственные стандарты [1, 2], отражающие современную методику расчета токов КЗ; изданы отраслевые документы по расчету токов КЗ [3, 4]. В соответствии с рекомендациями нормативно-технических документов на кафедре электрических станций МЭИ разработана и более 10 лет повсеместно применяется компьютерная программа GUExpert. Все это позволяет учесть следующие наиболее существенные факторы, влияющие на результаты расчета токов КЗ: увеличение сопротивления кабелей, обусловленное нагревом их жил током КЗ; наличие в цепи короткого замыкания нелинейного сопротивления электрической дуги; влияние асинхронных двигателей; внутреннее сопротивление защитных аппаратов;

температура жил кабеля в начальный момент КЗ; переходное сопротивление разборных контактных соединений.

Вторая причина неудовлетворительной работы защит – несоответствие параметров отечественных защитных аппаратов современным требованиям. В частности, отсутствуют селективные автоматические выключатели с номинальными токами менее 160 А, выключатели имеют большой разброс параметров срабатывания и требуют частого и трудоемкого технического обслуживания. Эта проблема в настоящее время частично решается за счет выключателей зарубежного производства.

Третья причина низкой эффективности защит низковольтных электроустановок – использование схемотехнических решений в системах с.н. электростанций, неадекватных характеру нагрузок и возможностям защитных аппаратов. В данной статье основное внимание уделено рассмотрению именно этого аспекта проблемы построения защиты низковольтных электроустановок с.н. электростанций от КЗ.

Преобладающее большинство низковольтных электроустановок выполняется по радиальным схемам. Между конечным электроприемником и источником питания (трансформатором) имеется три или четыре защитных аппарата. Для обеспечения селективной работы защитных аппаратов они должны иметь непересекающиеся время-токовые защитные характеристики. При наличии нескольких источников питания и устройств автоматического включения резервных источников используются направленные защиты на реле направления мощности. При разработке схемы системы с.н. и выборе параметров защитных аппаратов должно быть обеспечено резервирование отказов выключателей. На практике это не всегда удается. Рассмотрим типовую ситуацию со шитом переменного тока, питающимся от трансформатора мощностью 1000 кВ·А.

Автоматические выключатели на вводах от трансформаторов на шит с.н. подбираются с учетом следующих условий.

1. Номинальный ток расцепителя вводного выключателя $I_{ном.расц}$ выбирается по расчетной нагрузке распределительного щита $I_{расч.щита}$

$$I_{ном.расц} \geq k_{зан} I_{расч.щита}$$

где $k_{зан}$ – коэффициент запаса.

В приближенных расчетах суммарная мощность нагрузки щита принимается равной 70% мощности трансформатора [5]. Следовательно, для трансформатора мощностью 1000 кВ·А и номинального коэффициента запаса 1,1 номинальный ток расцепителя вводного выключателя должен быть не менее 1100 А.

2. Ток срабатывания расцепителя ограничен снизу:

условием отстройки от нагрузки щита при пуске наиболее мощного двигателя

$$I_{ср.расц} \geq k_{зан} [(I_{расч.щита} - I_{дв.макс}) + k_{пуск} I_{дв.макс}],$$

где $I_{дв.макс}$ – номинальный ток наиболее мощного двигателя. При мощности двигателя 160 кВт получим условие

$$I_{ср.расц} \geq 1,3 [(0,7 \cdot 1440 - 300) + (7,0 \cdot 300)] = 3650 \text{ А};$$

условием отстройки от тока срабатывания расцепителей автоматических выключателей на отходящих присоединениях

$$I_{ср.расц} \geq k_{зан} I_{ср.расц.прис.макс}$$

где $k_{зан}$ – коэффициент запаса; $I_{ср.расц.прис.макс}$ – максимальный из токов срабатывания расцепителей выключателей на отходящих присоединениях. Применительно к присоединению электродвигателя мощностью 160 кВт и автоматическому выключателю с уставкой срабатывания 4160 А получим, исходя из 20%-ного разброса тока срабатывания выключателей и коэффициента возврата, равного 0,8,

$$K_{зан} = 1,2/0,8 = 1,5;$$

$$I_{ср.расц} \geq 1,5 \cdot 4160 = 6240 \text{ А};$$

условием отстройки от группового самозапуска двигателей

$$I_{ср.расц} \geq k_{зан} I_{сз}$$

где $I_{сз}$ – ток группового самозапуска двигателей. При расчете тока группового самозапуска двигателей, считается, что электродвигатели запускаются из состояния покоя

$$I_{сз} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}(X_{сст} + X_{тр} + X_{дв})};$$

$$X_{дв} = \frac{U_{ном.дв}}{\sqrt{3}I_{эв.дв}k_{пуск}}$$

где $X_{сст}$ – эквивалентное сопротивление узла питания.

В типовых проектных решениях используются вводные автоматы с электронными расцепителями. Для них коэффициент запаса от пусковых токов $k_{зан}$ принимается равным 1,3. Кратность пускового тока двигателей $k_{пуск}$ принимается равной 6,5.

Для узла питания с внутренним сопротивлением $X_{сст} = 0,7$ мОм и трансформатора мощностью 1000 кВ·А и сопротивлением $X_{тр} = 13$ мОм ток группового самозапуска двигателей с суммарным номинальным током $I_{эв.дв} = 0,7 \cdot 1440$ А составит

$$X_{дв.пуск} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,7 \cdot 1440 \cdot 6,5} = 0,033 \text{ Ом}$$

$$I_{сз} = \frac{400}{\sqrt{3}(0,7 + 13 + 33)} = 4,95 \text{ кА.}$$

Ток отстройки, рассчитанный по данному условию, составит

$$I_{ср.расц} \geq 1,3 \cdot 4950 = 6435 \text{ А.}$$

Таким образом, условие отстройки от тока группового самозапуска является определяющим при выборе уставки вводного автомата. Учитывая, что ток однофазного дугового КЗ даже на шинах главного распределительного щита не превышает 12 кА, коэффициент чувствительности вводного выключателя к таким КЗ будет равняться $12/(1,3 \cdot 4,95) = 1,86$, что близко к минимально допустимому значению.

При реальных процессах самозапуска, с одной стороны на величину тока будет влиять то, что двигатель за время перерыва питания не полностью останавливается, а продолжают вращаться. С другой стороны, напряжение на выбегающих электродвигателях будет по фазе смешаться относительно напряжения на обмотке резервного трансформатора и, в пределе, они могут оказаться в противофазе, что приведет к увеличению тока почти в 2 раза по сравнению с пусковым током заторможенных электродвигателей. В процессе выбега и самозапуска возможно отключение электродвигателей из-за снижения напряжения на катушках магнитных пускателей ниже напряжения удержания. По данным производителей это напряжение составляет для различных типов контакторов от 30 до 70% номинального. Некоторые контакторы оснащаются магнитными защелками, которые удерживают их во включенном состоянии, даже когда напряжение полностью отсутствует. Таким образом, реальные значения токов самозапуска могут быть как меньше расчетных, так и больше.

Для повышения точности выбора уставок автоматических выключателей целесообразно усовершенствовать методику расчета токов самозапуска электродвигателей напряжением 0,4 кВ. Возможно, для расчета придется использовать специальные компьютерные программы.

Сверху ток срабатывания мгновенного расцепителя вводного выключателя ограничен условием обеспечения резервирования автоматических выключателей, устанавливаемых в присоединениях к шинам распределительного щита. Для обеспечения надежной защиты электроустановок от КЗ необходимо предусмотреть возможные отказы отдельных защитных аппаратов. Для этого используется дальнейшее или ближе резервирование защитных аппаратов. К сожалению, в проектной практике часто резервирование автоматических выключателей

подменяется резервированием мгновенных расцепителей обратнoзависимыми (“тепловыми”) расцепителями. Такое резервирование называется ближним. Однако в этом случае при отказе дугогасительной системы выключателя, при спекании главных контактов или при повреждении общих элементов расцепителей КЗ не отключается ни основной защитой, ни резервной.

Реальное ближнее резервирование может быть обеспечено только путем применения плавких предохранителей или дополнительных автоматических выключателей, последовательно включаемых с основным автоматическим выключателем непосредственно по месту его установки. Наилучшим вариантом резервирования защитных аппаратов является дальнейшее резервирование. Оно обеспечивается защитными аппаратами, устанавливаемыми на головных участках групповых кабельных линий, и вводными автоматическими выключателями.

Уставка резервного автоматического выключателя должна проверяться на чувствительность к КЗ в конце зоны защиты смежного выключателя, расположенного ниже относительно источника. В проектной практике не всегда одинаково формулируются расчетные условия для проверки чувствительности резервных защитных аппаратов. Иногда расчетным видом КЗ считают многофазное металлическое КЗ. Аргументируется это тем, что даже, если в начальной стадии КЗ является однофазным дуговым, то оно быстро переходит в двух- или трехфазное. Затем предполагается, что происходит сваривание металлических токоведущих элементов и КЗ становится металлическим. Такой подход к проверке чувствительности резервного аппарата не подтвержден ни опытом эксплуатации, ни теоретическими соображениями. В соответствии с законами физики при КЗ на проводники с током действуют силы, стремящиеся разнести их друг от друга, электрическая дуга стремится удлинить и переместиться в направлении от источника. Возможно, что в частных случаях возможен переход дугового КЗ в металлическое, но рассматривать такой случай в качестве расчетного неоправданно. Таким образом, при проверке чувствительности резервных автоматических выключателей следует ориентироваться на однофазные и двухфазные дуговые КЗ.

Очевидно, затяжные однофазные КЗ могут переходить в многофазные, но в настоящее время нет надежных данных о продолжительности такого перехода и надо стремиться отключать КЗ не дожидаясь, когда оно перейдет в более тяжелую и опасную стадию. На шинах щитов и сборок дуговое КЗ может существовать длительное время без перехода в многофазное и тем более маловероятен его переход в металлическое КЗ. Коэффициент чувствительности резервных автоматических выключателей должен быть таким же, как и основ-

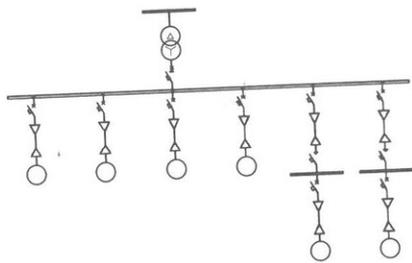


Рис. 1. Типовая схема построения сети 0,4 кВ

ных выключателей, и не менее чем на 10% превышать коэффициент разброса тока срабатывания. В случае отсутствия данных о коэффициенте разброса следует обеспечивать коэффициент чувствительности не менее 1,5.

С учетом изложенного можно утверждать, что мгновенные расцепители вводных автоматических выключателей не могут резервировать выключатели в отходящих от щита с.н. присоединения. Минимально необходимый для надежной работы вводного автоматического выключателя уровень тока КЗ, исходя из приведенных ранее данных, составляет 9,65 кА. При однофазных дуговых КЗ требуемый уровень тока КЗ недостижим даже при коротких замыканиях на головных участках отходящих от щита кабельных линий. Не обеспечено резервирование выключателей присоединений щита и при многофазных дуговых КЗ.

Применительно к кабельной линии с алюминиевыми жилами сечением 95 мм² требуемый уровень тока КЗ можно ожидать только при удаленности места КЗ от щита не более чем на 5 м при двухфазных дуговых КЗ и не более чем на 12 м при трехфазных дуговых КЗ. Реальные кабельные линии имеют длину 300 – 500 м, а иногда и больше. Для резервирования выключателей при однофазных КЗ широко применяются выносные защиты, реагирующие на ток в нейтрали трансформатора. Эти защиты обычно имеют большую выдержку времени, соизмеримую с временем перехода однофазных КЗ в двух- или трехфазные. Таким образом, имеется реальная опасность возникновения затяжных двух- или трехфазных КЗ.

Рассмотрим несколько вариантов решения проблемы резервирования выключателей:

- А – увеличение сечения кабелей;
- В – секционирование сборных шин щита;
- С – увеличение числа ступеней защиты;
- Д – применение выносной защиты от многофазных КЗ;
- Е – использование в качестве резервной защиты обратноточных расцепителей;

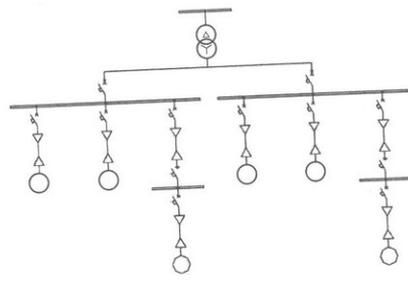


Рис. 2. Секционированный щит с.н.

Ф – применение резервной релейной защиты, реагирующей на токи в присоединениях распределительного щита;

Г – последовательное включение двух защитных аппаратов.

Вариант А может быть эффективным только при небольшом числе присоединений к щиту и при большой единичной мощности нагрузок. В этом случае (рис. 1) сечение кабелей, определенное, исходя из расчетной нагрузки, не будет значительно отличаться от сечения, необходимого по условию обеспечения чувствительности резервной защиты. Однако в большинстве случаев наиболее многочисленными присоединениями щитов являются кабельные линии вторичных сборок и сборок РТЗО с малой расчетной нагрузкой и длиной 150 – 200 м. В таких схемах увеличение сечения кабелей может оказаться экономически не оправданным.

Вариант В предполагает использование вместо одного вводного выключателя двух (рис. 2) или даже трех. Соответственно увеличивается число секций на распределительном щите. При этом увеличение чувствительности резервной защиты можно получить за счет уменьшения расчетной нагрузки секций и уменьшения токов группового самозапуска двигателей. Кроме того, появляется возможность распределить нагрузки по секциям так, чтобы на секциях были собраны кабели, близкие по сечениям.

Вариант С предполагает увеличение числа вторичных распределительных щитов (рис. 3). Мощности вторичных щитов можно оптимизировать по условию координации сечений кабелей по длительно допустимому току и по чувствительности резервных защит. Вторичные щиты должны располагаться в непосредственной близости от главного распределительного щита. К недостаткам варианта С относятся увеличение времени срабатывания вводного автоматического выключателя и возрастание общего числа коммутационной аппаратуры.

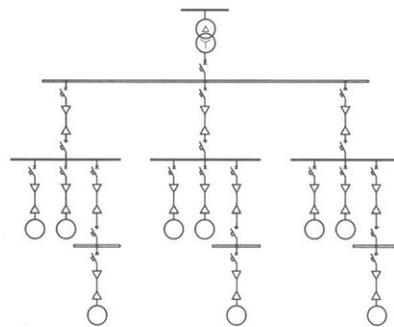


Рис. 3. Сеть с.н. с дополнительными вторичными распределительными щитами

Вариант D предусматривает использование вводного автоматического выключателя для резервирования защиты только начальных участков кабелей, а для резервирования защиты от КЗ в конце кабельных линий используется выносная релейная защита, уставка по току срабатывания которой отстраивается только от нагрузки секции, а отстройка от пусковых токов электродвигателей обеспечивается задержкой времени срабатывания. Недостатком данного варианта является увеличение продолжительности провалов напряжения, утяжеляющих самозапуски двигателей и снижающих надежность работы электронных устройств контроля и управления.

Возможности дальнейшего резервирования, основанного на использовании “теплового” расцепителя (вариант Е), ограничены длиной защищаемого участка кабельной линии. Для надежной работы “теплового” расцепителя необходим ток КЗ, превышающий в 3 раза номинальный ток расцепителя. Следовательно, существенного выигрыша при использовании такого варианта резервной защиты получить не удастся.

Можно реализовать дальнейшее резервирование автоматических выключателей в присоединениях распределительного щита с помощью релейной аппаратуры по варианту F (рис. 4). В этом варианте селективность работы выключателей обеспечивается за счет отстройки времени пуска независимого расцепителя вводного выключателя по отношению к времени срабатывания мгновенных расцепителей выключателей присоединений. Уставка по току резервной защиты каждого присоединения выбирается равной уставке основной защиты присоединения, но время срабатывания увеличивается на ступень селективности по отношению к максимальному времени срабатывания выключателей в отходящих от щита присоединениях. Этот вариант легко реализовать в щитах комплектной трансформаторной подстанции (КТП) с.н., так как

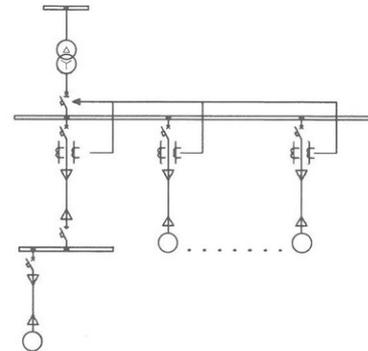


Рис. 4. Резервирование автоматических выключателей на основе релейных схем

в них можно найти место для дополнительных трансформаторов тока и реле. Недостатком этого варианта является увеличение риска ложной работы резервной защиты из-за увеличения числа аппаратуры и создания связей между присоединениями и вводом питания.

Наиболее перспективным вариантом решения проблемы резервирования автоматических выключателей является вариант G. При последовательном включении двух защитных аппаратов в отходящие от щита присоединения обеспечивается надежное ближнее резервирование. В качестве резервного аппарата можно использовать как автоматические выключатели, так и плавкие предохранители. Использование плавких предохранителей позволяет снизить требования по предельной коммутационной способности к включенным за ними автоматическим выключателям, что уменьшит их стоимость. При реконструкции действующих электроустановок этот вариант решения проблемы резервирования защит является особенно выгодным, так как не требует перекомпоновки помещений, а в некоторых случаях даже щитов.

Большое влияние на надежность и живучесть электроустановок с.н. электростанций оказывает правильность расчетных условий при выборе защитных аппаратов и проводников. Перед выполнением расчета КЗ необходимо корректно определить цель расчета и при подготовке исходных данных обеспечить соответствие расчетных условий цели расчета. Следует определить: расчетную схему, место, вид, продолжительность КЗ и предшествующий режим.

Выбор расчетной схемы производится на основе анализа коммутационных состояний электроустановки. Для расчетов, нацеленных на получение максимальных значений тока КЗ, в расчетную схему следует включить максимально возможное число источников наибольшей мощности и наимень-

шей электрической удаленности от места КЗ. Рассматриваются лишь продолжительные коммутационные состояния: нормальное рабочее, работа от резервного источника, ремонтное. Кратковременные коммутационные состояния, возникающие в процессе выполнения оперативных переключений не рассматриваются.

Выбор места КЗ обычно диктуется действующими отраслевыми нормами. Для проверки на термическую стойкость и невосгораемость государственными стандартами рекомендуется рассматривать КЗ в начале кабельной линии, в отраслевых нормах может быть предусмотрено удаление места КЗ от начала линии.

При проверке низковольтных автоматических выключателей и плавких предохранителей на отключающую способность ток рассчитывается при КЗ на зажимах аппарата со стороны наиболее мощного источника. Если генерирующие элементы схемы имеются с обеих сторон проверяемого защитного аппарата, то составляющая тока КЗ от элементов со стороны менее мощных источников не учитывается.

При проверке чувствительности защитных аппаратов место КЗ выбирается за наиболее электрически удаленным защитным аппаратом следующего уровня защиты или на зажимах конечного электроприемника. Одна и та же точка КЗ может быть расчетной точкой при проверке чувствительности основного защитного аппарата и резервного аппарата как в случае ближнего, так и в случае дальнего резервирования.

Выбор вида КЗ в электроустановках напряжением до 1000 В также зависит от цели расчета. Металлические трехфазные КЗ обычно являются расчетным видом КЗ при проверке на отключающую способность защитных аппаратов, термическую стойкость и невосгораемость кабелей. Дуговые однофазные КЗ – расчетный вид КЗ при проверке на чувствительность защитных аппаратов. Однако в редких случаях ток однофазного КЗ может оказаться больше тока трехфазного, тогда чувствительность следует проверять по трехфазному КЗ.

При проверке коммутационных аппаратов и проводников на термическую стойкость следует учитывать зависимость времени отключения КЗ от силы тока. Интеграл Джоуля при затяжном дуге в трехфазном КЗ может иметь значение больше, чем при металлическом.

Продолжительность КЗ зависит от отключающей его защиты. КЗ могут отключаться быстродействующими защитами, а при их неисправности – резервными, с выдержкой времени. При проверке проводников и аппаратов на термическую стойкость продолжительность КЗ определяется временем срабатывания самой медленной защиты и полным временем отключения выключателя. В низковольтных электроустановках в качестве резервной защиты иногда используются обратнот-

висимые (“тепловые”) токовые расцепители, что может существенно увеличить продолжительность КЗ и должно учитываться при проверке кабелей на невосгораемость.

При проверке чувствительности быстродействующих автоматических выключателей продолжительность КЗ следует задавать по времени отключения выключателя, указанному в его паспорте или каталоге. Большинство обычных, нетокоограничивающих выключателей имеют номинальное время отключения 40 мс, однако в эксплуатации еще много выключателей с временем отключения 100 мс. Актуальность учета времени отключения автоматических выключателей обусловлена явлением теплового спада тока КЗ в электроустановках напряжением до 1000 В. Даже через 40 мс при небольших сечениях жил кабеля ток КЗ может уменьшиться на 10% и более.

При отключении КЗ плавкими предохранителями или выключателями со ступенчатой защитной характеристикой, т.е., когда время отключения зависит от величины тока КЗ, следует сначала считать ток в начальный момент КЗ, определить по нему ориентировочное время срабатывания защитного аппарата, а затем, задав новое значение продолжительности КЗ, получить уточненное значение тока КЗ. Если защитный аппарат срабатывает на участке защитной характеристики, относящейся к зоне перегрузок, то время срабатывания надо пересчитать через рассчитанный программой интеграл Джоуля. Для этого по значению интеграла Джоуля и продолжительности КЗ, для которой он был рассчитан, определяется среднеквадратичное значение тока КЗ. Затем по защитной характеристике уточняется продолжительность КЗ и для нее повторно выполняется расчет.

Предшествующий режим оказывает на ток КЗ заметное влияние. Активная составляющая сопротивления кабелей зависит от температуры жил, которая в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды и от силы тока в режиме, предшествовавшем КЗ. В справочниках сопротивление кабелей указывается либо для 20°C, либо для температуры изоляции, соответствующей длине для температуры токама. Если кабель имеет поливинилхлоридную изоляцию с длительно допустимой температурой 65°C (или 70°C по новым нормам), то значения активных сопротивлений кабелей в разных справочниках могут отличаться на 18–20%. При прокладке кабелей в кабельных каналах и галереях температура жил кабелей зимой может понижаться до минус 30–40°C, что приводит к уменьшению сопротивления более чем на 20%. Выполняя расчет токов КЗ, следует в соответствии с целью расчета корректно выбрать предшествующий режим: для расчета минимальных токов следует ориентироваться на максимальные начальные температуры жил, при расчете макси-

мальных токов – на минимальные температуры жил.

На результат расчета КЗ оказывает влияние и режим вращающихся машин в момент, предшествующий КЗ. Для получения верхней оценки тока КЗ следует ориентироваться на XX асинхронных электродвигателей и на работу с номинальной мощностью синхронных машин. Наоборот для получения нижней оценки тока КЗ следует ориентироваться на XX синхронных машин и на работу с номинальной мощностью асинхронных электродвигателей в режиме, предшествовавшем КЗ.

При ручных расчетах КЗ детальный учет расчетных условий затруднен, так как требуется многократно пересчитывать параметры элементов схемы замещения, выполнять эквивалентные преобразования схемы. Часто ограничиваются расчетом явно завышенных значений тока и по ним выбирается или проверяется электротехническое оборудование. В конечном итоге это приводит к завышению стоимости электроустановки. При компьютерном расчете КЗ затраты времени невелики и вваривание расчетных условий оказывается оправданным, так как позволяет избавиться от неоправданно завышенных расчетных токов.

При проверке автоматических выключателей и плавких предохранителей по отключающей способности расчетные условия должны обеспечить получение максимально возможного значения тока КЗ на зажимах аппаратов, обращенных в сторону наиболее мощного источника питания.

Недопустимо выбирать расчетную точку КЗ за коммутационным аппаратом, так как это не будет соответствовать условиям проведения испытаний коммутационных аппаратов, предусмотренных [6]. По [6] калибровка испытательной установки производится без учета наличия у коммутационных аппаратов внутреннего сопротивления.

На выбор расчетного вида КЗ оказывает влияние схема соединения обмоток силового трансформатора. При использовании трансформаторов, у которых обмотка высокого напряжения соединена в треугольник, ток однофазного металлического КЗ на шинах щита переменного тока может оказаться больше тока трехфазного металлического КЗ. Это объясняется тем, что из схемы замещения нулевой последовательности исключаются элементы высоковольтной части электроустановки. Электродвигатели, непосредственно подключенные к шлту переменного тока, увеличивают ток трехфазного металлического КЗ на шинах щита, но уменьшают ток однофазного КЗ. Следовательно, при проверке отключающей способности защитных аппаратов следует сравнить результаты расчета токов однофазного и трехфазного металлических КЗ на шинах щита переменного тока.

Отключающая способность автоматических выключателей и плавких предохранителей зависит от соотношения индуктивного и активного сопро-

тивлений в петле КЗ. Для аппаратов переменного тока нормируется минимальное значение коэффициента мощности тока КЗ, а для аппаратов постоянного тока – максимальное значение постоянной времени аperiodической составляющей тока КЗ. Следует обратить особое внимание на соответствие коэффициента мощности или постоянной времени нормированным значениям для аппаратов за токоограничивающими реакторами и за протяженными шинными конструкциями.

Проверка термической стойкости и невосгораемости кабелей должна производиться по наибольшему расчетному значению интеграла Джоуля.

При проверке кабелей на термическую стойкость действующие стандарты рекомендуют выбирать расчетную точку КЗ на головном участке кабельной линии непосредственно за оконцевателем кабелей. Расчетный вид КЗ для проверки термической стойкости кабелей в действующих стандартах не оговаривается. Исходя из опыта эксплуатации [7] и учитывая характер электродинамического действия токов КЗ на жилы кабеля в зоне повреждения, все КЗ в кабелях могут быть только дуговыми. Следовательно, расчетным при проверке кабелей по термической стойкости и невосгораемости следует считать дуговое КЗ. При наличии в кабельной линии нескольких параллельно работающих кабелей весь ток дугового КЗ надо относить к одному кабелю. Однако, учитывая, что КЗ может быть вызвано металлической перемычкой, установленной и забытой персоналом в процессе выполнения ремонтных работ, термическую стойкость кабелей необходимо проверить и по расчетному значению интеграла Джоуля металлического КЗ в конце кабельной линии. В этом случае при КЗ за пучком кабелей ток распределяется по всем кабелям линии поровну. На относительно коротких линиях определяющим будет металлическое КЗ в конце кабельной линии, а на протяженных линиях – дуговое КЗ на головном участке.

Расчетная продолжительность КЗ при проверке термической стойкости кабелей задается, исходя из полного времени отключения КЗ основной защитой. Обычно основной защитой от КЗ является расцепитель автоматического выключателя, реагирующий на мгновенные значения токов. Защита групповых кабельных линий электропитания вторичных или третичных сборок осуществляется автоматическими выключателями с задержкой отключения, что утяжеляет условия проверки. Полное время отключения КЗ складывается из времени задержки расцепителя и полного времени отключения выключателя.

Расчетная продолжительность КЗ при проверке невосгораемости кабелей задается, исходя из полного времени отключения КЗ резервной защитой. В качестве резервной защиты в низковольтных электроустановках иногда используются расцепители с обратнотзависимой защитной характе-

ристикой, например, "тепловые" расцепители. В этом случае рекомендуется проверить невозгораемость кабелей и для точки КЗ, находящейся в конце кабельной линии за резервируемым защитным аппаратом. Из-за увеличения времени задержки отключения КЗ, обусловленной снижением тока КЗ, интеграл Джоуля для КЗ в конце линии может оказаться больше интеграла Джоуля, рассчитанного для КЗ в начале линии.

При расчете нагрева кабелей токами КЗ следует учитывать факторы, несвободно действующие при КЗ: тепловой спад тока, теплообмен между жилами и изоляцией кабеля, температуру окружающей среды и др. Это позволит избежать неоправданного завышения сечения кабелей.

Проверка чувствительности защитных аппаратов производится по минимальному расчетному значению тока КЗ, протекающему через аппарат или через датчик тока, при использовании выносной защиты. Проверка должна проводиться отдельно для основной и для резервной защит. При отсутствии надежных данных о разбросе параметров срабатывания проверяемого автоматического выключателя минимально допустимым рекомендуется считать коэффициент чувствительности 1,5.

При проверке защит одиночных присоединений расчетная точка КЗ должна находиться в конце кабельной линии на зажимах электроприемника. При проверке защит групповых присоединений расчетная точка должна находиться за защитным аппаратом следующего уровня защиты. Учитывая, что на вторичных сборках имеются аппараты с разными параметрами, расчетную точку следует размещать за аппаратом, имеющим наибольшее внутреннее сопротивление. Обычно таким аппаратом является автоматический выключатель присоединения с минимальным номинальным током.

При выборе расчетной схемы для оценки минимального значения тока КЗ необходимо проанализировать все варианты схем электроустановки, возможные во время эксплуатации. Обычно ток КЗ существенно снижается при переводе электропитания с основного источника на резервный.

Оценка возможных значений тока КЗ снизу менее достоверна, чем оценка возможных значений тока КЗ сверху. Рекомендуется проанализировать последствия КЗ, ток при которых может оказаться меньше расчетного минимального значения. Обычно такие короткие замыкания должны отключаться защитой от перегрузок.

Селективность защитных аппаратов может быть проверена без расчета токов КЗ. Лучшей гарантией селективности защит является отсутствие пересечения защитных характеристик последовательно включенных аппаратов. Сопоставляемые защитные характеристики должны отражать случайный разброс параметров аппаратов и зависи-

мость параметров аппаратов от температуры и других внешних факторов.

Однако на практике возникают ситуации, когда не удастся полностью избежать пересечения защитных характеристик. Тем не менее, защитные аппараты могут работать селективно, если область пересечения характеристик находится за пределами диапазона возможных значений токов КЗ. В случае использования в качестве защитных аппаратов плавких предохранителей избежать пересечения их защитных характеристик в области больших токов невозможно. Именно в такой ситуации приходится выполнять расчет токов КЗ и для проверки селективности защитных аппаратов. Верхнюю границу диапазона возможных значений тока определяют по КЗ за аппаратом ближайшего нижнего уровня защиты. Нижняя граница возможных значений тока принимается равной нулю.

Расчет продолжительности и глубины провала напряжения, вызванных КЗ, выполняется с целью оценки влияния КЗ на устойчивость функционирования электроприемников. Например, для обеспечения устойчивой работы компьютерного оборудования, питающегося от сети переменного тока, рекомендуется ограничить провалы до 70% номинального напряжения при их продолжительности до 500 мс, а более глубокие провалы напряжения должны иметь продолжительность не более 20 мс. Это накладывает жесткие требования на быстрдействие работы защитных аппаратов и требует соответствующей расчетной проверки.

Учет влияния синхронных и асинхронных электродвигателей не сводится только к расчету подпитки двигателями точки КЗ. Если напряжение на сборке, к которой подключен асинхронный двигатель, превышает ЭДС двигателя, то двигатель продолжает отбирать часть тока источника, шунтируя ветвь с КЗ. Такой режим характерен для несимметричных дуговых КЗ.

При трехфазных дуговых КЗ и при трехфазных металлических КЗ в низковольтных электроустановках, если имеется общее для основного источника питания и двигателя сопротивление, напряжение на котором оказывается меньше ЭДС двигателя, в течение приблизительно 20 мс двигатель подпитывает ветвь КЗ, а затем оказывает на нее шунтирующее действие, уменьшая ток в ней [8]. Учитывая шунтирующее действие двигателей следует при проверке чувствительности защитных аппаратов. Для этого в схеме замещения двигателя можно представить их пусковыми сопротивлениями без ЭДС. При расчете интегралов Джоуля для проверки термической стойкости кабелей и при расчете тока для проверки отключающей способности защитных аппаратов оправдано применение компьютерных программ, моделирующих электромеханические переходные процессы в асинхронных двигателях.

Для учета влияния сопротивления электрической дуги совместно с другими факторами, влияющими на ток КЗ, удобно воспользоваться аппроксимирующей функцией, полученной путем математических преобразований выражения (42) из [1] и представить выражение сопротивления дуги R_d в функции тока дуги I_d (в килоамперах) следующим образом:

$$R_d = \frac{47}{I_d^{0,28}} - 15.$$

Использование функции $R_d(I_d)$ упрощает учет электрической дуги при расчете несимметричных дуговых КЗ и при комплексном учете влияния на ток КЗ совокупности различных факторов. Полученное сопротивление дуги следует вводить во все схемы замещения симметричных составляющих. Величина сопротивления дуги определяется по току в поврежденной фазе.

Расчет токов КЗ с учетом электрической дуги и теплового спада тока производится методом последовательных приближений. Начальное значение тока дуги рекомендуется принимать равным половине силы тока металлического КЗ. Для получения результатов расчетов с погрешностью, не превышающей 1%, как правило, достаточно 3 – 5 итераций.

При выполнении расчетов с учетом сопротивления электрической дуги необходимо учитывать ограниченность области задания аппроксимирующей функции (42) [1].

Выводы

1. Для повышения надежности и живучести низковольтных электроустановок с.н. необходимо

Технико-экономический анализ параметров распределительных электрических сетей городов с учетом их развития

Киселев А. Н., канд. техн. наук, Глазунов А. А., доктор техн. наук
Московский энергетический институт (Технический университет)

Современное развитие систем электроснабжения городов (СЭСГ) и значимость оптимизационного анализа их структур и параметров определяются ростом числа городов и их населения, интенсивной динамикой состава и установленной мощности электроприемников. Все перечисленное определяет увеличение электрических нагрузок и в связи с этим постоянное развитие электрических сетей во времени и по территории города.

активизировать работы в направлении совершенствования методик расчета токов КЗ и их термического и электродинамического действия на электротехническое оборудование.

2. При выборе защитных аппаратов и проводников необходимо руководствоваться современными нормативно-техническими документами, государственными стандартами и отраслевыми указаниями.

3. В качестве защитных аппаратов в низковольтных электроустановках целесообразно шире использовать плавкие предохранители.

Список литературы

- ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.
- ГОСТ 28895-91 (МЭК 949 – 88). Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева.
- Методические указания по расчету токов короткого замыкания в сети напряжением до 1 кВ электростанций и подстанций с учетом влияния электрической дуги. М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 1993.
- Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Неклепаев Б. Н., Крючков И. П., Жуков В. В., Кузнецов Ю. П. М.: Изд-во "НЦ ЭНАС", 2001.
- Зильберман В. А. Релейная защита сети с.н. атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1992.
- ГОСТ Р 50030.1-2000 (МЭК 60947-1-99). Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 1. Общие требования и методы испытаний.
- Гусев Ю. П., Шлиша М. А. Проверка кабелей электроустановок напряжением до 1 кВ на термическую стойкость и невозгораемость. – Электро, 2001, № 1.
- Гусев Ю. П., Чо Г. Ч. Снижение чувствительности защитных аппаратов в низковольтных электроустановках из-за шунтирующего эффекта асинхронных двигателей. – Вестник МЭИ, 2003, № 6.

Для оценки оптимальности системы электроснабжения необходимо определение параметров, обеспечивающих минимум или максимум некоторого критерия эффективности на определенном временном отрезке существования системы.

Реализация исследований экономически целесообразного развития распределительных электрических сетей городов (РЭСГ) требует:



18-21 октября

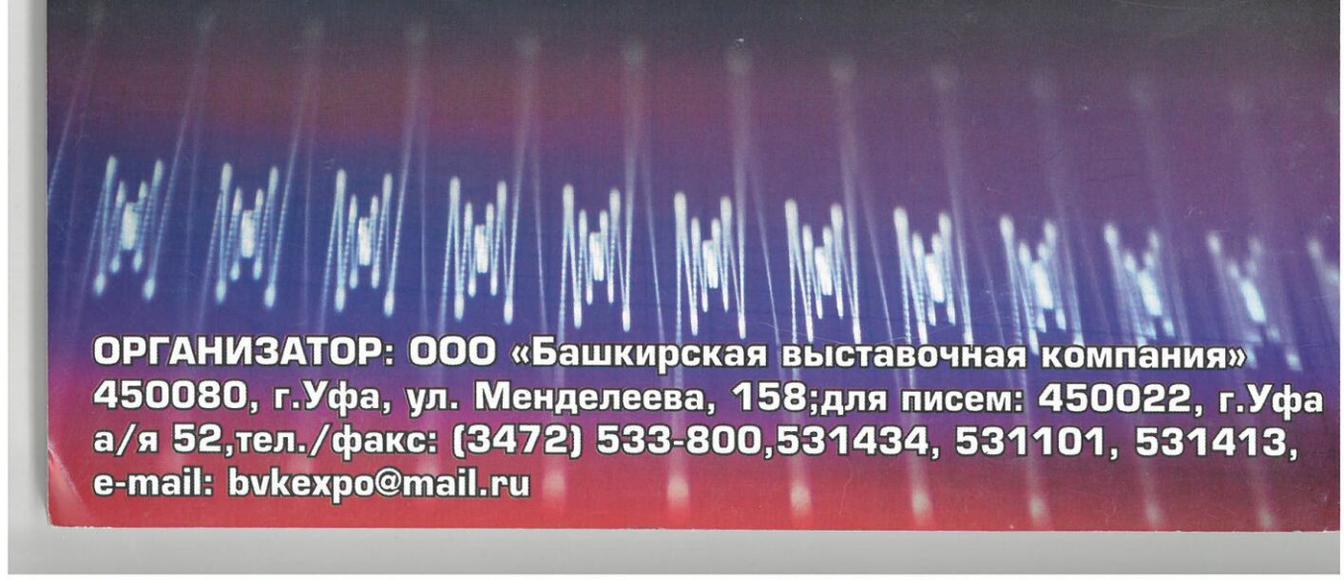
г. Уфа

XI международная специализированная выставка

ЭНЕРГЕТИКА УРАЛА-2005

III международная специализированная выставка

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ-2005



**ОРГАНИЗАТОР: ООО «Башкирская выставочная компания»
450080, г.Уфа, ул. Менделеева, 158; для писем: 450022, г.Уфа
а/я 52, тел./факс: (3472) 533-800, 531434, 531101, 531413,
e-mail: bvkepro@mail.ru**