

ISSN 1995-5685

ЭЛЕКТРО

2'2012

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА • ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

СОВРЕМЕННЫЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКИ ОРУ И ЗРУ 35-750 кВ

Долин А.П., канд. техн. наук., Егорова Л.Е.

Рассмотрены отечественные демпфирующие устройства жесткой ошиновки ОРУ, применяемые на действующих подстанциях для гашения эоловых вибраций, а также конструктивные особенности ошиновки. Представлено описание динамического гасителя колебаний типа «бабочка», разработанного НТЦ «ЭДС», а также результаты его расчетов и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: открытые распределительные устройства; напряжения 35-750 кВ; жесткая ошиновка; эоловые вибрации; ветровые резонансные колебания; демпфирующие устройства

В настоящее время различными производителями предлагается большой выбор конструкций жесткой ошиновки ЗРУ и ОРУ 35-500 кВ, прошедших аттестации в ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «Холдинг МРСК», ООО «Газпромэнергоконтроль» и др. Тем самым при проектировании распределительных устройств (РУ) современных электростанций и подстанций все чаще используют жесткие шины, применение которых позволяет снизить стоимость строительства объекта, сократить сроки его возведения, а также улучшить условия его эксплуатации [1, 2].

Отечественные заводы-изготовители: ЗАО «ГК «Электроцит-Самара», ЗАО «ЗЭТО», ЗАО «КТП-Урал» и др. поставляют жесткую ошиновку напряжением 35-500 кВ (рис. 1) полной заводской готовности. Все конструкции жесткой ошиновки должны проходить ряд испытаний и аналитических проверок в соответствии с требованиями стандартов [3, 4].

Согласно этим требованиям изоляторы и шины, в частности, должны отвечать следующим условиям:

– по допустимым статическим прогибам

$$y_{ст.маx} \leq y_{ст.доп.}, \quad (1)$$

где $y_{ст.маx}$ – наибольший прогиб шин от собственной массы и силы тяжести ответвлений (с учетом и без учета гололеда); $y_{ст.доп}$ – допустимый статический прогиб шины с учетом и без учета гололеда, равный соответственно 1/80 и 1/100 длины шины между опорами [4];

– по прочности материалов при действии ветровых, гололедных и электродинамических воздействий, в том числе при неуспешных АПВ, а также при их сочетании

$$\sigma_{маx} \leq \sigma_{доп.}; \quad (2)$$

$$\sigma_{маx,св} \leq \sigma_{доп.св}; \quad (3)$$

$$F_{маx} \leq F_{доп.}; \quad (4)$$

где $\sigma_{маx}$ и $\sigma_{доп.}$ – максимальное расчетное и допустимое напряжение в материале шин; $\sigma_{маx,св}$ и $\sigma_{доп.св}$ – макси-

Domestic damping devices for outdoor switchgear rigid busbars used in operating substations for Aeolian vibration suppression are disclosed as well as design features of rigid busbars. Type “butterfly” dynamic vibration suppressor developed by Scientific & Technological Centre “EDS” and results of its designing and experimental testing are described.

Keywords: outdoor switchgears; 35-750 kV tensions; rigid busbars; Aeolian vibration; wind-driven resonance vibration; damping devices



Рис. 1. Жесткая ошиновка распределительных устройств
а – ПС «Ковдорский ГОК» – жесткая ошиновка производства ЗАО ПФ «КТП- Урал»;
б – ПС «Грибово» – жесткая ошиновка производства ЗАО «ЗЭТО»

мальное расчетное и допустимое напряжение в области сварного шва шины; F_{\max} и $F_{\text{доп}}$ – максимальная расчетная и допустимая силы (нагрузки) на изоляторы; – по нагреву в рабочих режимах и при протекании сквозных токов короткого замыкания (КЗ)

$$v \leq v_{\text{доп.}}; \tag{5}$$

$$v_{\text{КЗ}} \leq v_{\text{КЗ.доп.}}; \tag{6}$$

где v , $v_{\text{доп.}}$ – температура нагрева шины в рабочих режимах и допустимое значение соответственно; $v_{\text{КЗ}}$, $v_{\text{КЗ.доп.}}$ – конечная (наибольшая) и допустимая (кратковременная) температура шин при КЗ.

Исходя из условий (2) и (3) российские производители, как правило, применяют шины из алюминиевого сплава 1915Т, имеющего высокие прочностные характеристики при относительно большом удельном электрическом сопротивлении ρ (табл. 1).

Таблица 1
Прочностные характеристики алюминиевых сплавов

Сплав	$\sigma_{\text{в}}$ МПа	$\sigma_{\text{в.св}}$ МПа	$\sigma_{\text{доп.}}$ МПа	$\sigma_{\text{св.доп.}}$ МПа	ρ Ом
1915Т	353	318	247	223	0,0517
АВТ1	304	152	213	106	0,038
АД31Т1	127	120	89	84	0,035
6063-Т6	215	–	151	–	0,033

Однако проведенные авторами расчеты и анализ результатов испытаний ошиновки показывают, что в РУ 35 кВ при длине пролета 6-8 м, как правило, оправдано применение сплавов с более высокой проводимостью, чем 1915Т, например, АВТ1, АД31Т1 или зарубежного сплава 6063-Т6. При этом, например, в типовых схемах КТПБ – 35 кВ замена сплава обеспечивает снижение материалоемкости ошиновки при соблюдении всех требований стандартов [3-4].

Кроме того, в ОРУ 110 кВ, а в ряде случаев 220-500 кВ при рабочих токах 3150 А и более также оказывается возможным и экономически оправданным применение сплавов с более высокой проводимостью. При этом особое внимание приходится уделять выполнению условия (3), поскольку у алюминиевых сплавов, закаленных и искусственно состаренных (АВТ1, АД31Т1) в зоне сварного шва, происходит большее снижение прочности, чем у сплава 1915Т [4].

В табл.1 приведены прочностные характеристики всех указанных выше сплавов, а также их удельное электрическое сопротивление ρ при температуре 20 °С.

Следует отметить, что использование сплавов АВТ1, АД31Т1, 6063-Т6 позволяет снизить диаметр и сечение шины. Результаты расчетов показывают возможность применения менее прочных сплавов для сборных шин напряжением 110-220 кВ при рабочих токах 3150 А и более, а также шин внутрикачковых связей – 330-500 кВ при токах более 2000 А и ударных токах КЗ по крайней мере 128 кА.

Определяющим для выбора типа изоляторов является длина пути утечки (рабочее напряжение) и условие прочности (4). На рынке РФ представлен достаточно широкий ассортимент отечественных фарфоровых и полимерных опорных изоляторов напряжением 110-

220 кВ. Однако, как правило, они имеют прочность до 10-12,5 кН. Более прочные изоляторы на указанные и более высокие классы напряжения (330-750 кВ) представлены исключительно зарубежными производителями (например, фирмой "LAPP").

Ранее разработка разнообразных конструктивных решений жесткой ошиновки ограничивалась отсутствием специальной арматуры для жестких шин, особенно шин внутрикачковых связей. До настоящего времени отечественные заводы-изготовители жесткой ошиновки сталкиваются с трудностями предоставления широкого спектра шиносоединительных узлов для шин различных диаметров, узлов присоединения шин к аппаратам, ответвлений от шин и т.д. Зачастую и по качеству и особенно по ассортименту российские крепежные элементы уступают зарубежным, например, "Arruti"(Испания), "Dalekovod" (Хорватия), "Lorünser" (Австрия) (рис. 2).



Другим важным элементом шинных конструкций являются демпфирующие устройства, необходимые для устранения ветровых резонансных колебаний, а также повышения ветровой и электродинамической стойкости.

Ветровые воздействия на ошиновку вызывают: продольные нагрузки, действующие вдоль оси x (рис. 3) (при которых определяется стойкость ошиновки при наибольших нормированных скоростях ветра), и поперечные нагрузки вдоль оси y при резонансных эоловых колебаниях [4].



Ветровой резонанс жестких шин обусловлен периодическими срывами вихрей (вихрей Кармана), в результате которых на шину действуют периодические силы поперек воздушного потока [4]. Устойчивым резонансным колебаниям предшествуют беспорядочные колебания с малой амплитудой. При резонансной скорости ветра амплитуда постепенно возрастает. Таким образом, при совпадении частоты срыва вихрей с частотой собственных колебаний шины может наступить вихревое возбуждение поперек воздушного потока.

Ветровые резонансные колебания оказывают отрицательное психологическое воздействие на персонал ОРУ, могут приводить к ослаблению болтовых соединений и усталостным повреждениям элементов конструкций, поскольку их продолжительность может быть длительной – практически ежедневной в течение нескольких часов.

Устойчивые эоловые колебания не возникают, если амплитуда колебаний шин при наступлении резонанса не превышает $0,02 D$ мм для шин диаметром $D = 250$ мм и больше; $0,04 D$ – для шин диаметром $D = 90-150$ мм [4]. Приблизительно амплитуду колебаний можно вычислить по формуле

$$y_{p,max} = \frac{c_{y0} \cdot \rho_B \cdot D^3 \cdot r_{1y}^4 \cdot k_2^2}{m \cdot B \cdot \delta_y} \approx 1,08 \frac{\rho_B \cdot D^3}{m \cdot \delta_y}, \quad (7)$$

где c_{y0} – коэффициент аэродинамических нагрузок, который принимается равным 0,8; ρ_B – плотность воздуха, кг/м³; D – внешний диаметр шины, м; r_{1y} – параметр первой частоты собственных колебаний шины (в вертикальной плоскости); k_2 – коэффициент верхней границы резонансной скорости ветра; m – масса шины на единицу длины, кг/м; B – коэффициент пропорциональный жесткости шины; δ_y – логарифмический декремент затухания при колебании шины в вертикальной плоскости.

В соответствии с [5] одним из наиболее эффективных методов борьбы с эоловыми колебаниями является увеличение диссипативных сил, которые удобно характеризовать логарифмическим декрементом затухания δ . По [4] этот параметр для шинных конструкций определяется экспериментально по осциллограммам свободных колебаний шины

$$\delta = \frac{1}{k - m} \ln \frac{A_m}{A_k}, \quad (k > m), \quad (8)$$

где k и m – номера амплитуд свободных колебаний A_m и A_k .

Результирующее рассеяние энергии в шинных конструкциях обусловлено внутренним трением в материале шины, в изоляторах, конструкционным трением в опорах и в формально неподвижных соединениях (болтовых, прессованных, резьбовых), а также действием установленных в шине демпфирующих устройств (гасителей колебаний).

В настоящее время в шинных конструкциях напряжением 35-220 кВ в качестве гасителей колебаний применяется неизолированный провод (трос) марок А и АС, проложенный внутри шины и закрепленный с одной или двух сторон. Прокладка провода обеспечивает увеличе-

ние рассеяния энергии, а, кроме того, увеличение массы шины, что согласно (7) приводит к снижению амплитуды ветровых резонансных колебаний. Поэтому масса демпфирующего провода (троса) должна быть достаточно большой, но в то же время увеличение массы шины, согласно (1), не должно приводить к увеличению статического прогиба шины выше допустимых значений.

Реже в ошиновке 35-220 кВ применяется демпфер-стержень. Длина и количество стержней, закладываемых в трубу, определяются аналогично выбору массы провода.

Однако для длиннопролетных шин ОРУ 330-750 кВ вышеописанные демпферы оказываются недостаточно эффективными для подавления эоловых вибраций. Применение ошиновки 330 и 500 кВ с тремя и четырьмя проводами-демпферами, проложенными внутри трубы, в ряде случаев обеспечивают «отстройку» от ветрового резонанса, однако приводят к экономически и технически неоправданному расходу алюминия, а в ряде случаев к невыполнению условия (1) по статическому прогибу. Прокладка внутри шины до 4 проводов типа АС 500 и АС 630 дискредитирует применение жесткой ошиновки. Вместе с тем, разработаны и успешно применяются специальные гасители вибраций для длиннопролетных конструкций.

В настоящее время внедрено в производство демпфирующее устройство типа «бабочка», разработанное ООО НТЦ «ЭДС» (патент на полезную модель №100859), представляющее собой трос с грузом на концах, который подвешивают к шине снизу, перевешивают через нее сверху (рис. 4, а), либо устанавливают внутри шины-трубы (рис. 4, б).



Рис. 4. Демпфирующее устройство типа «бабочка»

а – с установкой сверху на шине;
б – с установкой внутри шины

Выбор параметров демпфера: длины, площади поперечного сечения, а, соответственно, жесткости троса, массы и формы грузов должен обеспечивать эффективное гашение колебаний при минимальном расходе материалов и удобном (по конструктивным и техническим требованиям) месте установки демпфирующих устройств. Для решения этих задач можно использовать анализ колебаний ошиновки на упрощенной модели, например, в виде системы с двумя или тремя степенями свободы. При установке двух демпферов симметрично относительно середины пролета шины можно использовать двухмассовую модель (рис. 5).

В этом случае колебание шины при ветровом резонансе описывается следующей системой [5]

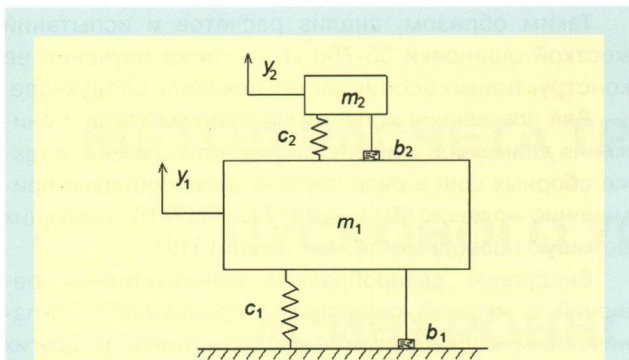


Рис. 5. Расчетная схема системы жесткая ошиновка – демпфер типа «бабочка»

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + (c_1 + c_2) \dot{y}_1 - c_2 \dot{y}_2 + (b_1 + b_2) y_1 - b_2 y_2 = q(y_1); \\ m_2 \ddot{y}_2 - c_2 \dot{y}_1 + c_2 \dot{y}_2 - b_2 y_1 + b_2 y_2 = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где m_1 и m_2 – приведенные массы шины и демпфера; c_1 и c_2 – приведенные жесткости шины и демпфера; b_1 и b_2 – коэффициенты демпфирования шины (без демпфера) и гасителя вибраций; y_1 – перемещение шины в точке подвески демпфера; y_2 – перемещение демпфера; $q_v(y_1)$ – нагрузка, действующая на шину при ветровом резонансе равна [1],

$$q_v(y_1) = \frac{1}{2} \rho_v D V_{py}^2 \left(c_{y0} + \gamma_1 \frac{y_1}{D} + \gamma_2 \frac{y_1^3}{D} + \gamma_3 \frac{y_1^5}{D} \right) \cos(p_y t), \quad (10)$$

где V_{py} – скорость ветра, при которой наступает резонанс поперечных колебаний; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – коэффициенты, примерно равные соответственно 0,17; 1; -0,7; p_y – угловая частота колебаний шинной конструкции по оси y , рад/с ($p_y = 2\pi f_y$).

Начальные условия для решения системы уравнений (9) можно записать в следующем виде

$$y_1(0) = 0; \quad y_2(0) = \Delta_2,$$

где Δ_2 – отклонение демпфера относительно оси шины в состоянии равновесия.

Экспериментальное определение логарифмического декремента затухания жесткой ошиновки проводится при исследовании свободных колебаний шины. Свободные колебания шин описываются системой уравнений (9) с правой частью равной 0 (т.е. $q = 0$).

При этом начальные условия будут следующими

$$y_1(0) = \Delta_1; \quad y_2(0) = \Delta_1 + \Delta_2, \quad (11)$$

где Δ_1 – начальное отклонение шины от ее оси в состоянии равновесия.

Решения системы уравнений (9) при ветровых резонансах и свободных колебаниях проводилось при использовании программы Mathcad. В качестве примера на рис. 6 представлены расчетные осциллограммы ускорений шины и демпферов при свободных колебаниях. Параметры конструкции следующие: длина шины 18 м, внешний/внутренний диаметр 240/230 мм; демпфер типа «бабочка», установленный в двух точках на расстоянии 4,3 м от оси опорных изоляторов. Логарифмический декремент затухания колебаний шины с динамическим гасителем, согласно результатам расчета, равен 0,342.

Исследования показали, что эффект динамического гасителя колебаний зависит от отношения его мас-

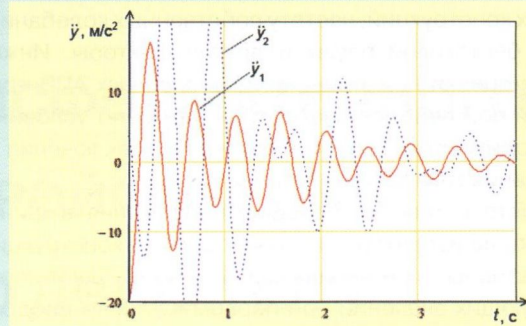


Рис. 6. Расчетные ускорения шины и динамического гасителя типа «бабочка»

сы к величине массы шины, от отношения его частоты к основной частоте колебаний шины, а также от места установки.

На рис. 7 представлены осциллограммы свободных колебаний жесткой ошиновки 500 кВ (длина пролета 18 м) в вертикальной плоскости с демпфером проводом марки АС 500/26, проложенным внутри на всю длину шины и закрепленным с обеих сторон, а также с демпферами НТЦ «ЭДС» типа «бабочка», установленными внутри шины, которые наглядно отображают разницу эффективности гашения колебания с новым демпфером. Экспериментально полученное значение логарифмического декремента затуханий оказалось равным 0,346 и близким к расчетным значениям.

Необходимость установки высокоэффективных демпфирующих устройств на жесткой ошиновке обусловлено воздействием не только ветровых нагрузок, но и требованием электродинамической стойкости при неуспешных АПВ.

При проведении расчета электродинамической стойкости при повторных включениях на КЗ [6] необ-

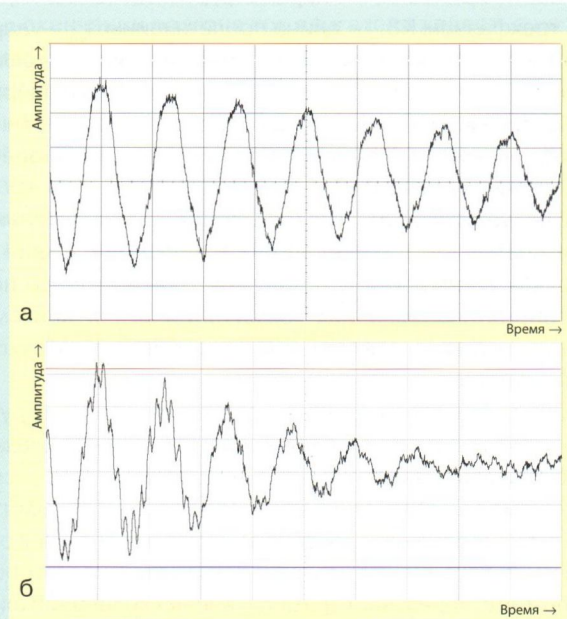


Рис. 7. Осциллограммы свободных колебаний в вертикальной плоскости шины с демпфером проводом (а) и демпфером типа «бабочка» с установкой снаружи шины снизу (б)

ходимо учитывать рассеяние энергии при колебаниях шинных конструкций, частоту собственных колебаний, время бестоковой паузы и другие факторы. Инженерные оценки F_{\max} и σ_{\max} при неуспешных АПВ проводятся при наиболее неблагоприятных по условиям электродинамической стойкости углах включения и отключения тока КЗ.

Вместе с тем, наибольшие напряжения в шине, нагрузки на изоляторы, а также прогибы конструкций при повторных включениях на КЗ не превышают соответствующих значений при первом КЗ, если продолжительность бестоковой паузы, с составляет

$$t_{\text{БП}} \geq \frac{2,3}{f_{1x} \cdot \delta_x}, \quad (12)$$

где δ_x , f_{1x} – декремент затухания и частота собственных колебаний шины, Гц в горизонтальной плоскости.

Если условие (12) не выполняется, то необходима проверка стойкости шинной конструкции по следующим условиям (2), (3) и (4).

Наибольшие напряжения в материале шин и максимальные нагрузки на изоляторы при неуспешных АПВ в соответствии с [1, 4] приводятся к виду

$$\sigma_{\max(\text{max,cb})} = \sigma_{1\max(\text{max,cb})} \theta \gamma = \frac{\alpha l^2}{\lambda a W} i_{\text{уд}}^2 \eta \theta \gamma, \quad (13)$$

$$F_{\max} = F_{1\max} \theta \gamma = \beta \frac{\alpha \cdot l}{a} i_{\text{уд}}^2 \eta \theta \gamma, \quad (14)$$

где $\sigma_1, F_{1\max}$ – наибольшие напряжения и нагрузки при первом КЗ; θ – коэффициент превышения напряжений в материале шин и нагрузок на изоляторы при повторных КЗ; γ – коэффициент, учитывающий вероятность наступления максимальных нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин, а также требований надежности ошиновки; α – параметр, равный $\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ при трехфазном КЗ; l – длина пролета шины; $i_{\text{уд}}$ – ударный ток трехфазного КЗ, А; η – динамический коэффициент; λ и β – параметры, зависящие от условий опирания шин на изоляторы (опоры) пролета; a – расстояние между фазами, м; W – момент сопротивления поперечного сечения шины, м³.

Следует отметить, что коэффициенты превышения (при повторных КЗ) напряжений в материале шин и нагрузок на изоляторы θ получены при наиболее неблагоприятных условиях коммутации [4], и поэтому обеспечивают оценку сверху электродинамической стойкости ошиновки.

Опыт расчетов и испытаний отечественных конструкций жесткой ошиновки напряжением 35–750 кВ показал необходимость введения в расчет коэффициента γ (см. формулы (13), (14)), учитывающего вероятность наступления наиболее неблагоприятных фаз включения и отключения тока КЗ, флуктуации жесткостей изоляторов и, соответственно, частоты собственных колебаний шин и других факторов. С учетом требований к надежности конструкции коэффициент γ оправдано принять равным 0,6–0,7 для класса напряжения 110–220 кВ, 0,7–0,8 – для 330–500 кВ и 0,8–0,9 – для 750 кВ.

Таким образом, анализ расчетов и испытаний жесткой ошиновки 35–750 кВ, а также изучение ее конструктивных особенностей показали следующее.

Для повышения допустимых рабочих токов и снижения диаметров шин внутричейковых связей, а также сборных шин в ряде случаев целесообразно применение сплавов АВТ1, АДЗ1Т1, 6063–Т6, имеющих большую проводимость, чем сплав 1915Т.

Внедрение разнообразных конструктивных решений с жесткой ошиновкой сдерживается ограниченным сортаментом шинодержателей и других элементов шин (прежде всего большого диаметра) отечественных производителей. В сложившейся ситуации целесообразно рассмотреть возможность применения подобных узлов зарубежных производителей, например, “Arruti”, “Dalekovod”, “Lorünser” и др.

Эффективная отстройка ошиновки от ветровых резонансов, а также повышение ее стойкости при ветровых нагрузках и неуспешных АПВ достигается прежде всего применением демпфирующих устройств.

Обеспечение глубокого уровня демпфирования длиннопролетных конструкций жесткой ошиновки напряжением 330–750 кВ требует применения более эффективных демпфирующих устройств, чем провод или стержень, например, типа «бабочка», изготовленных согласно патенту на полезную модель №100859.

Проведенные экспериментальные и аналитические исследования колебаний шин с различными модификациями демпфера типа «бабочка» подтвердили его эффективность и позволили принять к установке на современных конструкциях 330–750 кВ отечественных производителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долин А.П., Шонгин Г.Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Долин А.П., Егорова Л.Е. Анализ конструкций и опыт проведения расчетов и испытаний жесткой ошиновки 110 кВ и выше // Энергетик. 2010. № 8. С. 36–39.
3. СТО 56947007-29.060.10.006-2008. Руководящий документ по проектированию жесткой ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2008 г.
4. СТО 56947007-29.060.10.006-2008. Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2008 г.
5. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и переработ. Л.: «Машиностроение», 1976.
6. ГОСТ Р 50736 – 2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока КЗ, 1994 г.

Долин Анисим Петрович – канд. техн. наук, генеральный директор (495) 9180511 apdol@mail.ru

Егорова Людмила Евгеньевна – начальник отдела шинных конструкций и токопроводов; аспирант НИУ МЭИ (495) 9180511 le_egorova@ntc-eds.ru

ООО НТЦ «ЭДС», г. Москва