



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

ISSN 0201-4564

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

3 1994

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор ГОРИН В.И.

АНТИПОВ К.М. (зам. главного редактора), ВОЛКОВ Э.П., ДЕНИСОВ В.И., ДМИТРУХИН А.Ф., КОЩЕЕВ Л.А., КНОТЬКО П.Н., КОМАРОВ Н.Ф., КУЗНЕЦОВ Е.К., ЛЕБЕДЕВ Б.П. (зам. главного редактора), ЛЯШЕНКО В.С., МАТЮХИН Н.Д., МОРОЗОВ Ф.Я., НЕКЛЕПАЕВ Б.Н., НЕЧАЕВ В.В., ОРФЕЕВ В.М., ОХОТИН В.Н., ПИТКЕВИЧ В.А. (зам. главного редактора), ПРУШИНСКИЙ Б.Я., САВВАИТОВ Д.С., СОКОЛОВ Е.Я. (зам. главного редактора), ТРОФИМОВ Ю.В., ФЕДОСЕЕВ Б.С., ШАХСУВАРОВ К.В., ШИРОКОВА М.И. (ответственный секретарь), ЩЕРБАКОВ А.Д., ЯКОВЛЕВ Г.Г.

Научные редакторы: Абриотина Н.В., Соловьева Т.И.
Литературный редактор: Евсеева В.Н.

Раздел "Энергохозяйство за рубежом".

Научные редакторы: Алексеев Б.А., Котлер В.Р. Редактор: Орлова Г.Ф.

Телефоны: редакции: 925-21-22, 928-19-58; главного редактора: 220-67-36.

Адреса: редакции 103012, Москва, Б.Черкасский пер., 2/10;
Энергоатомиздата 113114, Москва, Шлюзовая наб., 10

УЧРЕДИТЕЛИ:
МИНИСТЕРСТВО ТОПЛИВА И ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
РОССИЙСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ,
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ
"ЭНЕРГОПРОГРЕСС"
ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ



Издается
с января 1930 года

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

МАРТ 3 1994

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

- 2 Кривцкий Г.В., Дуленин В.П., Измоленов Ю.А. Новые методы пылегазоочистки дымовых газов для создания экологически чистых ТЭЦ и котельных
- 6 Абриотин А.А., Майданик М.Н., Живаев А.С. Неожлаждаемый термосонд для измерения падающих тепловых потоков в топках котлов
- 11 Осыка А.С., Ефимов В.С. К вопросу о модернизации энергетической газовой турбины ГТ100 ПО ЛМЗ
- 17 Соркин Л.С. Влияние остаточных напряжений на эксплуатационную надежность паропроводов
- 27 Кирил И.Г. Оптико-механическое устройство дистанционного измерения ползучести металла паропроводов ТЭС
- 30 Баран Л.С. Инструментальные средства замера расходных характеристик охлаждающих систем электростанции
- 34 Петриченко А.Д. Проблемы эксплуатации энергетических масел и методы их решения

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

- 36 Машин В.А. О психологической проблеме эксплуатации и управления АЭС

СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

- 40 Докукин И.Я. Анализ и оптимизация циклов солнечных паротурбинных электростанций

ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ

- 47 Бережанский В.Б., Пикульский В.А., Преснов Ю.Л., Ромм Л.М., Ростик Г.В., Самородов Ю.Н., Цветков В.А., Чубраева Л.И. Разработка и внедрение новых средств оценки технического состояния турбогенераторов в Ленэнерго
- 53 Поляков В.И. Комплексные диагностические испытания мощных турбогенераторов

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

- 57 Долин А.П. Ветровой резонанс жестких трубчатых шин и способы его устранения

ОБМЕН ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОПЫТОМ

- 62 Приходько В.М., Кравченко В.И., Приходько А.М. Универсальный прибор экспресс-проверки

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ

- 66 Джангиров В.А., Баринов В.А., Маневич А.С. О принципах совместной работы энергосистем в энергообъединениях стран Западной Европы

персонала. Локальные схемы АСД не обеспечивают реализации ни одного из указанных принципов эффективности, поэтому трудно рассчитывать на высокую эксплуатационную эффективность работы таких систем. Разработка локальных АСД может быть целесообразна лишь на первом этапе работ для технической отработки блоков сбора, передачи и обработки диагностической информации.

Для широкого внедрения более пригодны сетевые схемы АСД на основе региональной диагностической центра. Сетевая схема АСД реализована фирмой Вестингауз при создании диагностического центра в Техасской энергосистеме (г. Орландо) [7]. Этот диагностический центр обслуживает 15 генераторов на трех электростанциях. Каждый генератор имеет индивидуальные блоки сбора первичных данных. Данные передаются в единый центр, где они обрабатываются в целях диагностики на мощной ЭВМ. Работа центра сопровождается специализированным персоналом, в задачи которого входит также наращивание базы диагностических "правил".

Таким образом в работе Техасского диагностического центра реализуются принципы региональности обслуживания, профессионального сопровождения и непрерывной корректировки алгоритмов. Что касается отсутствия в известной литературе упоминаний об активном взаимодействии с объектами в процессе диагностирования, то это связано, вероятно, с отсутствием в арсенале центра активных методов диагностики и способов управления дефектами. При необходимости активного диагностического взаимодействия сетевая схема АСД может быть легко дополнена техническими и организационными средствами такого взаимодействия через оперативный персонал энергоблока.

Выводы

1. Практически подтверждена высокая эффективность совершенствования методов эксплуатации мощных генераторов посредством разработки и внедрения новых методов технической диагностики.
2. Наибольшей эксплуатационной эффективностью отличаются методы диагностики, где ставится и решается задача управления скоростью развития обнаруживаемых дефектов.
3. Принятая в отечественной практике локальная схема построения автоматизированных систем диагностики турбогенераторов имеет ряд недостатков, которые устраняются а сетевой схеме АСД на базе регионального диагностического центра.

Список литературы

1. **Поляков В.И.** Методы диагностики технического состояния генераторов на основе штатных средств измерений. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: ВНИИЭ, 1992.
2. **Методы диагностики мощных турбогенераторов, использующие средства штатного контроля** / Гудин Е.В., Петров Ю.В., Поляков В.И., Цветков В.А. – Электротехника, 1989, № 2.
3. **А.с. 1436649 (СССР).** Способ определения числа витковых замыканий в обмотках роторов синхронных электрических машин / Цветков В.А., Минаев Е.К., Петров Ю.В., Поляков В.И. Опубл. в Б.И., 1989, № 41.
4. **Алдеева А.А.** Хромотография в энергетике. М.: Энергия, 1980.
5. **Самородов Ю.Н.** Диагностика эксплуатационного состояния изоляции крупных генераторов. Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук в форме научного доклада. М.: ВНИИЭ, 1990.
6. **Бида Е.М., Осотов В.Н., Найдич М.Г.** Обнаружение ранней стадии повреждений активных частей турбогенераторов и синхронных компенсаторов. – Электрические станции, 1987, № 1.
7. **Надточий В.М.** Экспертные системы диагностики электрооборудования. – Электричество, 1991, № 8.

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.316.35.056.001.24

ВЕТРОВОЙ РЕЗОНАНС ЖЕСТКИХ ТРУБЧАТЫХ ШИН И СПОСОБЫ ЕГО УСТРАНЕНИЯ

Долин А.П., канд. техн. наук

Московский энергетический институт

Опыт эксплуатации, а также теоретические и экспериментальные [1–5] исследования показывают, что жесткие круглые трубчатые шины ОРУ 110 кВ и выше подвержены поперечным колебаниям при действии относительно небольших (порядка нескольких метров в секунду) скоростей ветра. Колебания шин обусловлены вихревым следом и получили название ветрового резонанса. При числе Рейнольдса Re больше 5 круглая цилиндрическая шина представляет собой плохо обтекаемое тело. За шиной образуются два вихря. При увеличении Re вихри вытягиваются по течению, а затем (при $Re > 40$) периодически отрываются от шины, причем направление сбегающих вихрей попеременно меняется. Возникает вихревая дорожка Кармана. Частота срыва вихрей f_v характеризуется числом Струхала (приведенной частотой)

$$Sh = f_v D / V \quad (1)$$

где V – скорость ветра, м/с; D – диаметр шины, м.

Если числа Рейнольдса лежат в интервале от 10^3 до $2 \cdot 10^5$ (характерно для устойчивых резонансных колебаний ошмовки), число Струхала становится практически постоянным и для неподвижного цилиндра $Sh \approx 0,2$ [6, 7].

В результате срыва вихрей на шину действуют периодические силы q поперек воздушного потока. Если частота срыва вихрей совпадает с частотой собственных колебаний, может наступить ветровой резонанс (вихревое возбуждение). При вихревых возбуждениях шин скорость ветра лежит в пределах

$$k_{s1} V_s \leq V \leq k_{s2} V_s \quad (2)$$

где V_s – струлелевская скорость (т.е. скорость потока, при которой частота срыва вихрей с поверхности неподвижного тела совпадает с частотой его собственных колебаний) при направлении ветра перпендикулярном оси шины.

Коэффициенты k_s определяют область скоростей при устойчивых колебаниях. Значения коэффициента k_{s1} составляют 0,7–1,0, а $k_{s2} = 1,0 + 1,37 [4, 7]$. Следует отметить, что устойчивым резонансным колебаниям предшествуют беспорядочные колебания с малой амплитудой. При резонансной скорости ветра амплитуда

постепенно возрастает. Синхронизация отрыва вихрей и стабилизация колебаний наблюдаются при амплитуде резонансных колебаний $Y_{доп}$ не менее 0,015–0,1 от диаметра шины D . Больше значение определено в лабораторных условиях при испытаниях круглых цилиндров [7], меньшая амплитуда синхронизации наблюдалась при вихревых возбуждениях шин диаметром 250 мм [4]. Для шин диаметром до 120 мм относительная амплитуда $Y_{доп}$ составляет, по-видимому, не менее 0,025–0,03D.

Ветровые вибрации шин нежелательны, так как они оказывают отрицательное психологическое воздействие на персонал ОРУ, а также могут приводить к ослаблению болтовых соединений и даже к усталостным разрушениям. Устойчивые резонансные колебания не возбуждаются, если наибольший прогиб $u_{макс}$ не достигает допустимого (критического) значения $u_{доп}$, т.е.

$$u_{макс} \leq u_{доп} \quad (3)$$

Расчет амплитуды резонансных колебаний шин на основе решения задачи о колебаниях балки с распределенными параметрами под действием ветровой нагрузки q , являющейся функцией времени t , координаты шины z и амплитуды колебаний $Y_0(z)$, приводится в [8].

На основе решения дифференциального уравнения четвертого порядка в частных производных разработаны алгоритм и программа расчета амплитуды резонансных колебаний на ЭВМ. Вместе с тем инженерные расчеты колебаний шин удобно проводить на основе более простых расчетных схем, например, системы с одной степенью свободы [3, 9, 10]. В этом случае движение шины описывается уравнением

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + 2hm \frac{dy}{dt} + Cy = Q, \quad (4)$$

где m – приведенная масса шины, кг; y – приведенный прогиб шины, м; G – приведенная жесткость шины, Н/м; Q – приведенная сила, Н; $h = \delta f$ – коэффициент затухания, с⁻¹; δ и f – приведенные декремент затухания и частота собственных колебаний системы, Гц. Примем обобщенную приведенную силу Q равной произведению $q l$, где l – длина пролета, q – равномерно распределенная нагрузка, равная

НЕ ТРАТЬТЕ ВРЕМЯ НА ПРОГРАММИРОВАНИЕ...

TRACE MODE 4.00

ПРОГРАММА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ
ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ МИРОВОГО КЛАССА

до 4096 I/O каналов
контроллеры и АЦП
изображения на 100
графиках 3-D * мульт
графический просмотр архива

поддержка любых
маштабурные
экраны монитора *
телеметрия * графич
* генерация отчетов

РОССИЙСКИМ ПРЕДПРИЯТИЯМ СКИДКА 95%

AdAstra Research Group, Ltd Москва, 123242, Б. Пред-теченский
пер., д.9, ГВЦ РОСДИПРОМЕТА, тел/факс 252-10-82

НАШИ ДИЛЕРЫ:

МП АНТРЕЛ (095) 420-06-09

ПО ТАТЭНЕРГО (Казань)

(843-2) 313-680, 323-827

ЭМИКОН (095) 111-92-57

РОБОКАТ ЛТД (Ярославль)

(0852) 25-34-24, 25-47-10

КТЦ Метрополис. 584-64-11

СПРИНГ ЛТД (Минск)

(0172) 20-31-14, 20-33-47

ОПТИМ (Оренбург)

(3532) 47-95-60

A ВЫ?



КОНТРОЛЕРЫ
МИКРО РС
(ОСТАГОН SYSTEMS)

ПРОСТО НАРИСУЙТЕ ВАШУ АСУ ТП И ЗАПУСТИТЕ!

Таблица 1

Расчетная схема шинной конструкции	γ	β	λ	$\sigma_{ш}$
	3.14	1.0	8	$\frac{384 EI}{5l^3}$
	3.92	1.25 (0.75)	8	$\frac{185 EI}{5l^3}$
	4.73	1.0**	12**	$\frac{384 EI}{5l^3}$

Для опор с шарнирным опиранием шин.
Для крайних пролетов многопролетных конструкций с неравными шинами $\beta = 1.13$; $\lambda = 9.5$.

подъемной силе (нагрузке), например, при наибольшем прогибе y_0 . Нагрузка при ветровом резонансе

$$q = 0.5 \rho_a c_D V^2 k_z^2 \quad (5)$$

где ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; c_D – коэффициент аэродинамических нагрузок (подъемной силы), при резонансных колебаниях, приближенно изменяющихся по гармоническому закону

$$c_D = c_{y0} \sin \omega t.$$

Безразмерный коэффициент c_{y0} является функцией амплитуды колебаний, которая может быть аппроксимирована полиномом пятой степени [7]

$$c_{y0} = c_0 + 0.17y_0 + 1.0y_0^3 - 0.7y_0^5 \quad (6)$$

где $c_0 = 0.8$ – коэффициент подъемной силы неподвижного цилиндра; $y_0 = y_0/D$ – относительная амплитуда колебаний.

Коэффициент c_{y0} лежит в пределах 0.8 – 1.3. При стабилизации вихревых возбуждений, т.е. при относительно малых амплитудах, c_{y0} близок к 0.8; при относительном прогибе $y_0 \approx 0.95$ коэффициент достигает максимального значения 1.3.

В результате решения уравнения (4) амплитуду резонансных колебаний можно привести к виду

$$y_0 = y_{\max} = \frac{q\Omega}{2Gh} = \frac{\pi q l}{G\delta} \quad (7)$$

Подставляя выражение (5) в (7), получим

$$y_{\max} = c_y \frac{\pi \rho_a V^2 l D}{2G\delta} = \frac{c_y \pi \rho_a V^2 k_z^2 D^3}{2G\delta S h^2} \quad (8)$$

Жесткость шины можно записать как $G = BEJ/\beta$,

где E – модуль упругости шины, Па; J – момент инерции шины, м⁴; B – коэффициент, зависящий от условий закрепления шины на изоляторы пролета (табл. 1).

Частота собственных колебаний расчетной модели принимается равной первой (основной) частоте собственных колебаний шины, которая определяется по формуле [3, 6]

$$f = f_1 = \frac{1}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{m_{ш}}} \quad (10)$$

где f_1 – параметр первой частоты собственных колебаний (табл. 1); $m_{ш}$ – погонная масса шины, кг/м.

Подставляя выражения (9) и (10) в (8), получим

$$y_{\max} = \frac{c_y \rho_a \pi^2 k_z^2 D^3}{m_{ш} B \delta} \quad (11)$$

На рис. 1 приводятся зависимости относительной амплитуды колебаний шин $y = y_0/D$ при вихревых возбуждениях от декремента затухания, полученных экспериментально [4] (кривая 1) и аналитически в результате решения колебаний системы с распределенными параметрами (кривые 2) и с одной степенью свободы (кривые 3). Длина пролета шарнирно опертой шины $l = 20$ м, диаметр $D = 250$ мм, толщина стенки 8 мм, масса шины $m_{ш} = 1.69$ кг/м. Экспериментальная частота собственных колебаний оказалась равной 1,57 Гц, расчетное значение – 1,69 Гц; струалевская скорость ветра составила соответственно 2,0 и 2,11 м/с.

Резонансные колебания наблюдались при скоростях ветра 1,37 – 2,67 м/с (т.е. при коэффициентах k_z , равных 0.7 – 1.37). Декремент затухания варьировался путем изменения числа (от нуля до двух) демпфирующих проводов, проложенных в шине, а также в результате

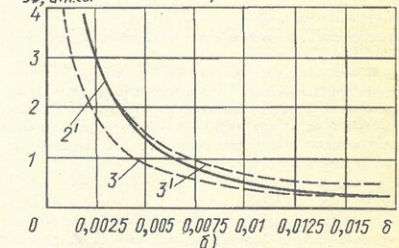
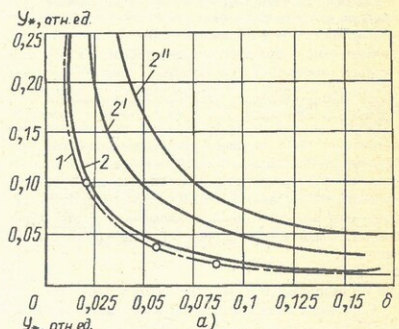


Рис. 1. Экспериментальная и расчетные зависимости амплитуды относительного прогиба шины от декремента затухания при вихревых возбуждениях:

1 – эксперимент; 2 – расчет на основе модели с распределенными параметрами при $k_z = 0.7$; 2' – то же $k_z = 1.0$; 2'' – то же $k_z = 1.3$; 3 – расчет на основе модели с одной степенью свободы при $c_{y0} = 0.8$; 3' – то же $c_{y0} = 1.3$

установки различных типов шинодержателей. В ряде опытов амплитуда колебаний не достигала установившихся резонансных значений. В этих случаях ожидаемые амплитуды колебаний определялись путем аппроксимации экспериментальных данных на ЭВМ [4].

Расчетные зависимости y при различных резонансных скоростях: 1,48; 2,11 и 2,73 м/с, т.е. при коэффициентах k_z , равных 0.7; 1.0 и 1.3 (кривые 2, 2' и 2'' на рис. 1), превышают экспериментальные значения прогибов. Наименьшие погрешности расчетов (2–15%) оказались при коэффициенте скорости $k_z = 0.7$ и декрементах затухания больше 0,01. При декрементах δ меньше 0,01 погрешности возрастали до 25–30%. При $k_z = 1$ расчетные значения прогибов превышают экспериментальные значения в 1,5–2 раза.

Увеличение погрешности расчета в области малых декрементов не является существенным недостатком методики, так как амплитуды колебаний очень велики и недопустимы в эксплуатации. Некоторое возрастание погрешности (до 15%) при больших декрементах, видимо, обусловлено нелинейностью зависимости декремента затухания от амплитуды колебания, которая не учитывалась в расчетах из-за недостаточной информации о параметрах экспериментальной конструкции.

Сопоставление результатов расчетов систем с одной степенью свободы и с распределенными параметрами (рис. 1, б) показывает, что в области малых амплитуд ($y \leq 0.25$) результаты оказываются близкими, если коэффициент подъемной силы c_y в выражении (11) равен 0,8, а при больших амплитудах ($y \geq 2$) – 1,3. Принимая во внимание достаточно глубокое демпфирование и относительно небольшую амплитуду колебаний шин токопроводов при ветровых резонансах, коэффициент c_y в инженерных расчетах оправдано принять равным 0,8 – 0,9.

Таким образом, разработанная методика расчета дает оценку сверху наибольших прогибов шины (а, следовательно, напряжений в их материале и нагрузок на изоляторы) при устойчивых вихревых возбуждениях. Вместе с тем нельзя исключать возможность более высоких значений амплитуды колебаний по сравнению с приведенными в [4] данными, соответствующих расчетным

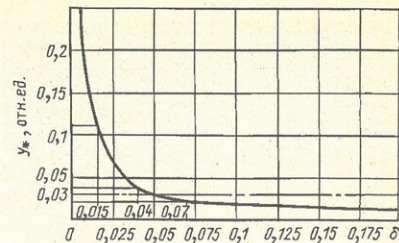


Рис. 2. График зависимости амплитуды колебания шин ОРУ 220 кВ при ветровых резонансах от декремента затухания

значениям k_z , равным 1. Поэтому инженерные расчеты оправдано проводить при скорости ветра, равной струалевской, т.е. при $k_z = 1$.

Проведенные расчеты амплитуды колебаний шин на основе решения уравнения движения системы с распределенными параметрами показали, что наиболее тяжелые условия работы токопроводов возникают при ветровом резонансе первой (основной) формы колебаний. При резонансах второй (у шин с жесткой заделкой на одном и шарнирном опирании на другом изоляторе пролета) и третьей формы резонансные прогибы в 1,5–3,5 раза меньше, чем при вихревых возбуждениях с первой частотой собственных колебаний.

Условия закрепления (опирания) шин на изоляторах пролета существенно влияют на частоту собственных колебаний шины и струалевскую скорость ветра. Однако амплитуда ветровых резонансных колебаний практически не зависит от условий закрепления шины, так как отношение η^4 / B в формуле (11) при различных условиях опирания шины остается практически постоянным, равным 1,26 – 1,30 (табл. 1). Поэтому независимо от условий опирания шины при возникновении устойчивых вихревых возбуждений и коэффициенте k_z , равном 1, относительная

Таблица 2

Номинальное напряжение установки, кВ	Вид опоры	Шинодержатель	Демпфирующее устройство	Диаметр шины, мм	Толщина стенки шины, мм	Длина пролета, м	Логарифмический декремент затухания
110	Вертикальная надставка на опорном изоляторе или без вертикальной надставки	Скобы из круглого прутка	Стальной пруток 4–6 мм	100	4,5–5	9	0,05–0,15
110	То же	То же	Без демпфера	100	4,5	9	0,012–0,04
220	A-образная наклонная подставка на изоляционной опоре	"	Стальной пруток 5 мм	100	4,5	12,6	0,015–0,04
220	То же	Две скобы из круглого прутка	Стальной пруток 4–8 мм	110	5	12,5	0,07–0,10
			Два стальных прутка				
			4 мм	110	5	12,5	0,075–0,12
			5–8 мм	110	5	12,5	0,08–0,12

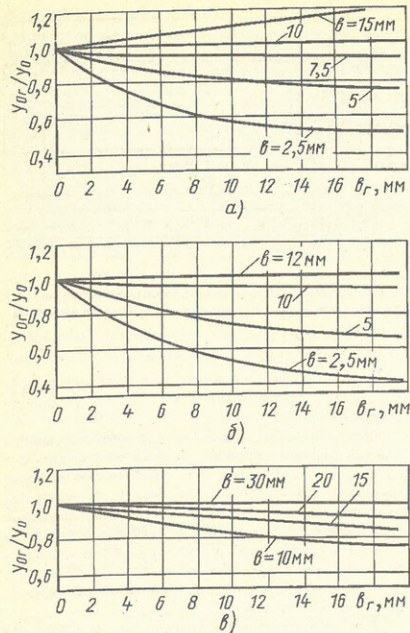


Рис. 3. График зависимости отношений амплитуды ветровых резонансных колебаний ошиневики при гололеде $U_{ор}$ к амплитуде колебаний без учета гололеда U_0 от толщины гололедных отложений для шин с наружным диаметром 75 а), 100 б) и 250 в)

амплитуда колебаний примерно равна

$$U_{ор\max} = U_{\max} / D \approx 1,08 \frac{\rho_{ш} D^2}{m_{ш} \delta} \quad (12)$$

Масса на единицу длины шины составляет

$$m_{ш} = \rho_{ш} S = \rho_{ш} \pi D_{ср} b, \quad (13)$$

где $\rho_{ш}$ – плотность материала шины, кг/м³; $D_{ср} = (D+d)/2$ – средний диаметр шины, м; d – внутренний диаметр шины, м; $b = (D-d)/2$ – толщина ее стенки, м.

Таким образом, относительная амплитуда не зависит от длины пролета шины, прямо пропорциональна диаметру шины и обратно пропорциональна декременту затухания, а также погонной массе (плотности материала и толщине стенки). Кроме того, амплитуда пропорциональна плотности воздуха и, следовательно, зависит от окружающей температуры.

Для борьбы с ветровым возбуждением применяются различные методы. Например, в строительных конструкциях эффективным оказалось использование интерцепто-

ров (невысоких плоских ребер), препятствующих синхронному срыву вихрей [11]. Однако установка на шины ребер нежелательна по условиям короны. Кроме того, этот способ оказывается более дорогостоящим и менее технологическим, чем другие решения.

В ОРУ широко используют шинодержатели специальной конструкции и демпферы, обеспечивающие рост диссипативных сил (рассеяния энергии при колебаниях), иногда грузы для увеличения массы шины. В качестве демпфирующих устройств наибольшее распространение получили отрезки проводов (закрепленные у оси одной из опор пролета) и металлические стержни, проложенные внутри трубчатых шин.

Если декремент затухания шины достаточно велик, то амплитуда колебаний при вихревых возбуждениях не достигает значения $U_{доп}$ и устойчивых резонансных колебаний не возникает.

В качестве примера на рис. 2 приводится расчетная кривая зависимости амплитуды резонансных колебаний шины типового ОРУ-220 от декремента затухания. Диаметр шины $D = 100$ мм; толщина стенки $b = 4,5$; длина горизонтальной части пролета шины $l = 12,5$ м; масса $m_{ш} = 3,74$ кг/м; частота собственных колебаний $f_1 = 1,71$ Гц; струхалеваевская скорость ветра $V_{ш} = 0,85$ м/с.

Исследования декрементов затухания этих конструкций (табл. 2) показали, что при установке демпфирующего прутка и креплении шины к опоре с помощью одной скобы из круглой проволоки декремент затухания равен 0,015 – 0,04. При этом относительная амплитуда резонансных колебаний (рис. 2) достигает 0,04–0,12 и остается выше $U_{доп} \approx 0,3$. При креплении шины двумя скобами декремент затухания возрастает до 0,07–0,10, а амплитуда колебаний не превышает 0,25 диаметра шины. Следует отметить, что прокладка второго демпфирующего прутка, а также увеличение диаметра прутка мало влияют на изменение декремента затухания. Вместе с тем при отсутствии прутка в шине декремент затухания уменьшается в 1,5–3 раза.

При снижении температуры плотность воздуха увеличивается и, следовательно, возрастает амплитуда резонансных колебаний. Например, при температуре –30 °С наибольший прогиб при вихревых возбуждениях почти на 30% больше амплитуды при температуре +40 °С, поэтому в инженерных расчетах плотность воздуха оправданно определять при средней температуре наиболее холодного месяца года.

В зимний период на шине возможны гололедные отложения. При этом увеличивается диаметр шины, вместе с тем возрастает ее масса при сохранении практически неизменной жесткости EJ , т.е. параметра B в уравнении (11). Так как толщина гололедных отложений не превышает 10–20 мм, то для жестких шин диаметром 90–250 мм коэффициент подъемной силы изменяется незначительно. Поэтому для расчета амплитуды резонансных колебаний при гололеде $U_{ор}$ можно использовать формулы (11), (12), в которых диаметр принимает равным сумме $D+2b$, (b – толщина стенки гололеда), а масса $m_{ш} = m_{ш} + m_{л}$. Расчеты показывают, что амплитуда колебаний шин при гололеде $U_{ор}$ как правило, ниже, чем без гололеда U_0 (рис. 3). Исключение составляют шины с большой толщиной стенки (более 10–30 мм).

Наибольшее напряжения в материале шины и нагрузки

на изоляторы при ветровых резонансах согласно [3] приближенно определяются по формулам

$$\sigma_{\max} = \frac{GI}{\lambda W} U_{\max}; \quad (14)$$

$$R_{\max} = \beta G U_{\max}; \quad (15)$$

где G – жесткость шины, Н/м; λ и β – коэффициенты, зависящие от условий опирания шин на опоры (табл. 1); W – момент сопротивления поперечного сечения шины, м³.

Расчеты показывают, что наибольшие напряжения в материале шин и нагрузки на изоляторы при ветровых резонансах типовых конструкций 110–220 кВ даже без демпфирующих устройств оказываются существенно ниже соответствующего предела прочности (а тем более предела прочности) материала шины и разрушающей нагрузки изоляционных опор.

Выводы

1. Разработанная методика инженерного расчета амплитуды ветровых резонансных колебаний трубчатых шин хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований и расчетов на основе модели с распределенными параметрами и может быть рекомендована для оценки эффективности "отстройки" от устойчивых ветровых возбуждений.
2. Наибольшую амплитуду резонансных колебаний следует ожидать в зимний период при отсутствии гололеда.
3. Для устранения устойчивых ветровых резонансных колебаний эффективным и экономичным методом является увеличение демпфирования при установке в шине

простейших гасителей вибрации (проводов, тросов, стержней), а также увеличение конструкционного демпфирования (в шинодержателях).

Список литературы

1. Райгородский И.М. Применение трубчатых шин в открытых распределительных устройствах высокого и сверхвысокого напряжения в ФРГ. – Энергохозяйство за рубежом, 1976, № 3.
2. Лисовский Г.С. Трубчатые и гибкие шины для открытых распределительных устройств. – Энергетическое строительство за рубежом, 1981, № 6.
3. Долин А.П., Шонгин Г.Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Diana G., Falco M. On the forces transmitted to a vibrating cylinder by a blowing fluid. – Meccanica, 1971, vol.6, № 1.
5. Adami H., Batch B.A. Aeolian vibrations of tubulars in outdoor substations. – Electra, 1981, № 75.
6. Прочность, устойчивость, колебания / Под ред. Биргера И.А., Панова Я.Г. М.: Машиностроение, 1968, т. 3.
7. Девнин С.И. Аэродинамика плохобтекаемых конструкций. Л.: Судостроение, 1983.
8. Долин А.П., Шонгин А.Л. Расчет колебаний жесткой ошиновки ОРУ при ветровых резонансах. – Известия вузов. Энергетика, 1989, № 10.
9. Кудрявцев Е.П., Долин А.П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981.
10. Кудрявцев Е.П., Долин А.П. Электродинамическая устойчивость жесткой ошиновки напряжением 110 кВ и выше. – Электрические станции, 1980, № 1.
11. Савицкий Г.А. Расчет антенных сооружений. М.: Связь, 1978.

ПОДГОТОВКА ПЕРСОНАЛА ЦЕХОВ ТАИ

Учебно-тренировочным пунктом МЭИ разработаны автоматизированная обучающая система и комплекс учебно-тренировочных занятий на ПЭВМ класса IBM PC XT/AT для подготовки персонала цехов ТАИ, обеспечивающие возможность изучения теории, конструкции, особенностей эксплуатации и обнаружения неисправностей, проведения тренировок при работе персонала с системами:

- *измерения уровня (ДМЭ, "Сапфир");
- *измерения расхода (ДМЭР, "Сапфир");
- *измерения температуры (КСР, ПТ-ТП, Ш-78, КСМ, Ш-79);
- *автоматического регулирования ("Каскад-2");
- *технологических защит и сигнализации (УКТЗ, УКТС и пр.).

Работники УТП МЭИ эксплуатируются в учебно-тренировочных пунктах Калининской и Запорожской АЭС, центрах тренажерной подготовки при Пермской и Ладыжинской ГРЭС, СЦПО "Энерготренинг", Сырдарьинской ГРЭС, Новосибирской ТЭЦ-5 и др. Фирмами ОРГРЭС и Атомтехэнерго они рекомендованы к широкому внедрению в систему подготовки персонала для тепловой и атомной энергетики.

Адрес для запросов и поставки программ: 105835 ГСП, г.Москва, Е-250, Красноказарменная ул., 14, МЭИ, кафедра АСУ ТП, Учебно-тренировочный пункт, Охотину В.В.

Телефоны: (095) 362-70-92, 362-78-81.



Вниманию подписчиков журнала "Электрические станции" !

С 1 апреля 1994 г. начинается подписка на второе полугодие 1994 г.

Сведения о подписке на журнал *"Электрические станции"*
введены в каталог издательства *"Известия"* и ЦАЗИ.

Для индивидуальных подписчиков индекс издания 71104,
цена номера 500 руб.

Для предприятий соответственно 73560 и 2000 руб.

Редакция.

