На правах рукописи

Чистова Людмила Евгеньевна

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКИ НАПРЯЖЕНИЕМ 35-750 кВ

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2012 г.

Работа выполнена на кафедре электрических станций Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель:	Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции» ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» Долин Анисим Петрович
Официальные оппоненты:	Доктор технических наук, профессор кафедры «Основ конструирования машин» ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» Кудрявцев Евгений Петрович
	Кандидат технических наук, главный специалист ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» Евтушенко Владимир Антонович
Ведущая организация:	ЗАО ПФ «КТП-Урал», г. Березовский Свердловской области

Защита состоится «15» февраля 2013 г. в аудитории Г-200 в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.157.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» по адресу: Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, 2 этаж, корпус «Г».

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим присылать по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый Совет «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан «__»_____ 2013 г.

Председатель
диссертационного совета Д 212.157.03
доктор технических наук, профессор Жуков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные распределительные устройства (РУ) напряжением 110 кВ и выше электрических станций и подстанций все чаще выполняются с использованием конструкций с жесткими трубчатыми шинами (жесткой ошиновкой). Наибольшее распространение жесткая ошиновка получила в открытых РУ (ОРУ). При создании экономичных компоновок РУ достаточно широко применяются конструкции с жесткими шинами сложной пространственной конфигурации, имеющие надставки, ответвления, повороты и т.п. Вместе с тем, существующие инженерные расчеты, требования к испытаниям в настоящее время не в полной мере позволяют получать достоверные оценки работоспособности шинных конструкций в экстремальных условиях: при воздействиях ветровых и электродинамических нагрузок (ЭДН). В частности, нет достаточно точных решений задачи определения электродинамической стойкости жесткой ошиновки с поворотами и ответвлениями. Это приводит в одних случаях к необоснованному снижению прочности и, соответственно, надежности конструкции, а в других – к неоправданно высоким запасам прочности и, как следствие, увеличению стоимости шинных конструкций.

Разработка и внедрение жесткой ошиновки в ОРУ напряжением 330-750 кВ потребовали использование шин с длиной пролета 17-20 м и более. Опыт эксплуатации длиннопролетных конструкций показал, что применение демпфирующих устройств в виде провода и стержня, используемых в шинах меньшей длины в ОРУ 35-220 кВ, не обеспечивает подавление устойчивых ветровых резонансных колебаний. Эоловые вибрации шин могут ежедневно продолжаться в течение нескольких часов. Вибрации приводят к ослаблению болтовых соединений и усталостным разрушениям. Они оказывают отрицательное психологическое воздействие на персонал ОРУ. Поэтому одной из задач работы являлась разработка гасителей колебаний для длиннопролетных конструкций жесткой ошиновки, обеспечивающих глубокий уровень демпфирования как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости колебаний.

Объектом исследования является жесткая ошиновка ОРУ напряжением 35-750 кВ.

Предметом исследования являются:

– электродинамические нагрузки и ее отдельные временные составляющие в конструкциях жесткой ошиновки с поворотами и ответвлениями.

– электродинамическая стойкость конструкций жесткой ошиновки сложной пространственной конструкции и влияние отдельных составляющих ЭДН на электродинамическую стойкость изоляторов и шин;

– ветровые (эоловые) колебания длиннопролетных конструкций с жесткими трубчатыми шинами;

– демпфирующие устройства жесткой ошиновки, используемые для подавления эоловых вибраций;

Целью работы является разработка методики расчета электродинамической стойкости шинных конструкций с поворотами и ответвлениями; разработка демпфирующих устройств, обеспечивающих эффективное подавление устойчивых ветровых резонансных колебаний длиннопролетных шин, а также повышение их ветровой и электродинамической стойкости.

Задачи работы:

1) разработать методику расчета электродинамических нагрузок в шинных конструкциях с поворотами и ответвлениями и рекомендации по инженерным расчетам их электродинамической стойкости;

2) провести экспериментальные исследования свободных колебаний жесткой ошиновки напряжением 35-750 кВ и оценить факторы, влияющие на рассеяние энергии при колебаниях в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

3) разработать конструкцию эффективного динамического гасителя вибраций для шинных конструкций напряжением 330-750 кВ, провести его натурные испытания на полномасштабных конструкциях;

4) разработать рекомендации по проектированию жесткой ошиновки на основе анализа работоспособности современных конструкций напряжением 35-750 кВ;

5) разработать экспериментально-аналитическую методику проверки эффективности отстройки жесткой ошиновки от ветровых резонансов, а также методику экспериментального определения прогиба шин от собственного веса и веса гололеда.

Методы исследования. Решение поставленных задач проводилось численными методами на основе решения систем уравнений, а также на основе решения дифференциальных уравнений четвертого и второго порядка в частных производных с использованием программы MathCad.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1) разработана методика расчета неравномерно распределенных электродинамических нагрузок в конструкциях жесткой ошиновки с поворотами и ответвлениями;

2) разработана методика расчета электродинамической стойкости ошиновки сложной пространственной конфигурации при неравномерно распределенных ЭДН;

3) разработана и внедрена конструкция динамического гасителя вибраций длиннопролетных шин ОРУ 35-750 кВ и выше;

4) разработан экспериментально-аналитический метод определения эффективности отстройки от ветровых резонансов;

5) разработана методика экспериментального определения прогиба шин (в том числе для конструкций с поворотами и ответвлениями) от собственного веса и веса гололеда;

6) разработаны рекомендации по проектированию и модернизации

современных шинных конструкций напряжением 35-750 кВ различного исполнения на основании анализа расчетов и испытаний работоспособности ошиновки.

Достоверность научных положений диссертационной работы обусловлена:

– корректным использованием расчетных моделей при расчете электродинамической стойкости шинных конструкций и сопоставлением результатов расчета жесткой ошиновки по разработанной методике с известными решениями;

– проверкой работоспособности исследуемой жесткой ошиновки при испытаниях токами КЗ, а также в эксплуатационных условиях;

– обоснованностью принятых допущений при разработке методики расчета колебаний шин с динамическим демпфером и удовлетворительным совпадением результатов расчета с экспериментальными данными, а также положительным результатом испытаний разработанного демпфера на полномасштабных конструкциях.

На защиту выносятся следующие положения:

1) методика определения электродинамических нагрузок в системе параллельных и перпендикулярных проводников;

2) методика расчета электродинамической стойкости конструкций жесткой ошиновки с поворотами и ответвлениями;

3) результаты экспериментально-аналитических исследований параметров свободных колебаний жесткой ошиновки с различными демпфирующими устройствами;

4) методика расчета ветровых резонансных колебаний жесткой ошиновки с динамическим гасителем вибраций;

5) конструкция динамического гасителя вибраций шин, а также результаты исследований свободных и вынужденных колебаний длиннопролетных конструкций с динамическим гасителем вибраций;

6) методика экспериментального определения прогиба шин сложной пространственной конфигурации, от собственного веса, а также собственного веса и веса гололеда;

7) рекомендации по совершенствованию конструкций жесткой ошиновки, повышению технико-экономических показателей и эксплуатационной надежности конструкций напряжением 35-750 кВ.

Реализация и внедрение результатов работы:

1) предложенные рекомендации по гашению ветровых резонансных колебаний были использованы при разработке шинных конструкций напряжением 35-750 кВ следующими заводами-изготовителями: ЗАО ПФ «КТП-Урал» (г. Екатеринбург), ЗАО «ЗЭТО» (г. Великие Луки), ОАО «Орбита» (г. Саранск), ЗАО ГК «Электрощит-ТМ «Самара» (г. Самара), ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) и другими;

2) теоретические результаты работы по оценке электродинамической стойкости шинных конструкций с поворотами использованы при разработке

жесткой ошиновки ОРУ, выполненных по мостиковым схемам, напряжением 35, 110 кВ ЗАО ПФ «КТП-Урал»; 110, 220 кВ ЗАО ГК «Электрощит-ТМ «Самара»; 35-220 кВ ЗАО «АИЗ»; 35, 110 кВ ЗАО «ЧЭАЗ»;

3) разработанное демпфирующее устройство внедрено в производство и принято к установке в конструкции жесткой ошиновки напряжением 330, 500 кВ производства ЗАО ПФ «КТП-Урал» и 330, 500 и 750 кВ – ЗАО «ЗЭТО»;

4) разработаны методика проведения испытаний по определению максимального статического прогиба при гололеде и методика экспериментально-аналитической проверки эффективности отстройки жестких шин ОРУ от ветровых резонансов, которые вошли в стандарт ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.060.10.117-2012 «Типовые программы и методики квалификационных, периодических и приемосдаточных испытаний жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ».

Реализация и внедрение результатов работы подтверждены актами о внедрении и использовании результатов диссертационной работы от ЗАО «ЗЭТО», ЗАО ПФ «КТП-Урал», ЗАО ГК «Электрощит-ТМ «Самара», ООО НТЦ «ЭДС» (автор стандарта ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.060.10.117-2012).

Апробация работы. Работа была апробирована на следующих конференциях:

– научно-технический семинар на XII международной специализированной выставке «Электрические сети России 2009» секция «Электротехническое оборудование и распределительные устройства» (ВВЦ, г. Москва, 2009 г.);

– XVI ежегодная международная научно-технической конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2010 г.);

– XVII ежегодная международная научно-технической конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2011 г.);

– всероссийская научно-практическая конференция «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» – ЭНЕРГО-2010 (МЭИ, Москва, 2010 г.);

– II всероссийская научно-практическая конференция «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» – ЭНЕРГО-2012 (МЭИ, Москва, 2012 г.);

– научно-производственная конференция по теме «Особенности конструирования и проектирования жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110 кВ и выше» (МЭИ, Москва, 2010 г.);

– II научно-производственная конференция по теме «Современные ОРУ 35-750 кВ с жесткой ошиновкой» (МЭИ, Москва, 2011 г.);

– III научно-производственная конференция «Жесткая ошиновка и современное электрооборудование ОРУ 35-750 кВ» (МЭИ, Москва, 2012 г.).

Публикации. По результатам исследований было опубликовано десять печатных работ, в том числе две статьи в журналах рекомендованных ВАК РФ для публикаций материалов диссертационных работ [1, 2], патент на полезную модель №100859 [3], стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.060.10.117-2012 [10].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, состоящего из 144 наименований, шести приложений. Основной текст изложен на 154 страницах, включает 71 рисунок. Общий объем диссертации 259 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, научная новизна, формулируется цель и основные задачи исследований, описывается реализация и внедрение результатов работы, дается краткое содержание глав работы.

В первой главе проведен аналитический обзор работ по исследованию электродинамических нагрузок при двух- и трехфазных КЗ для нитевидных параллельных протяженных проводников, расположенных в одной плоскости и по вершинам треугольника, а также нагрузок и моментов, действующих на прямолинейные проводники с учетом геометрических размеров шин прямоугольного и других сечений. Проведен анализ работ по оценке электродинамической стойкости шинных конструкций с жесткими проводниками на основе решения задачи на статическую нагрузку, равную максимуму электродинамической нагрузки, а также на основе решений колебаний балки с распределенными параметрами, закрепленной на неподвижных (абсолютно жестких) опорах, на упругоподатливых опорах и в виде рамной конструкции. Представлен ряд работ, описывающих решения электродинамической стойкости шинных конструкций на основе расчета колебаний систем с одной степенью свободы.

Проведен анализ работ по исследованию ветровой стойкости, а также ветровых резонансных колебаний жестких шин и методов борьбы с эоловыми колебаниями.

Также рассмотрены вопросы применения жесткой ошиновки в современных распределительных устройствах (РУ), некоторые особенности конструкций и основные требования к жесткой ошиновке, предъявляемые нормативными документами.

Во второй главе разработана методика расчета электродинамических нагрузок в шинных конструкциях с поворотами и ответвлениями.

В системе из N произвольно расположенных нитевидных проводников электродинамические нагрузки, Н/м, в точке z проводника с номером j от токов, протекающих по шинам с номерами $k = 1, 2..n$ ($k \neq j$), равны

$$q_j(z)=\frac{dQ_j}{dl_j}=\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N} q_{kj}=i_j\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N}\left[\bar{l}_{0j}\cdot\bar{B}_{kj}\right], \qquad (1)$$

где Q_j – электродинамическая сила, Н; l_j – длина проводника j, м; i_j – ток в j-ом проводнике, А; $\bar{l}_{0j}$ – единичный вектор, направление которого совпадает с принятым в расчете направлением тока i_j; $\bar{B}_{kj}$ – вектор магнитной индукции, Тл, от тока i_k в точке с координатой z на оси j-ого проводника.

Принято, что начало координат xyz связано с одним из концов проводника с номером j (рис. 1). При этом ось z системы координат направлена вдоль этого проводника. Для практических расчетов электродинамические нагрузки удобно представить в виде проекций на ортогональные плоскости $x0z$ и $y0z$:

$$q_j^{x(y)}(z)=\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N} q_{kj}^{x(y)}=\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N}\frac{\alpha_0}{a}i_k i_j\beta_{kj}^{x(y)}(z), \qquad (2)$$

где α_0 – параметр, равный $2\cdot10^{-7}$ Н/А^2; a – минимальное расстояние между фазами (осями проводников разных фаз), м; i_k, i_j – ток в k-ом и j-ом проводнике соответственно, А; $\beta_{kj}(z)$ – коэффициент, определяемый геометрическим расположением проводников j и k в пространстве.

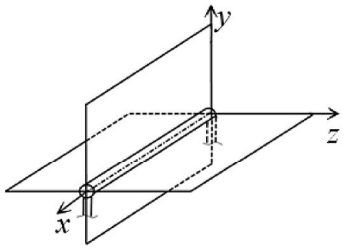
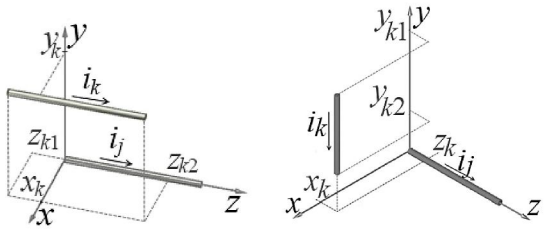


Рис. 1. Принятая система координат и главные плоскости инерции шины $x0z$ и $y0z$

Получены коэффициенты распределения электродинамических нагрузок для произвольно расположенных параллельных и перпендикулярных проводников конечной длины (рис. 2), которые приводятся в таблице 1.



а) б)

Рис. 2. Геометрическое расположение проводников j и k: а – произвольно расположенные параллельные шины; б – перпендикулярные шины, расположенные в разных плоскостях

В таблице 1 приняты следующие обозначения: z_{k1}, z_{k2}, y_{k1}, y_{k2}, x_{k1}, x_{k2} – координаты начала и конца проводника k; z – текущая координата проводника с индексом j по оси z, принадлежащая интервалу $(0; l_j)$.

Таблица 1

Коэффициенты $\beta_{kj}(z)$

№ рис.	Коэффициенты $\beta_{kj}^{x(y)}(z)$
2, а	$\beta_{kj}^{x}(z)=-\frac{a}{2}\frac{x_k}{x_k^2+y_k^2}\left(\frac{z-z_{k1}}{\sqrt{(z-z_{k1})^2+(x_k^2+y_k^2)}}+\frac{z_{k2}-z}{\sqrt{(z_{k2}-z)^2+(x_k^2+y_k^2)}}\right)$
	$\beta_{kj}^{y}(z)=-\frac{a}{2}\frac{y_k}{x_k^2+y_k^2}\left(\frac{z-z_{k1}}{\sqrt{(z-z_{k1})^2+(x_k^2+y_k^2)}}+\frac{z_{k2}-z}{\sqrt{(z_{k2}-z)^2+(x_k^2+y_k^2)}}\right)$
2, б	$\beta_{kj}^{x}(z)=\frac{a}{2}\frac{1}{\sqrt{y_k^2+(z-z_k)^2}}\left(\frac{x_{k2}}{\sqrt{x_{k2}^2+y_k^2+(z-z_k)^2}}-\frac{x_{k1}}{\sqrt{x_{k1}^2+y_k^2+(z-z_k)^2}}\right)$ при $y_k\neq 0$
	$\beta_{kj}^{y}(z)=\frac{a}{2}\frac{1}{\sqrt{x_k^2+(z-z_k)^2}}\left(\frac{y_{k2}}{\sqrt{y_{k2}^2+x_k^2+(z-z_k)^2}}-\frac{y_{k1}}{\sqrt{y_{k1}^2+x_k^2+(z-z_k)^2}}\right)$ при $x_k\neq 0$

Ток КЗ в проводниках с номерами k и j можно представить как

$$i_s = I_{ms}\left\{\sin\left[\omega t+\psi-\frac{2\pi}{3}(s-1)\right]-e^{-t/T_a}\sin\left[\psi-\frac{2\pi}{3}(s-1)\right]\right\} \quad (s = 1, 2, 3), \quad (3)$$

где I_{ms} – амплитуда периодической составляющей тока КЗ, А; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока в сети, рад/с; f – частота тока в сети, Гц; t – время, с; ψ – угол включения тока КЗ, рад; T_a – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с; s – параметр, равный 1 при двухфазном КЗ и трехфазном КЗ для фазы A, 2 и 3 – при трехфазном КЗ, соответственно, для фаз B и C.

Уравнение (2) с учетом (3) приводится к виду

$$q_j^{x(y)}(z,\psi,t)=\frac{\alpha_0}{a}\cdot\varepsilon_{jk}I_{mj}^2\cdot\sum_{n=1}^{6}D_n(\psi,z)\cdot T_n(t)=\frac{\alpha_0}{a}I_{mj}^2\,\underset{*}{q}_{kj}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{kj}=I_{mk}/I_{mj}$; $\underset{*}{q}_{kj}=\sum_{n=1}^{6}D_n(\psi,z)\cdot T_n(t)$ – относительная нагрузка; T_n – функции времени t равные $T_1=1$; $T_2=e^{-2t/T_a}$; $T_3=e^{-t/T_a}\sin\omega t$; $T_4=e^{-t/T_a}\cos\omega t$; $T_5=\sin 2\omega t$; $T_6=\cos 2\omega t$; $D_n(\psi,z)$ – коэффициенты, зависящие от угла включения тока КЗ, вида КЗ, фазы проводника (A, B или C) и геометрического расположения шин относительно друг к другу и их размеров, равные

$$D_n(\psi, z) = \sum_{k=1}^{N} \beta_{kj}(z) d_{kn}(\psi), \qquad (5)$$

где d_{kn} – коэффициенты, зависящие от вида КЗ, угла включения тока КЗ и фаз проводников j и k.

Значения коэффициентов d_{kn}, полученные для двух- и трехфазных КЗ, приводятся в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты $d_{kn}(\psi)$ при двух- (2) и трехфазном (3) КЗ

n	Коэффициенты $d_{kn}(\psi)$ для фазы проводников k и j/вида КЗ			
	A-B/(3)	*A-C*/(3)	*B-C*/(3)	*A-A*; *B-B*; *C-C*/(3) любое сочетание/(2)
1	–0,25	–0,25	–0,25	–0,25
2	$-\frac{1}{2}\sin\psi^2 - \frac{\sqrt{3}}{4}\sin 2\psi$	$-\frac{1}{2}\sin\psi^2 + \frac{\sqrt{3}}{4}\sin 2\psi$	$-\frac{1}{4} - \frac{1}{2}\cos 2\psi$	$\sin\left(\psi - \frac{2\cdot\pi}{3}(s-1)\right)^2$
3	$\sin\psi^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin 2\psi$	$\sin\psi^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin 2\psi$	$\frac{1}{2} + \cos 2\psi$	$-2\sin\left(\psi - \frac{2\cdot\pi}{3}(s-1)\right)^2$
4	$\frac{\sqrt{3}}{2}\cos 2\psi + \frac{1}{2}\sin 2\psi$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}\cos 2\psi + \frac{1}{2}\sin 2\psi$	$-\sin 2\psi$	$-\sin\left(2\psi - \frac{2\cdot\pi}{3}(s-1)\right)$
5	$\frac{1}{4}\cos 2\psi - \frac{\sqrt{3}}{4}\sin 2\psi$	$\frac{1}{4}\cos 2\psi + \frac{\sqrt{3}}{4}\sin 2\psi$	$-\frac{1}{2}\cos 2\psi$	$-\frac{1}{2}\cos\left(2\psi - \frac{2\cdot\pi}{3}(s-1)\right)$
6	$-\frac{1}{4}\sin 2\psi - \frac{\sqrt{3}}{4}\cos 2\psi$	$-\frac{1}{4}\sin 2\psi + \frac{\sqrt{3}}{4}\cos 2\psi$	$\frac{1}{2}\sin 2\psi$	$\frac{1}{2}\sin\left(2\psi - \frac{2\cdot\pi}{3}(s-1)\right)$

Была разработана прикладная программа расчета ЭДН в среде MathCAD, и определены распределения электродинамических нагрузок и ее отдельных временных составляющих для конструкций с поворотами и ответвлениями при трех- и двухфазных КЗ. Кроме того, для типовых конструкций определены максимальные значения ЭДН, являющиеся функцией угла включения тока КЗ ψ, координаты шины z и времени t.

В третьей главе рассмотрен расчет электродинамической стойкости шинных конструкций на основе расчета колебаний системы с распределенными и сосредоточенными параметрами.

В соответствии с ПУЭ и другими нормативными документами жесткая ошиновка отвечает условиям электродинамической стойкости, если наибольшие расчетные напряжения в материале шин σ_{max} и нагрузки на изоляторы F_{max} остаются ниже допустимых значений

$$\sigma_{max} \le \sigma_{доп};\ F_{max} \le F_{доп}, \qquad (6)$$

где σ_{max} и $\sigma_{доп}$ – максимальное расчетное и допустимое напряжение в материале шин, Па; F_{max} и $F_{доп}$ – максимальная расчетная и допустимая силы (нагрузки) на изоляторы, Н.

Расчет напряжений в материале шин и нагрузок на изоляторы сводится к расчету колебаний шины при КЗ под воздействием электродинамических

нагрузок. Колебания шины с учетом рассеяния энергии описываются дифференциальным уравнением

$$EJ_s \frac{\partial^4 y_s}{\partial z^4} + m\frac{\partial^2 y_s}{\partial t^2} + 2h_s m\frac{\partial y_s}{\partial t} = q_s(z,t), \tag{7}$$

где s = 1 соответствует колебаниям шины в плоскости $x0z$, значение s = 2 – колебаниям шины в плоскости $y0z$; y_s – прогиб шины, м; t – время, с; $h = \delta f_s$ – коэффициент затухания, $с^{-1}$; δ – логарифмический декремент колебаний шины; f_s – собственная частота колебаний шины, Гц; q_s – электродинамическая нагрузка, Н/м.

Решением уравнения (7) является сумма частного решения этого уравнения Y_{1s} и общего решения однородного уравнения Y_{2s}. Для конструкций с абсолютно жесткими опорами эти решения в каждой плоскости инерции шины с номером s можно найти в виде суммы рядов по собственным функциям $X_k(z)$:

$$y(z,t) = Y_1(z,t) + Y_2(z,t) = \sum_{k=1}^{\infty} S_k(t) X_k(z) + \sum_{k=1}^{\infty} \Theta_k(t) X_k(z). \tag{8}$$

Здесь и ниже индекс s для упрощения записи опущен.

Функции времени $S_k(t)$ определяются по формуле

$$S_k(t) = \frac{1}{mp_k}\int_0^t H_k(\tau) e^{-h_k(t-\tau)} \sin p_k(t-\tau)\, d\tau, \tag{9}$$

где $p_k = \sqrt{\Omega_k^2 - h_k^2}$ – угловая частота собственных колебаний шины при наличии рассеяния энергии, рад/с; Ω_k – собственная угловая частота колебаний шины без учета рассеяния энергии, рад/с, определяемая по формуле

$$\Omega_k = 2\pi f_k = r_k^2 \sqrt{EJ/m}\,/l^2; \tag{10}$$

здесь f_k – собственная частота колебаний шины, Гц; $H_k(t)$ – функция времени, равная

$$H_k = \int_0^l q(z,t) X_k(z)\, dz \Big/ \int_0^l X_k^2(z)\, dz. \tag{11}$$

Функции времени $\Theta_k(t)$ равны

$$\Theta_k(t) = e^{-h_k t}\, p_k \left(N_k \sin p_k t + L_k \cos p_k t\right)/\Omega_k. \tag{12}$$

При нулевых начальных условиях коэффициенты N_k и L_k и функция Θ_k обращаются в ноль. Для балки с шарнирным опиранием, характерным для шин РУ 110 кВ и выше, собственные формы колебаний равны

$$X_k(t) = \sin\left(r_k z/l\right), \tag{13}$$

где l – длина пролета шины, м; r_k – корни характеристического уравнения колебаний балки, равные $r_k = k\pi$ (k = 1, 2, 3...n).

Расчеты показывают, что для практических расчетов достаточно ограничиться 3-4 членами ряда (8).

Нагрузки на изоляторы, Н, и напряжения в материале шин, Па, определяются по формулам

$$F(z,t) = 2EJ\frac{\partial^3 y}{\partial z^3}; \quad \sigma(z,t) = \frac{EJ}{W}\frac{\partial^2 y}{\partial z^2}, \tag{14}$$

где W – момент сопротивления поперечного сечения шины, м^3.

Максимальные напряжения в материале шин, Па, и нагрузки на изоляторы, Н, при колебаниях в плоскостях $x0z$ (s = 1) и $y0z$ (s = 2), а также результирующие напряжения и нагрузки (∑), приводятся к виду

$$\sigma_{s(\Sigma)\max} = \frac{\alpha_0 l^2}{\lambda a W} I_m^2 \sigma_{*s(\Sigma)\max} = \frac{\alpha l^2}{\lambda a W} i_{уд}^2 \eta_{\sigma s(\Sigma)}; \tag{15}$$

$$F_{s(\Sigma)\max} = \beta\frac{\alpha_0 l}{a} I_m^2 F_{*s(\Sigma)\max} = \beta\frac{\alpha l}{a} i_{уд}^2 \eta_{Fs(\Sigma)}, \tag{16}$$

где α – параметр, равный $2\cdot10^{-7}$ и $\sqrt{3}\cdot10^{-7}$ Н/А^2 соответственно при двух- и трехфазном КЗ; λ и β – параметры, зависящие от условий опирания шин; $i_{уд} = k_{уд} I_m$ – ударный ток КЗ, А; $k_{уд} = 1 + e^{-0{,}01/T_a}$ – ударный коэффициент; $\eta_{\sigma s(\Sigma)}$, $\eta_{Fs(\Sigma)}$ – динамические коэффициенты, равные

$$\eta_{\sigma s(\Sigma)} = \frac{2}{\sqrt{3}k_{уд}^2}\sigma_{*\max} \text{ и } \eta_{Fs(\Sigma)} = \frac{2}{\sqrt{3}k_{уд}^2}F_{*\max}.$$

Динамические коэффициенты являются функцией частоты собственных колебаний шинной конструкции f_k, кроме того, значение динамического коэффициента определяется взаимным расположением шин.

На основе рассмотренной выше методики в среде MathCad была разработана программа расчета прогибов, напряжений в материале шин и нагрузок на изоляторы, а также динамических коэффициентов шинных конструкций сложной пространственной конфигурации (рис. 4).

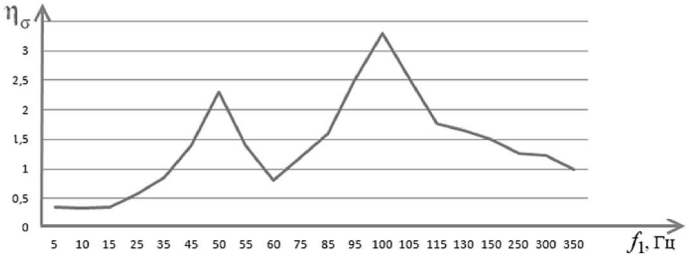


Рис. 4. Динамические коэффициенты результирующих напряжений в материале шины крайней фазы нижнего яруса жесткой ошиновки ОРУ 110 кВ, выполненного мостиковой схемой, при трехфазном КЗ и декременте затухания равным 0,114

При приближенных оценках электродинамической стойкости изоляторов и шин удобно использовать простую расчетную схему с одной степенью свободы, движение которой описывается обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка

$$m_{\text{пр}}\frac{\partial^2 y_{\text{пр}}}{\partial t^2}+2hm_{\text{пр}}\frac{\partial y_{\text{пр}}}{\partial t}+c_{\text{пр}}y_{\text{пр}}=Q_{\text{пр}}, \qquad (17)$$

где $m_{\text{пр}}$, $y_{\text{пр}}$, $c_{\text{пр}}$ – соответственно приведенные масса, кг, прогиб, м, жесткость, Н/м, шинной конструкции; $Q_{\text{пр}}$ – приведенная электродинамическая нагрузка, Н.

Решение уравнений (7) и (17) оказываются близкими, если параметры расчетной схемы с одной степенью свободы удовлетворяют условиям

$$Q_{\text{пр}}=\int_0^z q(z)ldz; \quad c_{\text{пр}}=c; \quad f_{\text{пр}}=f_1, \qquad (18)$$

где c – жесткость шинной конструкции, Н/м; $f_{\text{пр}}$ – приведенная частота колебаний расчетной схемы с одной степенью свободы, Гц; f_1 – первая (основная) частота колебаний шинной конструкции, Гц.

Уравнение (17) может быть использовано как для конструкций с абсолютно жесткими, так и упруго-податливыми опорами. В последнем случае частота собственных колебаний определяется с учетом жесткости и массы опор.

Значения напряжений в материале и нагрузок определяются по формулам

$$\sigma_{\max}=\sigma_{\text{ст}}\eta; \quad F_{\max}=F_{\text{ст}}\eta, \qquad (19)$$

где $\sigma_{\text{ст}}$ и $F_{\text{ст}}$ – максимальные напряжения и нагрузки от статической нагрузки, равной максимуму ЭДН; η – динамический коэффициент, полученный из решения задачи для системы с одной степенью свободы.

Дальнейшее упрощение задачи можно получить, учитывая, что частота собственных колебаний жесткой ошиновки 110 кВ и выше, как правило, не превышает 1-5 Гц, то есть остается много ниже частот периодических составляющих электродинамической нагрузки 50 и 100 Гц.

Как показал анализ результатов расчетов шинных конструкций 110 (в некоторых случаях 35) кВ и выше расчеты электродинамической стойкости можно проводить, учитывая только первые две временные составляющие ЭДН (4) постоянную и апериодическую. Более того, расчеты можно проводить для эквивалентной постоянной составляющей электродинамической нагрузки

$$q_{\text{ст}}=\frac{\alpha_0}{a}I_m^2\left(D_1+\Delta D\right)=\frac{\alpha_0}{a}I_m^2\gamma D_1, \qquad (20)$$

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

$$\Delta D=\frac{2D_2}{T}\int_0^{T/2}T_2(t)dt=T_aD_2f_1\left(1-e^{-\frac{1}{f_1T_a}}\right). \qquad (21)$$

Тогда наибольшие нагрузки на изоляторы вычисляются по формуле (19), в которой $\sigma_{\text{ст}}$ и $F_{\text{ст}}$ определяются при статической нагрузке $q_{\text{ст}}$ (20), а динамический коэффициент принимается равным 2.

Четвертая глава посвящена анализу ветровых воздействий на ошиновку, которые вызывают два вида нагрузок: продольные, 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.

Ветровые резонансные колебания жестких трубчатых шин ОРУ обусловлены периодическими срывами вихрей, возникающих при относительно небольших (порядка нескольких метров в секунду) скоростях ветра. В результате на шину действуют периодические нагрузки, направленные поперек воздушного потока. Если частота срыва вихрей (нагрузок) совпадает или близка к частоте собственных колебаний шины, наступает ветровой резонанс. Частота срыва вихрей определяется по формуле Струхаля и зависит от скорости воздушного потока.

Устойчивые резонансные колебания не возбуждаются, если наибольший прогиб $y_{\text{р max}}$ не достигает допустимого (критического) значения $y_{\text{р.доп}}$

$$y_{\text{р max}} \le y_{\text{р.доп}}. \tag{22}$$

Допустимый прогиб составляет 0,02-0,04 от внешнего диаметра шины. Максимальные расчетные прогибы при ветровом резонансе приближенно равны

$$y_{\text{р,max}} = \frac{c_{y0}\rho_{\text{в}} D^3 r_{1y}^4 k_S^2}{mB\delta_y}, \tag{23}$$

где c_{y0} – коэффициент аэродинамических нагрузок, который принимается равным 0,8; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м^3; D – внешний диаметр шины, м; $r_{1\text{y}}$ – параметр первой частоты собственных колебаний шины в вертикальной плоскости; k_s – коэффициент, определяющий область скоростей ветра при устойчивых колебаниях, равный 0,7-1,37; B – коэффициент пропорциональный жесткости шины; m – погонная масса шины с учетом массы демпфирующего устройства, кг/м; δ_y – логарифмический декремент колебаний шины в вертикальной плоскости.

Таким образом, одним из эффективных путей подавления устойчивых эоловых колебаний является увеличение логарифмического декремента колебаний, то есть увеличение рассеяния энергии при колебании шины в вертикальной плоскости.

При непосредственном участии автора были проведены испытания по определению логарифмического декремента и частоты свободных колебаний более 30 конструкций жесткой ошиновки ОРУ напряжением 35-750 кВ с различными демпфирующими устройствами. Исследовались головные и серийные шинные конструкции следующих производителей: ЗАО «ЗЭТО», ЗАО ПФ «КТП-Урал», ЗАО ГК «Электрощит-ТМ «Самара», ЗАО «ЧЭАЗ» и другие. Цель работы заключалась в выборе экономичного и эффективного демпфирующего устройства, обеспечивающего гашение устойчивых ветровых резонансных колебаний шин, а также в выявлении конструктивных недостатков и разработке предложений по их устранению.

Для экспериментального определения логарифмического декремента колебаний проводилось осциллографирование свободных колебаний шины с помощью вибрационного датчика ЭВ1 с частотным диапазоном от 0 до 60 Гц, чувствительностью 2,2 В/g. В качестве регистрирующего устройства использовался цифровой осциллограф АСК3107.

Логарифмический декремент колебаний определялся по формуле

$$\delta = \frac{1}{k-m} \ln \frac{A_m}{A_k} \quad (k > m), \tag{24}$$

где k и m – номера амплитуд свободных колебаний; A – амплитуда колебаний, м.

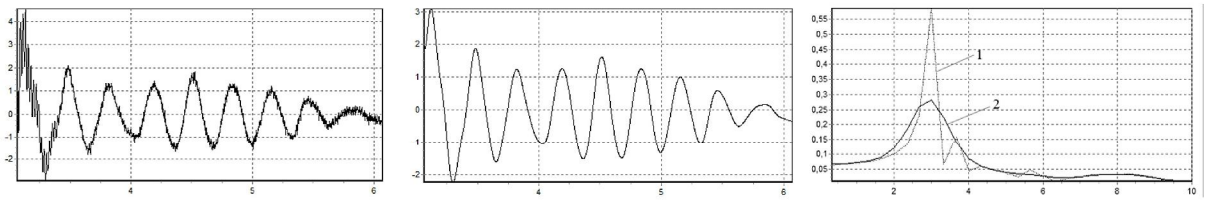
Результаты измерений свободных колебаний различных шинных конструкций показывают, что осциллограммы колебаний имеют достаточно сложный характер, поскольку возбуждаются несколько форм колебаний ошиновки, имеют место удары демпферов о стенку шины, а также соударения других элементов за счет люфтов крепежных деталей. Кроме того, логарифмический декремент δ является функцией амплитуды прогиба шины A. Все это затрудняет обработку экспериментальных данных. Поэтому при обработке осциллограмм по формуле (24) использовались достаточно большие интервалы времени с выборкой характерных амплитуд.

Кроме того, в работе проводилась обработка осциллограмм и определение логарифмического декремент колебаний спектральным методом и методами сглаживания и огибающих. Для этого использовалась программная система для цифровой обработки осциллограмм колебаний различных объектов *VST Decrements* 07.

При использовании спектрального метода экспериментальные осциллограммы снимаются в виде дискретных цифровых рядов с заданной частотой точек. Данный метод имеет ограничение, поскольку дает завышенные значения малых декрементов (относительные декременты менее 1 %) на низких частотах (менее 10 Гц).

Наличие шумов в осциллограммах существенно усложняет их обработку, чтобы выделить существенные пики на фоне шумов и нерегулярностей, проводится сглаживание. Предусмотрено три способа сглаживания: простая замена каждой точки средним арифметическим по заданному окну; замена каждой точки взвешенным средним гауссовой плотностью вероятности (с центром распределения на заменяемой точке); релаксационное сглаживание на основе простейшей явной разностной схемы численного решения уравнения диффузии. Корректность работы алгоритма определения собственных частот и ширины спектральных линий была проверена графическим анализом Фурье спектров мощности.

Метод сглаживания основан на формуле (24) применительно к сглаженным осциллограммам. Сглаживание проводится на основе релаксационной процедуры до выявления основной гармоники с наименьшей частотой. Результат работы процедуры демонстрируется на рис. 5. Данный метод хорошо работает при наличии одной явно выраженной частоты.



а) б) в)

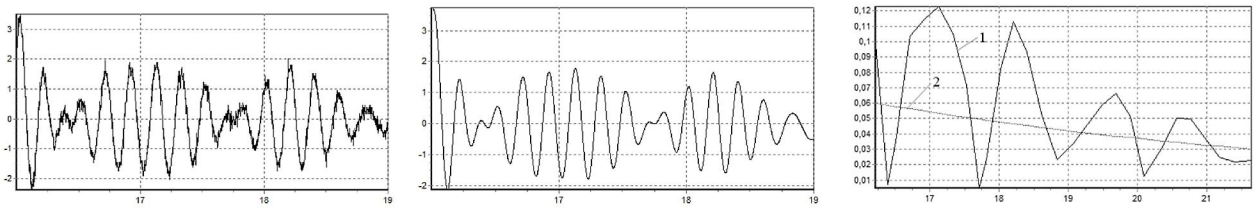
Рис. 5. Пример релаксационного сглаживания и влияния сглаживания на спектр мощности: а – исходная осциллограмма; б – сглаженная осциллограмма; в – спектр мощности: 1 – исходный; 2 – сглаженный

Метод огибающих применялся при наличии двух близких низких частот. Метод заключается в численном определении среднего тангенса угла наклона зависимости логарифмов амплитуд от времени методом наименьших квадратов. При наличии одной гармоники данный метод дает точное значение декремента, при наличии двух-трех близких низкочастотных гармоник такая процедура дает величину, называемую эффективным наклоном. Тогда соответственно эффективный декремент определяется по формуле

$$\delta = \delta_{eff} = S / f_{eff} , \qquad (25)$$

где S – тангенс угла наклона зависимости логарифмов амплитуд от времени $\ln A = f(t)$; f_{eff} – значение эффективной частоты, вычисляемой как средневзвешенное значение по низким частотам с весами, равными высотам соответствующих пиков спектра мощности.

Для правильного определения декрементов предварительно проводится релаксационное сглаживание, далее строятся нескольких последовательных огибающих до получения монотонно спадающей кривой. На рис. 6 представлен пример обработки осциллограммы данным методом.



а) б) в)

Рис. 6. Пример обработки осциллограммы методом огибающих: а – исходная осциллограмма; б – сглаженная осциллограмма; в – первая (1) и вторая (2) огибающие

На основе результатов экспериментально-аналитических исследований установлено, что для конструкций 35-220 кВ типовые демпферы в виде провода, металлического стержня (или проволоки) при определенных значениях длин и масс обеспечивают необходимый уровень рассеяния энергии и подавление устойчивых ветровых резонансных колебаний. Однако, в длиннопролетных (более 15 м) шинных конструкциях напряжением 330-750 кВ типовые демпферы в виде проводов и стержней не эффективны.

При участии автора НТЦ «ЭДС» разработано и внедрено в производство демпфирующее устройство (патент на полезную модель №100859) [3], представляющее собой опрессованный трос определенной жесткости с грузом на свободных концах. Устройство может подвешиваться к шине снизу, навешиваться на шину сверху, устанавливаться внутри трубчатой шины.

Разработана и реализована в программе Mathcad методика расчета колебаний шин с динамическим гасителем колебаний для оценки его наиболее эффективных параметров. Методика основана на решении системы уравнений, описывающих колебания шины с демпферами как упругой системы с двумя степенями свободы при ветровом резонансе

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + (c_1 + c_2)y_1 - c_2y_2 + (b_1 + b_2)\dot{y}_1 - b_2\dot{y}_2 = q(y_1); \\ m_2\ddot{y}_2 - c_2y_1 + c_2y_2 - b_2\dot{y}_1 + b_2\dot{y}_2 = 0, \end{cases} \quad (26)$$

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 гасителя вибраций) и демпфера; y_1 – перемещение шины в точке подвески демпфера; y_2 – перемещение демпфера; $q_y(y_1)$ – нагрузка, действующая на шину при ветровом резонансе.

Экспериментальные исследования демпфера проводились на полномасштабных конструкциях жесткой ошиновки ОРУ напряжением 330, 500 и 750 кВ с установкой демпфера НТЦ «ЭДС» снаружи (сверху, снизу) и внутри. Следует отметить, что полученные при испытаниях значения логарифмического декремента колебаний шин с разработанным демпфером оказались близкими к расчетным.

Проведенные экспериментальные и аналитические исследования колебаний шин с различными модификациями динамического гасителя вибраций подтвердили его эффективность, позволили определить его оптимальные параметры и принять к установке на современных шинных конструкциях 330-750 кВ отечественных производителей. При этом логарифмический декремент колебаний шины с этим демпфером в 3-5 раз выше, чем у конструкции без демпфера, и в 2,7-3,5 раза – по сравнению с ошиновкой с демпфером типа провод или стержень. Таким образом, была решена задача обеспечения глубокого уровня демпфирования современных длиннопролетных конструкций жесткой ошиновки напряжением 330-750 кВ.

Исследования показали, что демпфер НТЦ «ЭДС» значительно повышает логарифмический декремент не только при колебаниях шин в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости. Таким образом, установка такого демпфера не только обеспечивает подавления эоловых вибраций, но и повышает ветровую (7-20 %) и электродинамическую стойкость (15-25 %), прежде всего при повторных включениях на КЗ.

На основе проведенной работы сформулирована экспериментально-аналитическая методика определения эффективности отстройки от ветровых резонансов и стойкости ошиновки при сочетании нагрузок, вошедшая в стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.060.10.117-2012 [10].

В пятой главе проведен анализ современных конструктивных решений, расчетов и испытаний жесткой ошиновки ОРУ 35-750 кВ, рассмотрены особенности различных условий выбора, проверок и испытаний жесткой ошиновки.

При разработке большинства современных отечественных конструкций с жесткими шинами напряжением 35-750 кВ автором были выполнены аналитические проверки более 60 модификаций ошиновок по условиям рабочих режимов и КЗ. В результате расчетов были выявлены несоответствия ряда разрабатываемых шинных конструкций требованиям нормативных документов, что позволило своевременно внести корректировки в конструкции, изменить параметры шин, исполнения узлов крепления, а также выбрать изоляторы с прочностными характеристиками, соответствующими ожидаемым гололедным, ветровым и электродинамическим нагрузкам.

После проведения расчетов и внесения необходимых конструкторских изменений шинные конструкции успешно прошли квалификационные испытания и аттестацию для использования на объектах ОАО «ФСК ЕЭС», Холдинг «МРСК» и других организациях. Большинство конструкций внедрены и успешно эксплуатируются на подстанциях сетевых компаний и промышленных предприятий.

Подробно рассмотрен выбор шин по статическому прогибу от собственного веса и веса гололеда. Наибольший прогиб шин от собственного веса и силы тяжести ответвлений $y_{\text{ст.max}}$ не должен превышать допустимого статического прогиба $y_{\text{ст.доп}}$.

Обычно статический прогиб шин определяется аналитически методами строительной механики. Тем не менее, если шины имеют предварительную деформацию, сложное конструктивное исполнение (например, в виде плоской или пространственной фермы) и в ряде других случаев статические прогибы рекомендуется определять экспериментально.

Поскольку гололедная нагрузка имеет распределенный характер, а при испытаниях ее моделирование осуществляется эквивалентными сосредоточенными нагрузками, определены поправочные коэффициенты $k_{\text{мод}}$, учитывающие место установки и массу сосредоточенных грузов.

Таким образом, была сформулирована методика экспериментального определения прогиба шин от собственного веса и веса гололеда, которая вошла в стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.060.10.117-2012 [10].

На основании проведенного анализа расчетов и испытаний жесткой ошиновки на нагрев при протекании номинального тока в рабочем режиме, а также токов КЗ (термической стойкости) разработаны рекомендации по применению различных алюминиевых сплавов для изготовления шин и снижения материалоемкости шинных конструкций. Например, обоснована целесообразность замены шин из сплава 1915Т на шины из сплавов АД31Т1, 6063–Т6, АВТ1 для внутриячейковых связей, а при рабочих токах более 3000 А – сборных шин ОРУ 35-220 кВ без снижения надежности по условиям ветровой и

электродинамической стойкости, а также при выполнении всех других установленных для жесткой ошиновки требований.

Установлено, что для типовых конструкций 110 кВ и выше при ударном токе КЗ более 102 кА необходима установка изоляторов с минимальной разрушающей нагрузкой более 10 кН.

Использование полимерных изоляторов приводит к увеличению прогибов шин при воздействии электродинамических и ветровой нагрузок, что следует учитывать при выборе расстояний между фазами.

Разработанные рекомендации позволили успешно внедрить шинные конструкции различного исполнения в ОРУ 35-500 кВ, обеспечив необходимую эксплуатационную надежность.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате работы были определены распределенные электродинамические нагрузки и отдельные их временные составляющие в шинных конструкциях с поворотами и ответвлениями при двух- и трехфазных КЗ.

2. Обоснована методика расчета электродинамической стойкости жесткой ошиновки с поворотами и ответвлениями, которая основана на определении прогибов, напряжений в материале шин и нагрузок на изоляторы от статической нагрузки равной сумме первой и эквивалентной второй составляющим электродинамической силы с учетом динамического коэффициента, равного 2.

3. Разработан и внедрен эффективный гаситель вибраций длиннопролетных шин ОРУ напряжением 330-750 кВ, обеспечивающий подавление ветровых резонансных колебаний и повышающий электродинамическую и ветровую стойкость ошиновки. Разработана методика расчета шинных конструкций при ветровых резонансах с учетом влияния динамического гасителя колебаний, определены его конструктивные параметры и даны рекомендации по его применению.

4. Разработана экспериментально-аналитическая методика определения эффективности отстройки от ветровых резонансов, а также методика экспериментального определения прогиба шин от собственного веса и веса гололеда, которые включены в стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.060.10.117-2012 «Типовые программы и методики квалификационных, периодических и приемосдаточных испытаний жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ».

5. Разработаны рекомендации по проектированию жесткой ошиновки на основе анализа работоспособности современных конструкций напряжением 35-750 кВ различного исполнения.

6. Результаты работы позволили разработать и успешно внедрить более 25 типов шинных конструкций различного исполнения в ОРУ напряжением 35-750 кВ, обеспечив необходимую эксплуатационную надежность.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **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.

2. **Долин А.П., Егорова Л.Е.** Современные демпфирующие устройства жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 35-750 кВ // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2012. №2. С. 28-32.

3. **Официальный** бюллетень «Изобретение. Полезные модели» за 2010 г. Бюллетень №36. Опубликован 27.12.2010 г. Издание «Роспатент». ФБУ «ФИПС» Патент на полезную модель №100859. Зарегистрирован в государственном реестре полезных моделей РФ 21.12.2010 г.

4. **Долин А.П., Егорова Л.Е.** Конструктивные особенности и опыт аналитических и экспериментальных исследований жесткой ошиновки ОРУ 110-500 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. №5(8). С. 76-81.

5. **Долин А.П., Егорова Л.Е.** Исследование влияния конструктивных параметров на ветровую и электродинамическую стойкость жесткой ошиновки // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 3-х т. М.: Издательство МЭИ, 2010. Т. 3. С.413-414.

6. **Долин А.П., Егорова Л.Е.** Воздействие электродинамических нагрузок в шинах с поворотами и ответвлениями // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 3-х т. М.: Издательство МЭИ, 2011. Т. 3. С. 353-355.

7. **Долин А.П., Долин С.А., Егорова Л.Е.** Обеспечение эксплуатационной надежности жесткой ошиновки ОРУ 110-500 кВ // Труды Всероссийской науч.-практ. конф. «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» – ЭНЕРГО-2010. В 2-х Т. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. Т. 2. С.26-29.

8. **Долин А.П., Егорова Л.Е.** Применение современных демпфирующих устройств жесткой ошиновки ОРУ // Труды II всероссийской науч.-практ. конф. «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем – ЭНЕРГО-2012. М.: Издательский дом МЭИ. С. 36-39.

9. **Долин А.П., Егорова Л.Е.** Применение современных шинодержателей в отечественных конструкциях жесткой ошиновки // Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. №4(13). С. 66-71.

10. **СТО 56947007-29.060.10.117-2012** «Типовые программы и методики квалификационных, периодических и приемосдаточных испытаний жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ» Утвержден и введен в действие Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» № 135 от 20.03.2012. // Разделы 12, 18. С. 55-64, 76-87.