АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЭНЕРГЕТИКА И ТРАНСПОРТ

Том 36

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА · 1990

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР
ЭНЕРГЕТИКА И ТРАНСПОРТ
№ 4 1990

УДК 621.316.35.056.001.24

ДОЛИН А. П.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКИ ПРИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ

Излагается методика расчета нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин при воздействии ветра как стационарного случайного процесса на линейную систему с одной степенью свободы. Получены формулы и построены кривые, удобные для инженерных расчетов. Проведен анализ динамического воздействия ветра на шинные конструкции распределительных устройств 110–220 кВ. Выполнен пример расчета.

В последние годы в открытых распределительных устройствах (ОРУ) напряжением 110 кВ и выше все шире используется жесткая трубчатая ошиновка. Внедрение жестких шин позволило сократить площадь и снизить профиль ОРУ, уменьшить расход металлоконструкций, повысить производительность труда при монтажных работах. В [1, 2 и др.] разрабатывалась методика расчета электродинамической и термической стойкости жесткой ошиновки. Вместе с тем в практике проектирования возникают трудности в оценке динамической стойкости ошиновки ОРУ при ветровых нагрузках. Так, в Правилах устройства электроустановок рассматривается методика расчета только гибкой ошиновки и не приводятся рекомендации по расчетам конструкций с жесткими шинами. Рекомендации СНиП [3] для этих целей использовать затруднительно, так как они разработаны для зданий и сооружений башенного типа и не учитывают особенности выполнения жесткой ошиновки ОРУ.

В настоящее время стойкость ошиновки при ветровых нагрузках рассчитывается приближенно на статическую нагрузку (без учета динамического характера ее воздействия), поэтому при оценке стойкости изоляторов и шин вводят достаточно большие коэффициенты запаса прочности. Для некоторых шинных конструкций такой подход дает удовлетворительные результаты. Вместе с тем он может приводить к неоправданному запасу или, наоборот, недопустимому снижению прочности ошиновки.

Ниже излагается методика расчета стойкости изоляторов и шин ОРУ на основе статистической (вероятностной) модели воздействия на жесткую ошиновку ветровых нагрузок. Результаты приводятся к удобному для инженерных расчетов виду. Поперечные колебания шин, обусловленные срывом вихрей и возникновением ветровых резонансов, здесь не учитываются.

Мгновенные значения скорости ветра V в приземном слое воздуха можно представить как сумму статической $\overline{V}$ и динамической (пульсирующей) v составляющих:

$$V(t)=\overline{V}+v(t). \tag{1}$$

Пульсации вызваны торможением частиц воздуха о поверхность земли, конвекционными потоками между различно нагретыми слоями, трениями между слоями, движущимися с разной скоростью. Пульсации скорости носят нерегулярный характер. Вместе с тем в интервале времени, достаточно большом по сравнению с преобладающим периодом пульсации, статистические свойства переменной составляющей скорости ветра v можно считать практически неизменными, что позволяет скорость ветра, а также ветровую нагрузку трактовать как стационарные случайные процессы [4–6]. Поскольку длина пролета шины относительно невелика (как правило, 8–15 м), скорость по фронту (в пределах пролета) можно принять одинаковой и, следовательно, ветровую нагрузку можно считать стационарной случайной функцией только одной переменной времени t.

Для описания характеристик стационарного случайного процесса удобно использовать спектральную плотность, называемую иногда также спектральной мощностью, спектральной плотностью энергии и др. Согласно теории изотропной турбулентности [7] спектральную функцию пульсаций скорости ветра $S_V(\omega)$ можно аппроксимировать по закону $\omega^{-5/3}$. Вместе с тем в области низких частот пульсаций $\omega \leqslant \omega_1 \approx 0{,}25$ рад/с спектральная плотность скорости ветра пропорциональна нулевой степени частоты [6]. В области высоких частот собственных колебаний $\omega \geqslant \omega_в$, равных 6,28–15,7, мощность пульсаций очень мала, кроме того, они «отфильтровываются» колебательной системой и поэтому в инженерных расчетах спектральную плотность $S_V(\omega)$ оправдано принять равной нулю. Таким образом, в соответствии с [5–7]

$$S_V(\omega)=C_1(\varepsilon\overline{V})^{2/3}\Phi(\omega), \tag{2}$$

где

$$\Phi(\omega)=\begin{cases}\omega_1^{-5/3} & \text{при} \quad \omega\leqslant\omega_1;\\ \omega^{-5/3} & \text{при} \quad \omega_1\leqslant\omega\leqslant\omega_в;\\ 0 & \text{при} \quad \omega>\omega_в;\end{cases}$$

C_1 — универсальная постоянная, равная для высоты до 10 м 0,4–0,5; ε — диссипация энергии, определяемая по формуле

$$\varepsilon=\overline{V}^3\varkappa^2/z[\ln(z/z_0)]^3; \tag{3}$$

здесь $\varkappa=0{,}4$ — постоянная Кармана; z — высота относительно земли, м; z_0 — параметр шероховатости, равный 0,05–0,2 м в зависимости от типа местности.

В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость спектральной плотности ветра от частоты пульсаций при статической скорости $\overline{V}=20$ м/с, $z=10$ м, $z_0=0{,}05$ м.

Мерой отклонения от среднего значения случайной величины служат дисперсия, а также среднее квадратичное отклонение (или стандарт) равное корню квадратному из дисперсии. Дисперсия и спектральная плотность связаны зависимостью

$$D_V=\int\limits_0^\infty S_V(\omega)\,d\omega, \tag{4}$$

где D_V — дисперсия скорости ветра, м²/с².

Так как при $\omega>\omega_в$ спектральная плотность обращается в нуль, верхний предел интегрирования в уравнении (4) можно принять равным нулю. Нижний предел интегрирования $\omega_н$ устанавливают равным граничной частоте динамической скорости ветра 0,01 рад/с. При периоде осреднения скорости ветра 600 с частоты ω, лежащие выше $\omega_н=0{,}01$ рад/с, определяют динамическую составляющую, отвечающую стационарному случайному процессу [4, 5].

Нагрузка (Н/м) на цилиндрическую шину в потоке воздуха без учета реакции, связанной с ускорением потока, составляет

$$q(t)=0{,}5\rho_в c_x dV(t)\,|V(t)|, \tag{5}$$

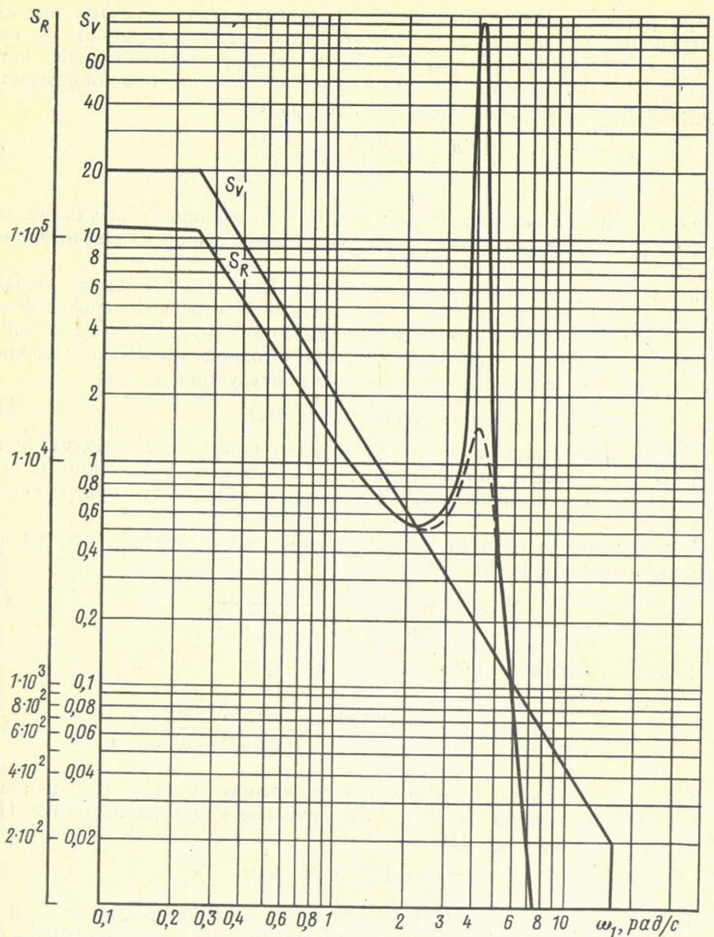


Рис. 1. Спектральные плотности скорости ветра и нагрузки на изоляторы

где $\rho_в$ — плотность воздуха, кг/м³ c_x — коэффициент лобового сопротивления, который примерно равен значению $\bar{c}_x$ при средней скорости ветра; d — внешний диаметр шины, м.

Подставляя (1) в (5) и пренебрегая слагаемым второго порядка малости, содержащего $v^2(t)$, получим

$$q(t)=\bar{q}+\frac{2\bar{q}}{\overline{V}}v(t), \tag{6}$$

где $\bar{q}$ — среднее значение ветровой нагрузки на шину, равное

$$\bar{q}=0{,}5\rho_в\bar{c}_x d\overline{V}^2. \tag{7}$$

Дисперсия и спектральная плотность ветровой нагрузки согласно (6) определяются по формулам

$$D_q=D_V\cdot 4\bar{q}^2/\overline{V}^2; \tag{8а}$$

$$S_q(\omega)=S_V(\omega)\cdot 4\bar{q}^2/\overline{V}^2. \tag{8б}$$

При расчете колебаний под действием случайной нагрузки шинную конструкцию можно, как и в [1], приближенно рассматривать в виде системы с одной степенью свободы. Если пренебречь воздействием ветра на изоляторы ошиновки, движение шинной конструкции описывается дифференциальным уравнением второго порядка

$$\frac{d^2y}{dt^2}+2h\frac{dy}{dt}+\Omega^2 y=\frac{Q}{m}, \tag{9}$$

где y — прогиб системы, м; t — время, с; h — коэффициент затухания, $с^{-1}$; $\Omega=2\pi f$ — угловая частота собственных колебаний, рад/с; Q — приведенная сила, Н; m — приведенная масса шины, кг.

Параметры расчетной одномассовой системы выбираются из условий равенства приведенной силы и результирующей ветровой нагрузки $Q=ql$; жесткости одномассовой системы и шинной конструкции $c=c_ш$, а также частоты собственных колебаний системы с одной степенью свободы f и первой (основной) собственной частоты конструкции f_1, т. е.

$$f=f_1=(r_1^2/2\pi l^2)(EJ/m_ш)^{1/2}, \tag{10}$$

где r_1 — параметр частоты; l — длина пролета шины, м; E — модуль упругости, Па; J — момент инерции, $м^4$; $m_ш$ — погонная масса шины, кг/м. Приведенная масса расчетной системы определяется зависимостью $m=c/\Omega^2$.

Спектральные плотности «входа» и «выхода» линейной системы связаны соотношением [8, 9]

$$S_y(\omega)=\frac{S_q l^2}{m^2[(\Omega^2-\omega^2)^2+4h^2\omega^2]}. \tag{11}$$

Дисперсия прогиба определяется по формуле

$$D_y=\int_0^\infty S_y(\omega)\,d\omega=\frac{4\bar{q}^2l^2\Omega^4}{\bar{V}^2c^2}\int_{\omega_н}^{\omega_в}\frac{S_V(\omega)\,d\omega}{(\Omega^2-\omega^2)^2+4h^2\omega^2}. \tag{12}$$

Верхний и нижний пределы интегрирования в (12), как и ранее, можно принять равным $\omega_в$ и $\omega_н$. Напряжения в материале шины (Па) и нагрузки на изоляторы (Н) равны [1]

$$\sigma=ycl/\lambda W \text{ и } R=\beta cy, \tag{13}$$

где W — момент сопротивления поперечного сечения шины, $м^3$; λ и β — параметры, зависящие от условий закрепления шин на изоляторах пролета (таблица).

Математические ожидания прогиба, а также напряжений в материале шины и нагрузок на изоляторы находятся из решения статической задачи по формулам

$$\bar{y}=\bar{q}l/c;\quad \bar{\sigma}=\bar{q}l^2/\lambda W;\quad \bar{R}=\beta\bar{q}l. \tag{14}$$

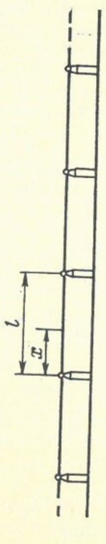
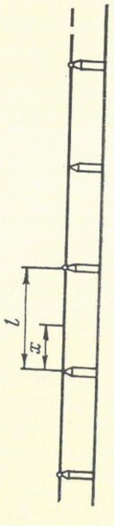
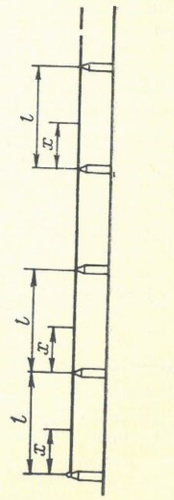
В соответствии с (11) и (13) спектральные плотности напряжений и нагрузок составляют

$$S_\sigma(\omega)=\left(\frac{cl}{\lambda W}\right)^2 S_y(\omega)=\frac{l^4}{(\lambda W)^2}\,\frac{\Omega^4 S_q(\omega)}{(\Omega^2-\omega^2)^2+4h^2\omega^2}; \tag{15а}$$

$$S_R(\omega)=\beta^2c^2S_y(\omega)=\frac{\beta^2l^2\Omega^4S_q(\omega)}{(\Omega^2-\omega^2)^2+4h^2\omega^2}. \tag{15б}$$

На рис. 1 приведены зависимости спектральных плотностей нагрузок на изоляторы конструкции напряжением 220 кВ с разрезными шинами

Параметры шинных конструкций

Схема шинной конструкции	Пролеты	Параметр частоты r_1 *	Коэффициент β	Параметр $1/\lambda(x)$	Наибольшее значение $1/\lambda$
	Все	3,14	1,0	$\frac{1}{2}\left\lvert\frac{x}{l}-\frac{x^2}{l^2}\right\rvert$	1/8
	Все *	3,92	1,25 **	$\left\lvert\frac{5}{8}\frac{x}{l}-\frac{1}{2}\frac{x^2}{l^2}-\frac{1}{8}\right\rvert$	1/8
	Крайний	4,73	1,13	$\left\lvert 0{,}394\frac{x}{l}-0{,}5\frac{x^2}{l^2}\right\rvert$ ***	1/9,5
	Второй	4,73	1,13	$\left\lvert 0{,}529\frac{x}{l}-0{,}5\frac{x^2}{l^2}-0{,}106\right\rvert$	1/9,5
	Средние	4,73	1,0	$\frac{1}{2}\left\lvert\frac{x}{l}-\frac{x^2}{l^2}-\frac{1}{6}\right\rvert$	1/12

* Для конструкций с практически абсолютно жесткими опорами.
** Для опор с защемлением. Для опор с шарнирным опиранием $\beta=0{,}75$.
*** Шарнирное опирание в пролете при $x=0$.

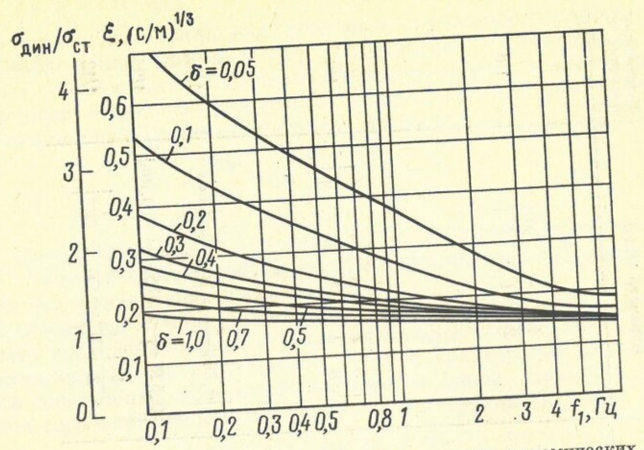


Рис. 2. Зависимости параметра ξ, а также относительных динамических прогибов (напряжений в шине, нагрузок на изоляторы) при средней скорости ветра 32 м/с от частоты собственных колебаний шинной конструкции при различных декрементах затухания

(при шарнирном опирании на изоляторы пролета). Внешний диаметр шин 130 мм, длина пролета $l=15$ м, частота собственных колебаний шинной конструкции $f=0{,}7$ Гц ($\Omega=4{,}4$ рад/с). Условия атмосферы стандартные (давление $p_в=760$ мм рт. ст., температура $\vartheta_в=15°$ С) и плотность воздуха $\rho_в=1{,}23$ кг/м³. Статическая скорость ветра $\bar{V}=20$ м/с. Сплошная кривая S_R на рис. 1 построена для конструкции с логарифмическим декрементом затухания $\delta=h/f=0{,}1$, а пунктирная – 0,8. Если затухание невелико, упругая система выполняет роль «фильтра», пропуская главным образом пульсации с частотой, близкой к Ω. Здесь имеет место явление, похожее на резонанс вынужденных колебаний при детерминированном периодическом воздействии. Составляющая нагрузки в этой зоне несет существенную часть мощности всего процесса. По мере роста рассеяния энергии значения S_R в этой области снижаются и мощность процесса определяется главным образом низкочастотными пульсациями нагрузки.

Дисперсии напряжений и нагрузок согласно (12) и (13) равны

$$D_\sigma=(cl/\lambda W)^2 D_v; \quad D_R=\beta^2 c^2 D_v. \tag{16}$$

Вероятность превышений средних значений напряжений и нагрузок можно оценить с помощью коэффициента изменчивости, равного отношению среднего квадратичного отклонения к математическому ожиданию:

$$w=D_v^{1/2}/\bar{v}=D_\sigma^{1/2}/\bar{\sigma}=D_R^{1/2}/\bar{R}=\xi\bar{V}^{1/3}, \tag{17}$$

$$\xi=2\Omega^2 C_1^{1/2}\frac{\varkappa^{2/3}}{z^{1/3}\ln(z/z_0)}\left[\int\limits_{\omega_н}^{\omega_в}\frac{\Phi(\omega)\,d\omega}{(\Omega^2-\omega^2)^2+4h^2\omega^2}\right]^{1/2}. \tag{18}$$

Для принятой расчетной схемы шинной конструкции как системы с одной степенью свободы коэффициенты изменчивости напряжений в материале шины, нагрузок на изоляторы и прогибов оказываются одинаковыми. На рис. 2 приведены зависимости параметра ξ от частоты собственных колебаний жесткой ошиновки для различных значений логарифмического декремента затухания при $z_0=0{,}05$, удобные для практических расчетов при любых скоростях ветра, полученные на ЭВМ. Определенный интеграл, входящий в уравнение (18), в пределах от $\omega_н$ до $\omega_в$ определялся численным методом.

При оценке стойкости шинной конструкции наибольшие расчетные напряжения и нагрузки на изоляторы удобно принять в виде суммы статической и динамической составляющих:

$$\sigma=\bar{\sigma}+\sigma_{дин}=\bar{\sigma}+\gamma_\sigma(D_\sigma)^{1/2}; \tag{19а}$$

$$R=\bar{R}+R_{дин}=\bar{R}+\gamma_R(D_R)^{1/2}. \tag{19б}$$

Статические составляющие $\bar{\sigma}$ и $\bar{R}$ – это математические ожидания напряжений и нагрузок, а динамические $\sigma_{дин}$ и $R_{дин}$ равны произведениям стандартов случайных функций σ и R на коэффициенты γ_σ или γ_R, связанные с надежностью шин и изоляторов. Если принять, что пульсации ветровых нагрузок отвечают нормальному закону распределения, то напряжения в шинах и нагрузки на изоляторы при ветровом напоре также отвечают гауссову распределению. Тогда вероятность обнаружить напряжения или нагрузки больше математического ожидания, например на один стандарт ($\gamma=1$), равна 0,1587, на два стандарта – 0,0228, на три – 0,00135 и т. д.

Уравнения (19) с учетом (17) приводятся к виду

$$\sigma=\bar{\sigma}(1+\gamma_\sigma w)=\bar{\sigma}(1+\gamma_\sigma\xi\bar{V}^{1/3}); \tag{20а}$$

$$R=\bar{R}(1+\gamma_R w)=\bar{R}(1+\gamma_R\xi\bar{V}^{1/3}). \tag{20б}$$

Стандарты γ при расчетах на ветровую нагрузку обычно принимают равными 2 [5]. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости отношений $\sigma_{дин}/\bar{\sigma}=R_{дин}/\bar{R}$ при $\gamma=2$ и скорости ветра $\bar{V}$, равной 32 м/с.

Следует отметить, что относительные динамические составляющие прогибов, нагрузок и напряжений, равные γw (иногда называемые динамическими коэффициентами), близки к значениям, рекомендуемым в [3]. Для конструкций с относительно высокой частотой собственных колебаний, расположенных в III–IV районах по скоростному напору ветра, эти коэффициенты практически совпадают.

Условия прочности шин и изоляторов при ветровых воздействиях определяются неравенствами

$$\sigma\leqslant\sigma_{доп}=N_\sigma\sigma_в; \tag{21}$$

$$R\leqslant R_{доп}=N_R R_{разр}, \tag{22}$$

где $\sigma_{доп}$ и $R_{доп}$ – допустимые значения напряжений и нагрузок; N_σ и N_R – коэффициенты, учитывающие условия работы шинной конструкции, требуемый запас прочности, вероятность снижения предела прочности (временного сопротивления разрыву) материала шин $\sigma_в$ или разрушающих нагрузок изоляторов $R_{разр}$ по сравнению с нормативными значениями.

Коэффициенты запаса целесообразно принять $N_\sigma=0{,}7$, $N_R=0{,}6$ так же, как в расчетах на электродинамическую стойкость. В этом случае для типовых шинных конструкций 110 кВ (обладающих частотой $f_1=3\div6$ Гц и декрементом затухания $\delta=0{,}5\div0{,}7$), расположенных в III–IV районах по скоростному напору ветра, отношения $(1+\gamma w)/N$ оказываются близкими к 3, т. е. примерно равным коэффициентам надежности, принятым в практике проектирования этих конструкций при расчетах на статическую ветровую нагрузку.

В областях сварных швов алюминиевых сплавов наблюдается снижение прочности материала на 10–50%, поэтому для сварных шин помимо условия (21) должно выполняться неравенство [2]

$$\sigma_{св}\leqslant\sigma_{доп.св}=N_\sigma\sigma_{в.св}, \tag{23}$$

где $\sigma_{доп.св}$ и $\sigma_{в.св}$ – допустимое напряжение и временное сопротивление разрыву в области сварного шва [2]; $\sigma_{св}$ – расчетное напряжение в этой области, определяемое по формуле (20а), в которой математическое ожидание напряжения в материале шины согласно (14) равно

$$\bar{\sigma}=\bar{\sigma}(x)=\bar{q}l^2/\lambda(x)W, \qquad (24)$$

где x — координата сварного шва; $\lambda(x)$ — значение параметра в этой точке (таблица).

Как отмечалось выше, уравнения (19) не учитывают ветровых усилий на шинные опоры. Обычно это не вносит существенной погрешности в расчеты. Приближенно нагрузки на изоляторы с учетом воздействия ветра на вертикальные опоры, составляют

$$R_{расч}\approx R+\Delta R=(\bar{R}+\Delta\bar{R})(1+\gamma w). \qquad (25)$$

Поправка $\Delta\bar{R}$ определяется из равенства изгибающих моментов в основании изоляционной опоры от распределенной по ее длине нагрузки и сосредоточенной силы, приложенной к вершине опоры

$$\Delta R\approx\bar{q}_{из}H/2, \qquad (26)$$

где H — высота опоры (изолятора), м; $\bar{q}_{из}$ — ветровая нагрузка на опору (Н/м), примерно равная

$$\bar{q}_{из}\approx 0{,}5\rho_в\bar{c}_{x\,из}d_{из}\bar{V}^2; \qquad (27)$$

здесь $\bar{c}_{x\,из}$ — коэффициент любого сопротивления изолятора; $d_{из}$ — характерный размер, который приближенно можно принять равным среднему арифметическому наибольшего и наименьшего диаметров изолятора.

Экспериментальные исследования параметров опытных и серийных шинных конструкций 110—220 кВ различного исполнения показали, что основные частоты их собственных колебаний лежат в пределах $1\leqslant f_1\leqslant 5$ Гц, а декременты затухания — $0{,}08\leqslant\delta\leqslant 0{,}7$; поэтому в I—IV районах по скоростному напору ветра (скорости ветра 25—32 м/с) при стандартах $\gamma=2$ динамические составляющие прогибов напряжений в материале шин, а также нагрузок на изоляторы оказываются равными 0,75—1,7, а средние квадратичные отклонения этих параметров 0,32—0,75 от статических значений.

Коэффициенты изменчивости w, а также дисперсии и динамические составляющие напряжений и нагрузок снижаются с увеличением частоты собственных колебаний конструкции, рассеяния энергии (декремента затухания) и средней скорости ветра. Необходимо отметить, что статическую составляющую скорости $\bar{V}$ следует принимать равной низкочастотной составляющей, оценка которой по средней скорости ветра дана в [5].

Пример. Проверить на стойкость шинную конструкцию напряжением 220 кВ, если низкочастотная составляющая скорости ветра равна 32 м/с. Внешний диаметр трубчатых шин из алюминиевого сплава АВТ1 $d=150$ мм, толщина стенки 10 мм, момент сопротивления $W=144\cdot 10^{-6}$ м^3, длина пролета $l=15$ м, частота собственных колебаний шинной конструкции $f_1=1{,}1$ Гц, логарифмический декремент затухания $\delta=0{,}2$. Изоляционные опоры типа ШО-220УI имеют высоту 2150 мм и средний диаметр $d_{из}$ около 200 мм. Разрезные шины с целым (сварным) участком, равным длине пролета. Сварные швы расположены на расстоянии 3 м от опор.

Временное сопротивление разрыву шины из сплава АВТ1 $\sigma_в=304$ МПа, а в зоне сварного шва, примерно на 50% меньше, т. е. $\sigma_{в,\,св}=152$ МПа. Допустимые напряжения в шине согласно (21) и (23) составляют $\sigma_{доп}=212{,}8$ МПа и $\sigma_{доп.\,св}=106{,}4$ МПа.

Разрушающие нагрузки шинных опор с учетом точки приложения нагрузки [10] $R_{разр}=5430$ Н. Допустимые нагрузки составляют $R_{доп}=0{,}6\cdot 5430=3250$ Н.

Примем условия атмосферы стандартными. Тогда плотность воздуха $\rho_в=1{,}23$ кг/м, а кинетическая вязкость $\nu=14{,}6\cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Числа Рейнольдса для шин и изоляторов, равны

$$\mathrm{Re}=\bar{V}d/\nu=\frac{32\cdot 0{,}15}{14{,}6\cdot 10^{-6}}=3{,}29\cdot 10^5;$$

$$\mathrm{Re}_{из}=4{,}38\cdot 10^5.$$

По нормативной кривой [3] определяем коэффициенты лобовых сопротивлений шины $c_x=0{,}65$ и изоляторов $c_{x\,из}=0{,}4$. По формулам (7) и (27) вычисляем средние значения ветровых нагрузок, действующих на шины и опоры

$$\bar{q}=0{,}5\cdot 1{,}23\cdot 0{,}65\cdot 0{,}15\cdot 32^2=61{,}4\ \text{Н/м};$$

$$\bar{q}_{из}=0{,}5\cdot 1{,}23\cdot 0{,}4\cdot 0{,}2\cdot 32^2=50{,}2\ \text{Н/м}.$$

Расчетной схемой конструкции с разрезными шинами является балка с шарнирным опиранием на упругих опорах. В соответствии с указаниями таблицы параметры шинной конструкции $\beta=1$, $1/\lambda(x)={}^1/_2|x/l-x^2/l^2|$. Минимальное значение $\lambda=8$; в областях сварных швов при x, равных 3 и 12 м, $1/\lambda(x)=0{,}08$.

Наибольшие статические напряжения в шине согласно (14) составляют

$$\bar{\sigma}=61{,}4\cdot 15^2/8\cdot 144=12{,}0\ \text{МПа},$$

а в области сварных швов

$$\bar{\sigma}_{св}=0{,}08\cdot 61{,}4\cdot 15^2/144=7{,}7\ \text{МПа}.$$

Статические нагрузки на изоляторы в соответствии с (14) и (26) равны $\bar{R}=1\cdot 61{,}4\cdot 15=927$ Н;

$$\Delta\bar{R}=50{,}4\cdot 2{,}15/2=54\ \text{Н}.$$

Таким образом, ветровые усилия, действующие непосредственно на опоры, вызывают нагрузки ΔR, составляющие менее 6% результирующей силы R.

По кривым (рис. 2) при $f_1=1{,}1$ Гц и $\delta=0{,}2$ находим параметр $\xi=0{,}21$ м/с. Коэффициент изменчивости равен

$$w=0{,}21\cdot 32^{1/3}=0{,}66.$$

Расчетные наибольшие напряжения, а также напряжения в области сварных шин вычисляем при $\gamma=2$ в соответствии с (20а)

$$\sigma=12{,}0\cdot(1+2{,}0\cdot 0{,}66)=12{,}0\cdot 2{,}32=27{,}8\ \text{МПа};$$

$$\sigma_{св}=7{,}7\cdot 2{,}32=17{,}9\ \text{МПа},$$

а нагрузки на изоляционные опоры – согласно (25):

$$R=(927+54)\cdot 2{,}32=2275\ \text{Н}.$$

Напряжения в материале шины, а также нагрузки на изоляционные опоры меньше допустимых значений. Таким образом, шинная конструкция удовлетворяет условиям (21) – (23).

Выводы. 1. Динамические составляющие прогибов напряжений в материале шин и нагрузок на изоляторы конструкций с частотой собственных колебаний больше 4—5 Гц в основном определяются «фоном» случайных колебаний, и рассеяние энергии шинной конструкции практически не влияет на наибольшие ожидаемые прогибы напряжения и нагрузки. При частоте собственных колебаний шинной конструкции меньше 4—5 Гц возрастает влияние чисто периодического процесса колебаний, амплитуда которого существенно зависит от диссипативных сил.

2. Для конструкций с жесткими шинами в ОРУ 110—220 кВ динамические составляющие прогибов напряжений и нагрузок равны 0,75—1,7 от статических значений в I—IV районах по скоростному напору ветра (при средней скорости ветра 25—32 м/с) и стандартах, равных 2. Расчетные динамические коэффициенты для жесткой ошиновки ОРУ хорошо согласуются со значениями, рекомендуемыми в СНиП для конструкций с близкими параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудрявцев Е. П., Долин А. П.* Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981. 96 с.
2. *Долин А. П.* Электродинамическая стойкость сварных шин // Пром. энергетика. 1983. № 12. С. 23–26.
3. Строительные нормы и правила СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. М.: ЦИТП Госстрой СССР, 1983. 36 с.
4. *Холодов В. В.* О некоторых основах динамического расчета ветровых воздейст-

вий на провода линий электропередачи // Ветровые и гололедные воздействия на конструкции горных ВЛ. М.: ЭНИН, 1986. С. 6–25.
5. *Шурыгин В. П.* Совершенствование методов расчета конструкций контактной сети // Тр. ВНИИТС. Вып. 81. М.: Транспорт, 1972. С. 1–75.
6. *Чучев А. П.* Экспериментальные исследования пульсаций горизонтальной составляющей скорости ветра в приземном слое воздуха // Тр. ГГО. Вып. 333. Л.: Гидрометиздат, 1974. С. 112–119.
7. *Монин А. С., Яглом А. М.* Статистическая гидромеханика. Ч. 2. М.: Наука, 1967. 720 с.
8. *Розанов Ю. А.* Случайные процессы. М.: Наука, 1979. 182 с.
9. *Болотин В. В.* Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982. 351 с.
10. *Долин А. П.* К определению допустимых нагрузок на изоляторы и шинные опоры // Пром. энергетика. 1981. № 10. С. 37–38.

Москва

Поступила в редакцию
13.IV 1989
