

4 — 6 июня 2012 г.
Москва, НИУ МЭИ

Э 2012
НЕРГО



МРЭДЫ

Второй Всероссийской научно-практической конференции

**Повышение надежности
и эффективности эксплуатации
электрических станций
и энергетических систем**

МЭИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

РФИ

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДЕМПИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКИ ОРУ

АННОТАЦИЯ

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Ветровые воздействия на ошиновку вызывают: продольные нагрузки, действующие вдоль оси x (рис. 1) (при которых определяется стойкость ошиновки при наибольших нормированных скоростях ветра), и поперечные нагрузки вдоль оси y , при резонансных эоловых колебаниях [1].

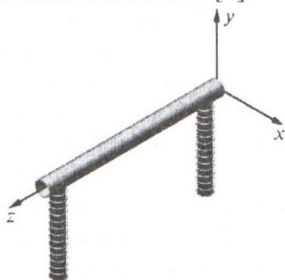


Рис. 1. Принятая система координат

Ветровой резонанс жестких шин обусловлен периодическими срывами вихрей (вихревой дорожкой Кармана), в результате которых на шину действуют периодические силы поперек воздушного потока [1]. 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 $0,02D$, мм, для шин диаметром $D = 250$ мм и больше; $0,04D$ — для шин диаметром $D = 90$ — 150 мм [4]. Приблизительно амплитуду колебаний можно вычислить по формуле

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

где c_{y0} — коэффициент аэродинамических нагрузок, который принимается равным 0,8; ρ_v — 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 [2] одним из наиболее эффективных методов борьбы с эоловыми колебаниями является увеличение диссипативных сил, которые удобно характеризовать логарифмическим декрементом затухания δ . Этот параметр для шинных конструкций определяется экспериментально, например, по осциллограммам свободных колебаний шины [1]

$$\delta = \frac{1}{k-m} \ln \frac{A_m}{A_k} \quad (k > m), \quad (2)$$

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, опорных конструкциях, в изоляторах, конструкционным демпфированием (в болтовых, прессованных, резьбовых соединениях), а также действием демпфирующих устройств (гасителей колебаний) [3, 4].

2. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКИ

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

$$U_{ст.\max} \leq U_{ст.\text{доп.}} \quad (3)$$

где $u_{ст.мах}$ — наибольший прогиб шин от собственного веса и силы тяжести ответвлений (с учетом и без учета гололеда); $u_{ст.доп}$ — допустимый статический прогиб шины с учетом и без учета гололеда, равный соответственно 1/80 и 1/100 длины шины между опорами.

Реже для гашения колебаний шин ОРУ 35—220 кВ применяются демпферы-стержни. Длина и количество стержней, закладываемых в трубу, определяются аналогично выбору массы провода.

Однако для длиннопролетных шин ОРУ 330—750 кВ (реже 220 кВ) демпферы в виде проводов и стержней 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 по статическому прогибу (3).

Прокладка внутри шины до 4 проводов типа АС 500 или 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. 2), либо устанавливают внутри шины—трубы (рис. 3).

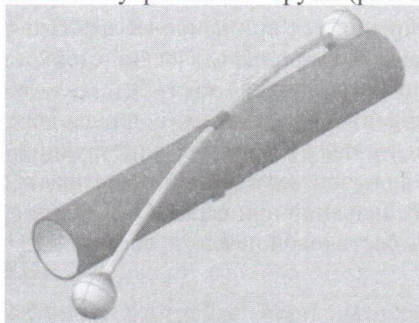


Рис. 2. Демпфирующее устройство типа «бабочка» с установкой сверху на шине

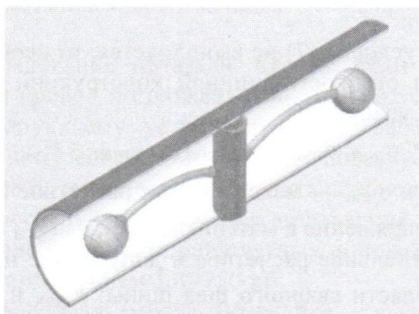


Рис. 3. Демпфирующее устройство типа «бабочка» с установкой внутри шины

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 решения 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. 4).

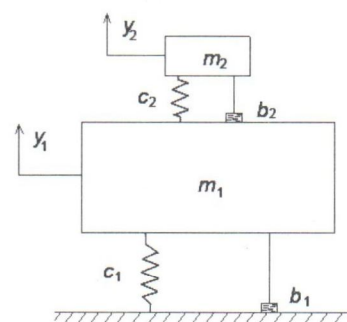


Рис. 4. Расчетная схема системы жесткая ошиновка — демпфер типа «бабочка»

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

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + (b_1 + b_2) \dot{y}_1 - b_2 \dot{y}_2 + (c_1 + c_2) y_1 - c_2 y_2 = q(y_1); \\ m_2 \ddot{y}_2 - b_2 \dot{y}_1 + b_2 \dot{y}_2 - c_2 y_1 + c_2 y_2 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

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; $q_y(y_1)$ — нагрузка, действующая на шину при ветровом резонансе равна [5]

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

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 (4) 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 (4) с правой частью равной 0.

При этом начальные условия будут следующими

$$y_1(0) = \Delta_1; \quad y_2(0) = \Delta_1 + \Delta_2, \quad (6)$$

где Δ_1 — начальное отклонение (прогиб) шины при испытаниях.

Решения системы уравнений (4) при ветровых резонансах и свободных колебаниях проводились с использованием программы MathCAD. В качестве примера на рис. 5 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.

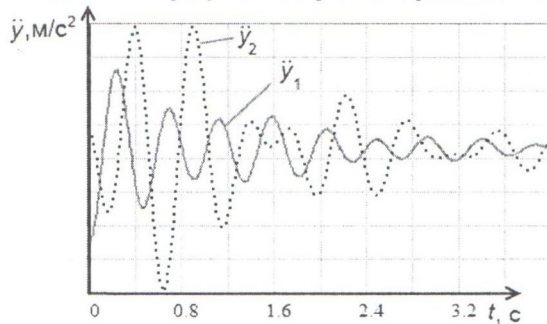


Рис. 5. Расчетные ускорения шины и динамического гасителя типа «бабочка» при свободных колебаниях

Исследования показали, что эффект динамического гасителя колебаний зависит от отношения его массы к величине массы шины, от отношения его частоты к основной частоте колебаний ошиновки, а также от места установки.

На рис. 6 и 7 представлены экспериментально полученные осциллограммы свободных колебаний жесткой ошиновки 500 кВ (с длиной пролета 18 м) в вертикальной плоскости с демпфером—проводом марки АС 500/26 длиной примерно равной длине пролета шины и закрепленным с обеих сторон, а также с двумя демпферами НТЦ «ЭДС» типа «бабочка», установленными внутри шины. Значение логарифмического декремента затуханий колебаний в вертикальной плоскости шины без демпфера оказалось равным 0,071, с демпфером—проводом — 0,128, с демпферами НТЦ «ЭДС» — 0,346. Расчетные значения эквивалентного декремента затухания с динамическим демпфером близки к экспериментальным значениям.

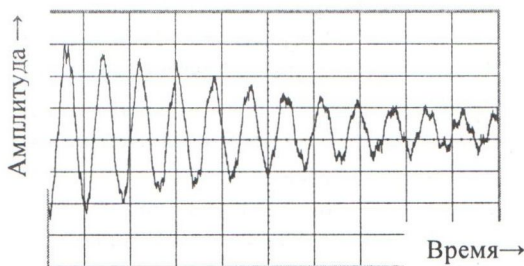


Рис. 6. Осциллограмма ускорений шины при свободных колебаниях в вертикальной плоскости с демпфером—проводом

Использование демпфирующих устройств типа «бабочка» не только технически, но и экономически

более эффективно, чем прокладка внутри шины пучка проводов.

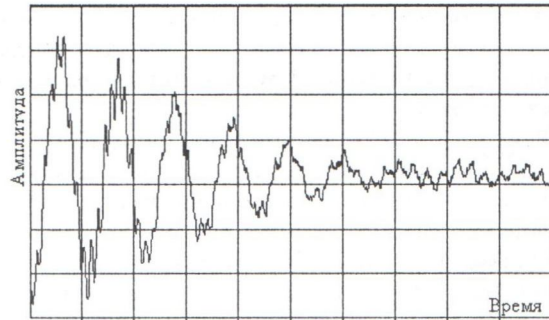


Рис. 7. Осциллограмма ускорений шины при свободных колебаниях в вертикальной плоскости с демпфером типа «бабочка» с установкой снаружи шины (снизу)

3. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРИ ПОВТОРНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ НА КЗ

Установка высокоэффективных демпфирующих устройств позволяет не только успешно бороться с ветровыми резонансами, но и повышает ветровую и электродинамическую стойкость жесткой ошиновки. В частности увеличение рассеяния энергии может значительно снизить ожидаемые максимальные нагрузки на изоляторы при повторных включениях на КЗ (неуспешных АПВ).

При расчетах электродинамической стойкости при повторных включениях на КЗ [6] кроме рассеяния энергии при колебаниях шинных конструкций учитывается частота собственных колебаний, время бестоковой паузы и другие факторы. Кроме того, расчеты проводятся при наиболее неблагоприятных по условиям электродинамической стойкости углах включения и отключения тока КЗ.

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 [1, 5]

$$t_{б.п} \geq \frac{2,3}{f_{1x} \cdot \delta_x}, \quad (7)$$

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

Если условие (7) не выполняется, то необходима проверка стойкости шинной конструкции по следующим условиям

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}; \sigma_{\max, \text{св}} \leq \sigma_{\text{доп, св}}; F_{\max} \leq F_{\text{доп}}, \quad (8)$$

где σ_{\max} и $\sigma_{\text{доп}}$ — максимальное расчетное и допустимое напряжение в материале шин; $\sigma_{\max, \text{св}}$ и $\sigma_{\text{доп, св}}$ — максимальное расчетное и допустимое напряжение в области сварного шва шины; F_{\max} и $F_{\text{доп}}$ — максимальная расчетная и допустимая силы (нагрузки) на изоляторы.

Наибольшие напряжения в материале шин и максимальные нагрузки на изоляторы при неуспешных АПВ в соответствии с [1, 5] приводятся к виду

$$\sigma_{\max} = \sigma_{1\max} \theta = \frac{\alpha l^2}{\lambda a W} i_{\text{уд}}^2 \eta \theta; \quad (9)$$

$$F_{\max} = F_{1\max} \theta = \beta \frac{\alpha \cdot l}{a} i_{\text{уд}}^2 \eta \theta, \quad (10)$$

где $\sigma_{1\max}$, $F_{1\max}$ — наибольшие напряжения и нагрузки при первом КЗ; θ — коэффициент превышения напряжений в материале шин и нагрузок на изоляторы при повторных КЗ; 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 применение демпферов и увеличение декремента затухания δ_x обеспечивает повышение ветровой стойкости жесткой ошиновки за счет снижения воздействия динамической составляющей ветра.

Для рассмотренной выше конструкции жесткой ошиновки 500 кВ в табл. 1 приведены результаты расчетов F_{\max} и σ_{\max} от ветровых и электродинамических нагрузок при повторных включениях на КЗ, выполненных согласно требованиям [1], для IV района по ветру ($V_{\max} = 36 \text{ м/с}$) и ударного тока КЗ равного 160 кА.

Таблица 1. Результаты расчетов ветровой и электродинамической стойкости при неуспешных АПВ жесткой ошиновки ОРУ 500 кВ с разными демпферами

Параметр	Демпфер-провод	Демпфер НТЦ «ЭДС»	Изменение параметров при применении демпфера НТЦ «ЭДС» Δ , %
Логарифмический декремент затухания в горизонтальной плоскости δ_x	0,172	0,321	87
Коэффициент превышения напряжений в материале шин и нагрузок на изоляторы при повторных КЗ θ	1,64	1,33	19
F_{\max}/σ_{\max} при неуспешных АПВ, Н/МПа	8639/91,54	7006/74,24	
Параметр динамичности ветровой нагрузки $\xi_{\text{в}}$	0,42	0,36	14
F_{\max}/σ_{\max} при ветровых нагрузках, Н/МПа	2615/27,71	2403/25,47	8

Для представленного выше примера применение современных демпфирующих устройств позволило повысить ветровую и электродинамическую стойкость шинных конструкций по сравнению с демпфером—проводом на 8 и 19 % соответственно. Следует отметить, что допустимые нагрузки на изоляторы равны $F_{\text{доп}} = 7274 \text{ Н}$. При этом изоляторы шинной конструкции с демпфером НТЦ «ЭДС» отвечают условиям электродинамической стойкости при неуспешных АПВ, а с демпфером типа «провод» не обеспечивается электродинамическая стойкость конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Эффективная отстройка жесткой ошиновки от ветровых резонансных колебаний, а так же ветровая стойкость конструкций достигается, прежде всего, применением современных демпфирующих устройств.

2. Исследования показали, что гасители колебаний типа провод и стержень значительно уступают демпфирующему устройству типа «бабочка», изготовленному согласно патенту на полезную модель № 100859, и не могут обеспечить необходимый уровень рассеяния энергии для подавления резонансных колебаний длиннопролетных шинных конструкций напряжением 330–750 кВ.

3. Проведенная работа позволила определить наиболее эффективные конструктивные параметры демпфера типа «бабочка», подтвердить полученные результаты расчетов испытаниями на полномасштабных конструкциях и применить их на современных конструкциях жесткой ошиновки ОРУ

330—750 кВ отечественных производителей.

4. Применение демпфера НТЦ «ЭДС» типа «бабочка» позволяет увеличить логарифмический декремент затухания шины до 5 раз по сравнению с конструкцией без демпфера и в 1,5—2,7 раза — с демпфером-проводом.

5. Проведенные экспериментальные и аналитические исследования показали, что обеспечение высокого уровня рассеяния энергии при колебаниях длиннопролетных шин жесткой ошиновки ОРУ 330—750 кВ позволяет не только устранить ветровые резонансные колебания, но и повысить на 7—20 % ветровую и 15—25 % электродинамическую стойкость шинных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СТО 56947007-29.060.10.006—2008. Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ 110 — 500 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2008.
- Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и переработ. Л.: Машиностроение, 1976.
- 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.
- СТО 56947007-29.060.10.005—2008. Руководящий документ по проектированию жесткой ошиновки ОРУ 110 — 500 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2008 г.
- Долин А.П., Шонгин Г.Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
- ГОСТ Р 50736—2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока КЗ. 1994.