



# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ОРГАН МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
И ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРАВЛЕНИЯ  
ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКОВ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

Ежемесячный  
производственно-  
технический  
журнал



ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1990





ОРГАН МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
И ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРАВЛЕНИЯ  
ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКОВ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Издается с января 1930 года

Ежемесячный производственно-технический журнал

МОСКВА · ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

ОКТАБРЬ 10 · 1990

## СОДЕРЖАНИЕ

### К 60-ЛЕТИЮ МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

- 2 Воронов В. Н. МЭИ — 60 лет
- 5 Максимов Б. К. Подготовка инженерных и научных кадров на электро-энергетическом факультете МЭИ: состояние и проблемы
- 8 Обрезков В. И. Гидроэнергетики МЭИ в освоении энергетических ресурсов страны
- 11 Кривенков В. В., Морозкин В. П., Новелла В. Н. Подготовка инженерных кадров по релейной защите и автоматизации энергосистем
- 15 Старшинов В. А., Гусев Ю. П., Трофимов А. В., Брызгалов Ю. Н. Персональные ЭВМ в подготовке инженеров по специальности «Электрические станции»
- 18 Калафати Д. Д. Сравнение энергетической эффективности ТЭЦ и других способов электротеплоснабжения
- 22 Елизаров Д. П., Дубов А. А. Экспериментальное и расчетное исследование причин повреждений ремонтных стыков труб поверхностей нагрева котлов с использованием магнитного контроля
- 27 Литкенс И. В., Пуго В. И., Строев В. А., Филинская Н. Г. Методы синтеза структур и оптимизации настроек АРВ агрегатов электростанций с учетом системных требований
- 32 Кудрявцев Е. П. Электродинамическая стойкость шинных линий
- 36 Долин А. П. Научные основы методики расчета и эффективность применения жесткой ошиновки ОРУ 110 кВ и выше
- 41 Штробель В. А., Бейм Р. С. Анализ влияния релейной форсировки по напряжению при больших возмущениях в энергосистеме
- 44 Жуков В. В., Казайкин В. Ф., Шиша М. А., Воронин Г. И. Влияние обратных двигатель-генераторов и статических преобразователей на ток КЗ в системе постоянного тока электростанций

### ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

- 48 Мысак И. С., Еремчук В. А. Экономичное распределение природного газа и мазута по котлам ТМ-104 и ТМЕ-213 Молдавской ГРЭС после модернизации оборудования
- 52 Бреус В. И., Беляков И. И. Температурный режим топочных экранов малогабаритного котла ТГМЕ-428 с неошипованной вихревой камерой сгорания
- 55 Брыков В. Я., Лысков В. Я., Алехнович А. Н., Кукса В. М., Амангадиев А. А., Новик В. В. Система автоматического расшлаковывания котлов Ермаковской ГРЭС

- 58 Башаров Ю. Д., Иванов Ю. Е., Липатников Г. А., Онищенко О. А., Старовойтов Н. Г., Холянов В. С. Некоторые проблемы формирования и регулирования графика электрических нагрузок в системе Дальэнерго

### СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

- 62 Коган Ф. Л., Плясуля И. П. Анализ причин потери собственных нужд на электростанциях

### РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ

- 69 Гоник Я. Е. Выявление сечения асинхронного хода в энергосистеме
- 73 Мокеев С. Ф., Мокеев А. С. Защита при включении на короткое замыкание
- 76 Гитман В. А., Жидовецкий М. Л. Сопротивление компенсации в реле мощности обратной последовательности защиты ВЛ 330—750 кВ типа ПДЭ-2003

### ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

- 79 Левковский А. И. Исследование переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в электрической сети 10 кВ с трансформатором напряжения НАМИ-10

### ОБМЕН ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОПЫТОМ

- 81 Губицкий Е. И., Химко Я. В., Веселова Т. В. О влиянии систем пневмотранспорта золы на пылевые выбросы ТЭС
- 82 Паули В. К. Влияние организационных мер на повышение надежности Ставропольской ГРЭС
- 88 Васильев Н. К., Фоминых Ю. А., Волков В. А. Нагреватель трансформаторного масла

### В ГЛАВНОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ

- 92 О предотвращении разрушений бандажных колец и вспомогательных элементов бандажных узлов роторов турбогенераторов

На обложке — Балаковская АЭС. Пульт управления энергоблоком № 3.



П. Расчет электродинамической стойкости. Электричество, 1983, № 4.  
 П. Инженерный расчет прочности и смещения при коротких замыканиях. — Известия тика, 1984, № 11.  
 Буй-Тхань-Жанг. Исследование колебаний — Промышленная энергетика, 1978, № 8.  
 Шонгин Г. Ф. Открытые распределительные жесткой ошиновки. М.: Энергоатомиздат, 1984.  
 И., Сергей И. И. Расчет электродинамисты гибкой ошиновки открытых распределительств высокого напряжения. — Электричество,

21:621.315.35.001.24

## НОВЫЕ АСЧЕТА И СТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИИНОВКИ ОРУ 110 кВ И ВЫШЕ

д. техн. наук

те годы в ОРУ 110 кВ и выше все чаще используют жесткие трубчатые ошиновки позволяет создать экономичные ОРУ, занимающие меньшую площадь, имеющие более низкую высоту порталов, чем в ОРУ с гибкой. Благодаря этому сокращается объем земляных работ, затраты на монтаж, облегчается очистка и ремонт шинных конструкций, улучшение и аппаратов, снижается трудоемкость и сроки ввода ОРУ [1].

В ОРУ 110, в ряде случаев 220 кВ, трубчатые ошиновки оказываются более экономичными по сравнению с жесткими шинами типа УБ (разработчик Оргэнергострой, Куйбышевский завод «Электроинструмент», сроки сооружения подстанций Б-110 составляют 2 мес, а подстанций ошиновкой — 5—8 мес при большей экономии).

110 кВ и выше весьма перспективно использовать длиннопролетные шин-фермы, изготовленные относительно небольшого диаметра обычных трубчатых шин, длина которых, как правило, не превышает условий наибольшего прогиба от веса). В табл. 1 приводятся данные об эффективности ОРУ с жесткими шинами исполнения (на одно ОРУ, 10 ячеек) по сравнению с гибкой ОРУ, выполненных по типовым проектам.

ОРУ имеет ряд особенностей. В ОРУ до 35 кВ она выполняется из рочных алюминиевых сплавов магний-алюминий и др., обладающих удельным электрическим сопротив-

лением. Длина пролета шин 110 кВ и выше обычно составляет 9 м и более. Ошиновка ОРУ подвержена воздействию солнечной радиации, ветра и гололеда. Изоляторы и опорные основания обладают обычно достаточно большой упругой податливостью, поэтому массовое внедрение жесткой ошиновки 110 кВ и выше потребовало проведения широких аналитических и экспериментальных исследований ее работоспособности в рабочих и аварийных режимах, разработки методики расчета шинных конструкций, подготовки проекта Руководящих указаний по выбору и расчету изоляторов и жестких шин ОРУ.

Научно-исследовательская работа выполнялась кафедрой электрических станций МЭИ по заказу треста Электростройподстанции, институтов Оргэнергострой и Энергосетьпроект. Экспериментальные исследования проводились совместно с НИЦ ВВА при участии Электросетьизоляция, Куйбышевского завода «Электротрест», Новосельцевского завода линейной и подстанционной арматуры. Далее рассматриваются основные положения методики выбора и расчета жесткой ошиновки, обсуждаются основные результаты аналитических и экспериментальных исследований.

Выбор и расчет жесткой ошиновки ОРУ 110 кВ и выше проводится по длине пути утечки изоляционных опор, расстоянию в свету между токоведущими элементами, а также между проводниками и заземленными элементами, допустимым температурным удлинением шин, условиям короны, нагреву шин в рабочих режимах (нагрузочной способности) и КЗ (термической стойкости), допустимым прогибам от собственного веса, условиям прочности (стойкости) при ветровых, гололедных и электродинамических нагрузках, в том числе при неуспешных включениях на КЗ.

1. Выбор изоляторов ОРУ проводится в соответствии с [2], исходя из условий длительного

Таблица 1

Напряжение ОРУ, кВ	Экономия					Годовая экономия, тыс. руб.	Примечание
	черного металла, т	железобетона, м³	площади, %	СМР, тыс. руб.	трудозатрат, чел.-дней		
110	30	12	15	15	200	13,5	Электрические схемы со сборными шинами
220	65	52	10	50	1000	25	
330	220	1300	15	130	Не подсчитывались	100	
500	300	1700	18	130	1200	130	По типовому проекту
500	450	2600	18	270	Не подсчитывались	250	С длиннопролетными шинами
750	600	4000	18	400	То же	350	То же

воздействия рабочего напряжения, а также грозных и коммутационных перенапряжений.

2. Расстояние в свету между токоведущими элементами, а также проводниками и заземленными элементами  $A$  должны оставаться выше минимально допустимых значений  $A_{доп}$  (указанных, например, в ПУЭ), т. е.

$$A \geq A_{доп}. \quad (1)$$

С учетом действия внешних нагрузок минимальное расстояние между фазами

$$A_{ф-ф} = a_0 - 2y_{о.макс}, \quad (2)$$

а между фазами и заземленными элементами составляет

$$A_{ф-з} = a_1 - y_{1макс}, \quad (3)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  — минимальные монтажные расстояния в свету между фазами, а также между токоведущими и заземленными элементами;  $y_{о.макс}$  — наибольший прогиб после отключения двухфазного КЗ;  $y_{1макс}$  — максимальный прогиб элемента ошиновки (изолятора или шины), вызывающий наибольшее изменение габарита (между фазой и заземленными элементами) после отключения трехфазного КЗ или при наибольшей скорости ветра.

Экспериментальные исследования показали, что шинные конструкции обладают значительной податливостью, поэтому при КЗ (и после их отключения), а также при нормативных скоростях ветра наблюдаются достаточно большие прогибы ошиновки. Например, наибольший прогиб фазы ошиновки КРУБ 110 кВ при токе КЗ 31,5 кА ( $i_{уд} = 80$  кА) превышает 200 мм, а КРУБ 220 кВ достигает примерно 500 мм.

3. Согласно ПУЭ общий коронный разряд не возникает, если

$$E_{макс} \leq 0,9E_0, \quad (4)$$

где  $E_{макс}$  — максимальная напряженность на поверхности шин при среднем эксплуатационном напряжении;  $E_0$  — начальная напряженность электрического поля возникновения коронного разряда.

В соответствии с методикой [3] В. Г. Агаповым были рассчитаны минимально допустимые диаметры трубчатых шин  $d_{доп}$  по условиям короны

$U_{ном}$ , кВ	$d_{доп}$ , мм	$U_{ном}$ , кВ	$d_{доп}$ , мм
110	9	500	55
220	24	750	84
330	36	1150	140

Полученные результаты показывают, что проверку шин по условиям короны оправдано проводить только в РУ выше 500 кВ, так как шины, выбранные по другим условиям, отвечают неравенству (4). Кроме того, при двух и более проводниках в фазе допустимые диаметры уменьшаются.

4. Температурные деформации шин не должны приводить к дополнительным усилиям, что обеспечивается свободным продольным перемещением

шин и установкой температурных компенсаторов. При этом длина неразрезного (цельного или сварного) участка шины должна отвечать неравенствам

$$L(\theta_{мин}) \geq L_{доп.мин}; \quad L(\theta_{макс}) \leq L_{доп.макс}, \quad (5)$$

где  $L_{доп.мин}$  и  $L_{доп.макс}$  — минимальные и максимальные допустимые длины неразрезного отрезка шины;  $L$  — длина этого участка при минимальной температуре  $\theta_{мин}$  (которую оправдано принять равной абсолютной минимальной температуре воздуха региона) и максимальной температуре  $\theta_{макс}$  (равной температуре нагрева шины при КЗ, т. е. не более 200 °С).

Длина неразрезного участка шины при различных температурах определяется по формуле

$$L(\theta) = L_0 \prod_{i=1}^k (1 + \alpha_i \Delta\theta_i), \quad (6)$$

где  $L_0$  — начальная (монтажная) длина шины при температуре  $\theta_0$ , м;  $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1}$  — температурный интервал, К;  $i = 1, 2, \dots, k$  — номер температурного интервала;  $\alpha_i$  — коэффициент температурного удлинения на  $i$ -м интервале, К<sup>-1</sup>.

Например, удлинения  $\Delta L = L(\theta_{макс}) - L(\theta_{мин})$  шин, изготовленных из сплава 1915Т, с длиной неразрезного участка, равного шагу ячейки ОРУ, при минимальной температуре воздуха -40 °С и монтажной температуре  $\theta_0 = 20$  °С составляют:

$U_{ном}$ , кВ	$L_0$ , м	$\Delta L$ , мм
110	9	57
220	15,5	98
500	31	196

5. В рабочих режимах наибольшие температуры нагрева шин  $\theta$  и болтовых контактов  $\theta_k$  не должны превышать допустимых значений

$$\theta \leq \theta_{доп}; \quad \theta_k \leq \theta_{доп.к}. \quad (7)$$

В ГОСТ 8024-84 допустимые температуры медных и алюминиевых шин установлены равными 120 °С, а контактов из этих металлов 90 °С при нормированной температуре воздуха 35 °С. Экспериментальные исследования и типовые испытания различных токопроводов в НИЦ ВВА, а также опыт эксплуатации подтверждают надежную работу шин и контактных соединений при указанных температурах, которые отличаются от значений, принятых в ПУЭ.

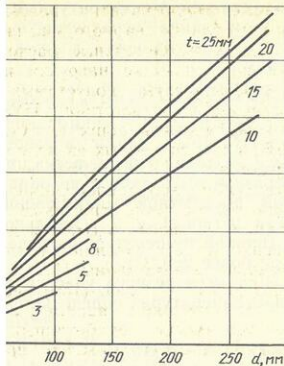
Для сборных шин, не имеющих болтовых соединений, условие (7) выполняется, если

$$I_{раб.нб} \leq I_{доп}, \quad (8)$$

где  $I_{раб.нб}$  — наибольший рабочий ток;  $I_{доп}$  — длительно допустимый ток, при котором температура шины не превышает 120 °С.

На ответвленных от сборных шин к выводам (зажимам) аппаратов имеются болтовые соединения, поэтому оправдано установить допустимую температуру проводников вблизи контактов 90 °С, а в наиболее нагретых точках (в месте присоединения к сборным шинам) не более 120 °С. Таким





е зависимости длительно допустимых токов обмоточных шин из сплава 1915Т

вления отвечают условиям (7) только, если

$$L \geq L_{\text{доп}}, \quad (9)$$

пустимый длительный ток шины при 90 °С;  $L$  — длина ответвления от а аппарата;  $L_{\text{доп}}$  — допустимая а наименьшей протяженности от и которой его температура спадает  $\theta_{\text{доп.к}} = 90$  °С.

грузочной способности шин сво- нию уравнения теплового баланса м режиме

$$= Q_k(\theta) + Q_l(\theta) - Q_c - I^2 R_a(\theta), \quad (10)$$

цад поперечного сечения шины, топроводности материала шины,  $\theta = \theta_a$  — перепад температур ш а  $\theta_b$ , °С;  $Q_k$  и  $Q_l$  — тепловые потоки, е конвекцией и излучением, Вт;  $\dot{q}$  поток, поглощаемый шиной при диации, Вт;  $I$  — рабочий ток, А; е сопротивление шины, Ом.

метить, что в ОРУ солнечная радиа- г температура нагрева шин, вместе т движения воздуха конвективный (еь выше, чем при естественной кон- у. Для расчета  $Q_k$  при смешанной и вынужденной) конвекции, харак- изких скоростей ветра, можно вос-

формулой Бургсдорфа В. В. для про- г подходом Кришера О. [5] о едини- ния теплообмена в условиях смешан- и. В последнем случае  $Q_k$  опреде- рмулаз [6] для вынужденной конд- из эквивалентного критерия

$$0,5Gr^2,$$

где  $Gr$  — число Грасгофа;  $Re$  — число Рейнольдса при расчетной скорости ветра, обычно принимае- мой равной 0,6 м/с.

Расчет нагрузочной способности при равномер- ном распределении температуры вдоль шины сводится к решению уравнения (10) с левой частью, равной нулю, относительно тока  $I$  [7]. На рис. 1 представлены зависимости  $I_{\text{доп}}$  неокрашенных шин из сплава 1915Т от диаметра  $d$  при различной толщине стенки  $t$ , вычисленные при штиле, темпе- ратуре воздуха 35 °С, с учетом солнечной радиа- ции. Исследования показывают, что допустимые токи шин из сплава 1915Т почти в 1,4 раза ниже, чем токи алюминиевых шин АДО. Для увеличения нагрузочной способности шины ОРУ целесообразно окрашивать белой эмалью. Однако, как пра- вило, нагрев шин в рабочих режимах не является определяющим для выбора сечения проводников и поэтому окраска шин ОРУ не требуется.

При неравномерном распределении темпе- ратуры по длине ответвления, как показывают ре- шения уравнения (10), второе условие выбора шин (9) в ОРУ 110 кВ и выше выполняется при рабочем токе всего на 1—2 % меньше  $I_{\text{доп.к}}$ .

6. Шины считаются термически стойкими, если выполняется неравенство

$$\theta_{\text{кз}} \leq \theta_{\text{кз.доп}}, \quad (11)$$

где  $\theta_{\text{кз}}$  и  $\theta_{\text{кз.доп}}$  — конечная (наибольшая) и допу- стимая (кратковременная) температура шин при КЗ, °С.

Допустимую кратковременную температуру шин из сплавов 1915 и АВ можно принять рав- ной 200 °С, так же как для технического алюми- ния [1]. Однако конечные температуры нагрева шин из алюминия и алюминиевых сплавов могут существенно отличаться. Например, температура нагрева шин 1915Т примерно в 2 раза выше, чем АДО.

В практике проектирования удобно определять термически стойкие сечения, которые отвечают неравенству

$$S \geq S_T = \sqrt{B/C_T}, \quad (12)$$

где  $S_T$  — минимальное сечение шины по условию термической стойкости, мм<sup>2</sup>;  $B$  — интеграл Джоу- ля, А<sup>2</sup>·с;  $C_T$  — параметр при различных началь- ных температурах шин  $\theta_k$ , А·с<sup>1/2</sup>/мм<sup>2</sup>,

	$\theta_k = 90$ °С	$\theta_k = 120$ °С
АДО	81	68
АД31Т1	77	64
АД31Т	74	62
АВТ1	66	55
1915Т	60	51

Расчет параметров  $C_T$  проводился исходя из уравнения теплового баланса для адиабатиче- ского процесса.

7. Наибольший статический прогиб шин от собственного веса  $y_{\text{ст.макс}}$  не должен превышать допустимого значения  $y_{\text{ст.доп}}$ , устанавливаемого исходя из эстетико-психологических требований, обеспечивающих благоприятное впечатление от

временные сопротивления разрыву материала шины и в области сварного шва шины, Па;  $R_{\text{макс}}$ ,  $R_{\text{доп}}$ ,  $R_{\text{разр}}$  — максимальные расчетные, допусти- мые и разрушающие нагрузки изоляторов, Н;  $N_\sigma$  — коэффициенты допустимых напряжений, принимаемые в соответствии с ПУЭ равными 0,7;  $N_R$  — коэффициенты допустимых нагрузок, рав- ные 0,6, а для спаренных изоляторов 0,5 суммар- ной разрушающей нагрузки;  $\gamma$  — коэффициент, учитывающий точку приложения нагрузки  $R$ , рав- ный при изгибе опор отношению  $h/H$ ;  $h$  и  $H$  — расстояние от опасного сечения изолятора соот- ветственно до его вершины и центра тяжести поперечного сечения шины [1].

$$y_{\text{ст.макс}} \leq y_{\text{ст.доп}}.$$

В отечественной практике проектирования  $y_{\text{ст.доп}}$  обычно принимают равным 1/80, в зарубеж- ной 1/150—1/80. Наибольший статический про- гиб определяется методами строительной меха- ники с учетом действия распределенной нагрузки от собственного веса шины и сосредоточенных нагрузок от веса и тяжения жестких и гибких ответвлений. В пролетах без ответвлений, а также с ответвлениями, выполненными у осей опор (изо- ляторов), прогибы шин обусловлены только рас- пределенной нагрузкой  $q_{\text{ст}} = mg$  ( $m$  — погонная масса шины, кг/м) и равны

$$y_{\text{ст.макс}} = q_{\text{ст}} l^2 / C_{\text{ш}}, \quad (14)$$

где  $C_{\text{ш}}$  — жесткость шины, указанная в табл. 2, Н/м.

В РУ 220 кВ и выше условие (13) обычно яв- ляется определяющим для выбора сечения, длины пролета и конструкции шины.

8. Шины и изоляторы отвечают условиям стойкости при действии силы тяжести ошиновки, гололедных, ветровых и электродинамических на- грузок, если

$$\sigma_{\text{макс}} \leq \sigma_{\text{доп}} = N_\sigma \sigma_a; \quad (15a)$$

$$\sigma_{\text{св.макс}} \leq \sigma_{\text{св.доп}} = N_\sigma \sigma_{\text{св.в}}; \quad (15b)$$

$$R_{\text{макс}} \leq R_{\text{доп}} = N_R \gamma R_{\text{разр}}, \quad (15в)$$

где  $\sigma_{\text{макс}}$ ,  $\sigma_{\text{св.макс}}$ ,  $\sigma_{\text{доп}}$ ,  $\sigma_{\text{св.доп}}$  — максимальные расчетные и допустимые напряжения в шине и в области сварных швов шины, Па;  $\sigma_a$  и  $\sigma_{\text{св.в}}$  —

Т а б л и ц а 2

Схема шинной конструкции	Пролеты	Пара- метр частоты $\tau_1$	Кэф- фициент $\beta$	Параметр $1/\lambda(z)$	Наи- большее значение $1/\lambda$	Жесткость шины $C_{\text{ш}}$	Пара- метр $G$
	Все	3,14	1,0	$\frac{1}{2} \left  \frac{z}{l} - \frac{z^2}{l^2} \right $	1/8	$\frac{384EI}{5l^3}$	76,8
	Все*	3,92	1,25**	$\left  \frac{3}{8} \frac{z}{l} - \frac{1}{2} \frac{z^2}{l^2} \right $ ***	1/8	$\frac{185EI}{l^3}$	185
	Крайний	4,73	1,13	$\left  0,394 \frac{z}{l} - 0,5 \frac{z^2}{l^2} \right $ ****	1/9,5	—	—
	Второй	4,73	1,13	$\left  0,529 \frac{z}{l} - 0,5 \frac{z^2}{l^2} - 0,106 \right $	1/9,5	—	—
	Средние	4,73	1,0	$\frac{1}{2} \left  \frac{z}{l} - \frac{z^2}{l^2} - \frac{1}{6} \right $	1/12	$\frac{384EI}{l^3}$	384

\* Для конструкций с абсолютно жесткими опорами.

\*\* Для опор с заземлением. Для опор с шарнирным опиранием  $\beta=0,75$ .

\*\*\* Шарнирное опирание в пролете при  $z=0$ .



звать более простую модель шин и в виде системы с одной степенью -10], движение которой отвечает

$$m_{np} \frac{dy_{np}}{dt} + c_{np} y_{np} = Q_{np}, \quad (17)$$

$c_{np}$  — приведенные масса, кг, пружинность, Н/м, системы;  $Q_{np}$  — приведенная нагрузка, Н;  $k_{np} = \delta_{np} f_{np}$  — рассеяния энергии, с<sup>-1</sup>;  $\delta_{np}$  — затухания;  $f_{np} = \Omega_{np}/2\pi$  — частота собственной системы, Гц;  $\Omega_{np} = \sqrt{c_{np}/m_{np}}$  — та, рад/с.

решения задач о колебаниях с распределенными и сосредоточенными оказываются близкими, если парама с одной степенью свободы в условиях [1, 8]

$$f_{np} \gg c_{np}; \quad c_{np} = c; \quad f_{np} = f_1; \quad \delta_{np} = \delta, \quad (18)$$

распределенная внешняя нагрузка, жесткость шинной конструкции, Н/м; затухания ошиновки;  $f_1$  — первая частота собственных колебаний кон-

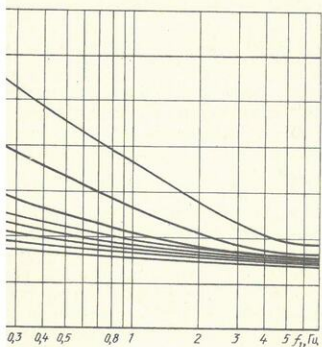
(19)

структуры материала шины, Па; жесткости шин, м<sup>4</sup>;  $r_1$  — параметр чай, значения которого для конструктивно жесткими опорами приведены в упругоподатливости — в [1, 8].

Эти прогибы и напряжения в материале шин  $z$ , а также максимальные напряжения приводятся к виду

$$z(z) = \sigma_{cr}(z)\eta; \quad R_{max} = R_{cr}\eta, \quad (20)$$

— прогибы, напряжения и нагрузки согласно (14) и (16) при стати-



зависимости коэффициента  $\xi$  от частоты  $\omega$  шинной конструкции

ческих внешних силах;  $\eta = |y_{np, max}| / |y_{ст, max}|$  — динамический коэффициент.

При КЗ в формулах (14) и (16)  $q_{ст}$  принимается равной максимальной электродинамической нагрузке, которая для параллельных шин, расположенных в одной плоскости, определяется по формуле [1, 8]

$$q_s = \alpha i_{zd} / a, \quad (21)$$

где  $\alpha$  — параметр, равный  $2 \cdot 10^{-7}$  или  $\sqrt{3} \times 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup> — соответственно при двух- и трехфазном КЗ;  $i_{zd}$  — ударный ток КЗ, А;  $a$  — расстояние между фазами, м.

Расчетные зависимости динамических коэффициентов электродинамической стойкости  $\eta_p$  от частоты  $f_1$  приводятся, например, в [1]. Исследования показывают, что наибольшие усилия в конструкциях 110 кВ и выше при удаленных двух- и трехфазных КЗ оказываются близкими.

При повторных включениях на КЗ динамический коэффициент  $\eta$  в формулах (20) принимается равным произведению  $\eta_p$ . Коэффициент превышения усилий при неуспешных АПВ  $p$  зависит от фазы колебания в момент отключения и повторного включения на КЗ, продолжительности первого КЗ и бестоковой паузы, частоты собственных колебаний, декремента затухания и других факторов. При наиболее неблагоприятных фазах отключения и повторного включения коэффициент превышения лежит в пределах  $1 \leq p \leq 2$  [9].

Скорость ветра и ветровую нагрузку можно рассматривать как суммы средних (статических) и пульсирующих (переменных) составляющих. Статическая составляющая ветровой нагрузки

$$q_{ст} = 0,5 \rho_a C_x d V^2, \quad (22)$$

где  $\rho_a$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $C_x$  — коэффициент лобового сопротивления шины;  $V$  — нормативная скорость ветра на высоте шины, м/с.

Пульсирующие составляющие скорости и ветровой нагрузки являются стационарными случайными функциями времени. Изменением скорости по фронту без существенной погрешности можно пренебречь. В этом случае динамический коэффициент ветровой нагрузки приводится к виду

$$\eta_p = 1 + \xi_a V^{1/3}, \quad (23)$$

где  $\xi_a$  — коэффициент, зависимость которого от частоты при различных декрементах затухания колебаний (в горизонтальной плоскости) приводятся на рис. 2.

В соответствии с ПУЭ и СНиП 2.01.07-85 расчет шинных конструкций на стойкость целесообразно проводить при следующих сочетаниях максимальных значений векторов электродинамических  $\bar{q}_s$ , ветровых  $\bar{q}_w$ , гололедных  $\bar{q}_g$  нагрузок и силы тяжести ошиновки  $\bar{q}_ш$ :

- $\bar{q}_{с1} = \bar{q}_s + 0,8\bar{q}_w + \bar{q}_ш$ ;
- $\bar{q}_{с2} = 0,8\bar{q}_s + \bar{q}_g + \bar{q}_ш$ ;
- $\bar{q}_{с3} = \bar{q}_s + 0,25\bar{q}_w + \bar{q}_g + \bar{q}_ш$ ;

г) при максимальных  $\bar{q}_s$  в режиме неуспешных АПВ с учетом  $q_{ш}$ .

Как показывают расчеты, гололедные нагрузки и вес ошиновки не оказывают заметного влияния на стойкость конструкций и могут не учитываться. Наибольшие усилия обычно возникают при первом (а) и четвертом (г) сочетаниях нагрузок. По-видимому, принятые сочетания позволяют оценить стойкость конструкций с запасом, снизить который можно после всесторонней оценки корреляции электродинамических и ветровых нагрузок.

9. Ошиновка ОРУ не должна быть подвержена ветровым резонансным колебаниям, которые возбуждаются периодическими срывами вихрей при скорости ветра

$$K_1 V_s \leq V \leq K_2 V_s, \quad (24)$$

где  $V_s = df_{1g}/Sh$  — струхалевская скорость ветра, м/с;  $Sh \approx 0,2$  — число Струхала;  $f_{1g}$  — первая частота собственных колебаний шины (19) в вертикальной плоскости, Гц;  $K_1$  и  $K_2$  — коэффициенты, определяющие область скоростей ветра при устойчивых резонансных колебаниях, примерно равные соответственно 0,7—1,0 и 1,0—1,3.

Устойчивые резонансные колебания не возбуждаются, если наибольший (расчетный) прогиб  $y_{р, max}$  не достигает критических (допустимых) значений  $y_{р, доп}$  [10], т. е.

$$y_{р, max} \leq y_{р, доп}. \quad (25)$$

Допустимый прогиб при вихревых возбуждениях лежит в пределах 0,02—0,1 диаметра шины  $d$ , а наибольший прогиб в соответствии с решением уравнения (17) определяется по формуле

$$y_{р, max} = C_{y0} \rho_a d^3 r_1^4 K_2^2 / (m G \delta_y), \quad (26)$$

где  $C_{y0}$  — коэффициент подьемной силы, при малых амплитудах равный 0,8;  $K_2$  — коэффициент резонансной скорости ветра, который оправдано установить равным 1,1;  $G$  — коэффициент пропорциональный жесткости шины (табл. 2);  $\delta_y$  — декремент затухания при колебаниях в вертикальной плоскости.

Как показывают исследования и опыт эксплуатации, резонансная скорость ветра невелика и составляет не более 2—3 м/с. Напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы в этом режиме обычно существенно меньше допустимых значений (15). Однако продолжительность ветровых резонансных колебаний может быть длительной (несколько часов), что оказывает отрицательное психологическое воздействие на персонал ОРУ, а также может приводить к ослаблению болтовых соединений, усталостным повреждениям элементов конструкции.

При прокладке внутри трубчатой шины троса, металлического стержня, изменения конструкции шинодержателей удается увеличить рассеяние энергии при колебаниях и «отстроиться» от вихревых возбуждений. Декремент колебания шин в вертикальной плоскости в 2—4 раза меньше, чем в горизонтальной, и для типовых конструкций

110—220 кВ составляет 0,04—0,2. Расчетные значения максимальных прогибов при отсутствии гололеда, как правило, незначительно превышают  $y_{р, max}$  при гололеде.

## ВЫВОДЫ

Предлагаемая методика расчета может использоваться как при «ручном», так и автоматизированном проектировании жесткой ошиновки ОРУ 110 кВ и выше. Основные положения методики прошли экспериментальную проверку.

Широкое внедрение жесткой ошиновки позволяет повысить технико-экономические показатели ОРУ, в частности, уменьшить расход материалов, объемы строительно-монтажных работ и трудозатраты, повысить уровень индустриализации строительства и производительность труда, ускорить сооружение ОРУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Долин А. П., Шонгин Г. Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Инструкция по проектированию изоляции в районах с чистой и загрязненной атмосферой. М.: Союзтехэнерго, 1984.
- Техника высоких напряжений / Под ред. Разевича Д. В. М.: Энергия, 1976.
- Бурслорф В. В. Нагрев проводов линий электропередачи. — Электричество, 1937, № 17—18.
- Лыков А. В. Теплообмен. М.: Энергия, 1971.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.
- Долин А. П., Бессонов С. А. Расчет длительно допустимых рабочих токов трубчатых шин ЗРУ и ОРУ. — Электрические станции, 1988, № 4.
- Кудрявцев Е. П., Долин А. П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981.
- Долин А. П., Козина М. А. Инженерный расчет жесткой ошиновки на электродинамическую стойкость при неуспешных АПВ. — Труды МЭИ, 1988, № 163.
- Долин А. П., Корягин А. Л. Расчет колебаний жесткой ошиновки ОРУ при ветровых резонансах. — Известия вузов. Энергетика, 1989, № 10.

УДК 621.316.925.621.311

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ФОРСИРОВКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ПРИ БОЛЬШИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Штробель В. А., канд. техн. наук, Бейм Р. С., инж. МЭИ

В настоящее время одно из средств повышения динамической устойчивости при работе синхронных машин в энергосистеме — быстрое повышение (форсировка) возбуждения машин сверх нормальных значений. Обычно в состав автоматического регулятора возбуждения (АРВ) входит устройство релейной форсировки (РФ) по напряжению, срабатывающее при снижениях напряжения на шинах синхронной машины (СМ) ниже заданного уровня. Такую релейную форсировку



## «ЭНЕРГОЭКО-90»

С 17 по 24 октября 1990 г. в Москве на ВДНХ СССР в павильонах «Электрификация СССР» и «Атомная энергия» будет проводиться международная специализированная выставка «Энергетика и охрана окружающей среды» (Энергоэко-90).

Выставку организуют Международное хозяйственное объединение Интератомэнерго, Министерство атомной энергетики и промышленности СССР, Министерство энергетики и электрификации СССР и Государственный комитет СССР по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и атомной энергетике.

В выставке будут участвовать около 90 фирм, предприятий и организаций из Болгарии, Венгрии, Германии, Дании, Индии, Польши, Советского Союза, США, Франции, Чехословакии и других стран.

Это будут дни международной школы передового опыта разработки и применения технических средств для защиты окружающей среды при эксплуатации атомных, тепловых и гидроэлектростанций.

По традиции на выставке будет действовать коммерческий центр, где деловым людям будут созданы условия для ведения переговоров и установления контактов с другими участниками выставки.

В рамках выставки 18—20 октября с. г. будет проводиться международный научно-технический симпозиум «Охрана окружающей среды при проектировании, сооружении и эксплуатации энергетических объектов».

Выставка будет работать ежедневно с 17 до 24 октября с 10 до 18 часов.

16 октября в 14 часов — пресс-конференция;

17 октября в 14 часов — открытие выставки;

24 октября в 14 часов — закрытие выставки.

**Приглашаем посетить выставку «ЭНЕРГОЭКО-90» и принять участие в международном симпозиуме.**

Оргкомитет

Адрес Оргкомитета:  
103074, Москва, Китайский пр., 7  
МХО Интератомэнерго  
Телефон: 220-46-04  
Телекс: 411425 Интер СУ  
Телефакс: 9257559