РОССИЙСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ "ЕЭС РОССИИ"

ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И РАЗВИТИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕРКЕ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ И СХЛЕСТЫВАНИЯ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

РД 153-34.3-20.672-2002

СЛУЖБА ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА ОРГРЭС

Москва 2003

gost.e-ecolog.ru

Разработано Московским энергетическим институтом (техническим университетом)

Исполнители проф., д.т.н. *Б.Н. НЕКЛЕПАЕВ*; проф., к.т.н. *И.П. КРЮЧКОВ*; проф., д.т.н. *Е.П. КУДРЯВЦЕВ*; вед. инж. *М.В. ПИРАТОРОВ*

Утверждено Департаментом научно-технической политики и развития РАО "ЕЭС России" 16.09.2002 г.

Начальник *Ю.Н. КУЧЕРОВ*

РД издан по лицензионному договору с РАО "ЕЭС России"

Срок первой проверки настоящего РД – 2008 г., периодичность проверки – один раз в 5 лет.

Ключевые слова: короткие замыкания, электродинамические силы, гибкие проводники, качания проводников, опасное сближение, схлестывание, смещение, угол отклонения, стрела провеса, воздушные линии, распределительные устройства, расчетная модель.

© СПО ОРГРЭС, 2003

УДК 621.311

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕРКЕ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ И СХЛЕСТЫВАНИЯ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

РД 153-34.3-20.672-2002

Введено впервые

Дата введения 2003 – 03 – 01
год – месяц – число

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Методические указания предназначены для использования при выполнении расчетов по определению опасного сближения или схлестывания гибких проводников ВЛ и РУ при КЗ. Они являются руководящим документом для работников проектных, научно-исследовательских и эксплуатационных организаций при оценке смещений гибких проводников при КЗ.

Методические указания распространяются на расчеты колебаний при КЗ гибких проводников ВЛ и РУ всех классов напряжений.

Настоящие Методические указания основываются на положениях государственных стандартов в области токов КЗ (ГОСТ-27514-87, ГОСТ Р 50254-92), Правил устройства электроустановок (ПУЭ 6-го изд., 1986 г.), на положениях стандартов и материалов Международной Электротехнической Комиссии (МЭК)

Издание официальное

Настоящий РД не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен без разрешения организации-разработчика

2 ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

2.1 Модели проводников

В итоге многолетних исследований электродинамической стойкости гибких проводников, проведенных в разных странах мира, определились две расчетные модели таких проводников, наилучшим образом отвечающие задачам практики.

Одна из них представляет собой нерастяжимый стержень-маятник на жестком подвесе с массой, сосредоточенной в центре масс проводника в пролете. Вторая — гибкая нить с равномерно распределенной по длине массой, обладающая (в некоторых версиях не обладающая) конечной жесткостью на растяжение, изгиб и кручение.

Расчетная модель в виде маятника используется в упрощенных методиках расчетов, при этом не требуется обращение к ЭВМ. Расчетная модель в виде нити применена в разработанных в разных странах (в том числе и в СНГ) программах для расчетов электродинамической стойкости на ЭВМ. Расчетные модели, отличные от названных (как правило более сложные, чем схема-маятник), не нашли практического применения и далее подробно не рассматриваются.

2.2 Физические законы и зависимости, используемые в работе

Закон Ампера $\vec{F} = \left[\vec{i}_1 \cdot \vec{B}_2\right] = \left[\vec{i}_2 \cdot \vec{B}_1\right]$.

Закон полного тока (закон Гаусса) $\oint Hdl = i$.

Второй закон Ньютона $MV = Ft$.

Значение кинетической энергии $W_{кин} = \frac{mV^2}{2}$,

$$\Delta W_{кин} = W_{кин_2} - W_{кин_1} = \frac{m}{2}\left(V_2^2 - V_1^2\right).$$

Значение потенциальной энергии $W_{пот} = mgH$,

$$\Delta W_{пот} = W_{пот_2} - W_{пот_1} = mg(H - h).$$

Уравнение Лагранжа $J\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -MgL\sin\alpha + FL\cos\alpha$.

3 ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА МЭИ

3.1 Расчетные условия

3.1.1 Общие расчетные условия

При проверке гибких проводников ВЛ и РУ на возможность их опасного сближения или схлестывания при КЗ необходимо правильно выбрать расчетные условия, т.е. наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия, при которых возможно опасное сближение или схлестывание проводников. К расчетным условиям относятся:

- расчетный вид КЗ;
- расчетная продолжительность КЗ.

Согласно Правилам устройства электроустановок расчетным видом КЗ является двухфазное КЗ. В качестве расчетной продолжительности КЗ может оказаться как суммарное время действия основной защиты электроустановки с гибкими проводниками и полное время отключения выключателя, так и суммарное время действия резервной защиты и полное время отключения выключателя.

3.1.2 Расчетные зоны динамики проводников

В период с момента возникновения КЗ и до его отключения расчетная модель гибкого проводника каждой фазы в виде жесткого стержня (рисунок 1) достаточно полно описывает его движение, и оценки смещений проводников на этом этапе движения оказываются весьма точными, что подтверждается опытными данными.

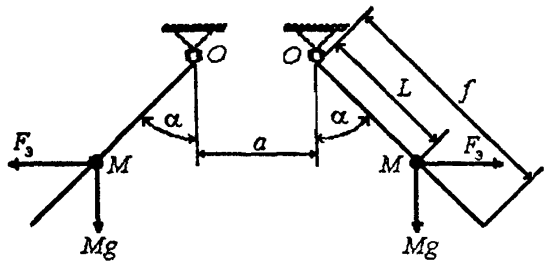


Рисунок 1 – Расчетная модель двух гибких проводников

На рисунке 1 и далее приняты следующие обозначения:

a – расстояние между осями проводников смежных фаз до КЗ, м;

M – масса проводника расчетного пролета, кг;

f – стрела провеса проводника в середине пролета, м;

L – расстояние от прямой, соединяющей точки крепления проводника одного пролета, до центра масс этого проводника (длина маятника), м;

α – угол отклонения проводника от вертикали, рад;

$F_э$ – электродинамическая сила, Н;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2.

После отключения КЗ проводники сначала движутся по инерции, преодолевая действие силы тяжести и сохраняя при этом в течение некоторого времени, пока имеет место натягивающая проводники сила, форму, близкую к форме плоской гибкой нити, загруженной собственным весом. На этом этапе движения проводников их поведение уже менее точно описывается принятой расчетной моделью, хотя и здесь оценки их смещения оказываются приемлемыми.

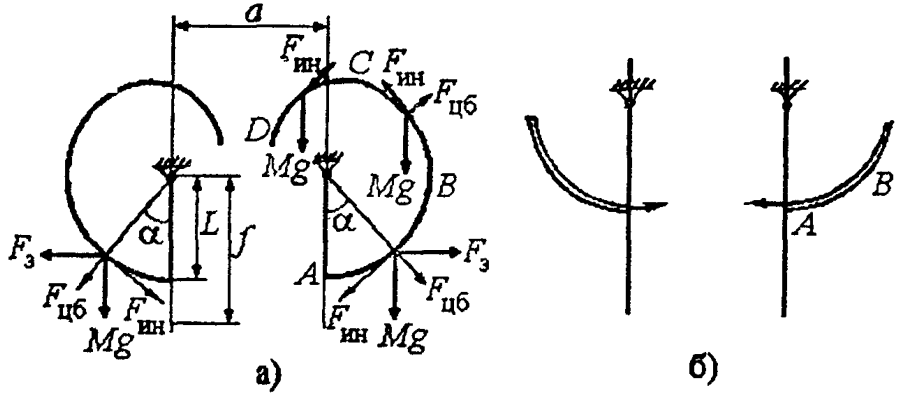
Тяжение в проводниках исчезает, когда центры масс проводников оказываются выше точек их крепления к опорам, и центробежные силы оказываются недостаточными для поддержания прежней формы проводников в виде гиб-

кой натянутой нити. На этом этапе движения проводники подобны телам, падающим под действием инерционных сил и сил тяжести. Поэтому расчет смещений проводников с использованием модели в виде маятника здесь невозможен.

При КЗ проводники под действием электродинамических сил отталкиваются друг от друга, а их максимальное сближение имеет место после отключения КЗ, при колебаниях проводников вокруг исходного положения равновесия.

3.1.3 Баланс сил в расчетных зонах

При движении гибких проводников в результате возникшего на ВЛ или в РУ короткого замыкания расчетными нагрузками на расчетный маятник являются (рисунок 2):



а — траектории движения проводников (их центров масс) при большом кратковременном токе КЗ. АВ — участок траектории, который проходит проводник во время КЗ; ВС — участок траектории, который проходит проводник, натянутый действующими на него силами, после отключения тока КЗ; CD — участок траектории, где ненатянутый провод "падает" под действием силы тяжести и инерционных сил, *б* — траектории движения проводников при малом токе КЗ; $F_{цб}$ — центробежная сила

Рисунок 2 – Траектории движения проводников при КЗ и после него

— сила тяжести Mg, направленная вертикально вниз и действующая постоянно на всех этапах движения проводников;

— электродинамическая сила $F_э$, которая при двухфазном КЗ на линиях с проводниками, закрепленными в одной горизонтальной плоскости, направлена горизонтально и действует до момента отключения тока КЗ;

— инерционная сила $F_{ин}$, направленная противоположно вектору окружного ускорения центра массы проводника в пролете и действующая в периоды, когда проводник натянут и его можно рассматривать как маятник;

— инерционные силы, свойственные телам, которые после воздействия нескольких сил двигаются в пространстве в поле силы тяжести: это имеет место на этапе движения гибких проводников, когда они не натянуты.

3.1.4 Принятые допущения

Принятие расчетной модели гибкого проводника в виде маятника, определение электродинамических сил по формулам, справедливым для параллельных бесконечно тонких и длинных проводников, оправданы многолетним опытом их использования. Эти гипотезы положены в основу рекомендаций МЭК по расчетам электродинамической стойкости электроустановок с гибкими проводниками. Целесообразность принятия этих гипотез подтверждена проведенными за рубежом достаточно обстоятельными экспериментами.

Упрощенный учет влияния отводов и гирлянд изоляторов, влияния нагрева проводников, отказ от учета деформаций растяжения проводников оправдываются сравнительными оценками, сделанными на базе многочисленных расчетов.

4 МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Прежде чем приступать к расчету смещений гибких проводников при КЗ, вычисляется значение критерия, характеризующего степень опасности сближения проводников при КЗ. При значении этого критерия больше предельного, необходимо проводить расчет, в противном случае расчет не нужен.

Расчет выполняется в два этапа. На первом этапе вычисляется энергия, которую накапливают проводники пролета за время КЗ. Эта энергия равна работе электродинамических сил. На втором этапе по найденной энергии вычисляются горизонтальные смещения проводников в середине пролета.

Если продолжительность КЗ меньше 0,6 периода малых собственных колебаний расчетного маятника, то работа электродинамических сил за время КЗ вычисляется с помощью кривых, полученных путем решения уравнения вынужденных нелинейных колебаний расчетного маятника. Если же продолжительность КЗ больше 0,6 периода малых собственных колебаний расчетного маятника, то работа электродинамических сил за время КЗ вычисляется с помощью других кривых, построенных путем использования закона постоянства полной энергии потенциальной системы.

При кратковременных КЗ, когда их расчетная продолжительность не превышает так называемую предельную (см. ниже), смещение проводников оказывается возможным вычислять, не определяя работу электродинамических сил.

Упомянутый выше критерий, характеризующий степень опасности сближения проводников при КЗ, — параметр p, кА^2·с/Н, определяется по формуле

$$p = \frac{\lambda \left(I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq}, \qquad (1)$$

где $I_{п0}^{(2)}$ — начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ, кА;

$t_{откл}$ — расчетная продолжительность КЗ, с;

$q = m_{пог} g$ — погонная сила тяжести проводника, Н/м;

$m_{пог}$ — погонная масса проводника, кг/м;

λ — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей электродинамической силы (график для его определения приведен на рисунке 3, где T_a — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с).

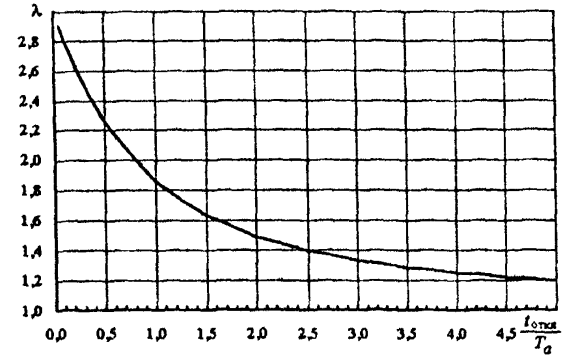


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента λ от $t_{откл}/T_a$

При $p \le 0{,}4$ кА^2·с/Н расчет смещений гибких проводников не нужен, так как опасности их чрезмерных сближений нет.

На рисунке 4 приведен график, связывающий параметры формулы (1) при $\lambda = 1$. Кривые $t_{откл} = f(I_{п0}^{(2)})$ при $aq = \text{const}$ ограничивают области параметров $t_{откл}$ и $I_{п0}^{(2)}$, при которых расчет смещений проводников не нужен.

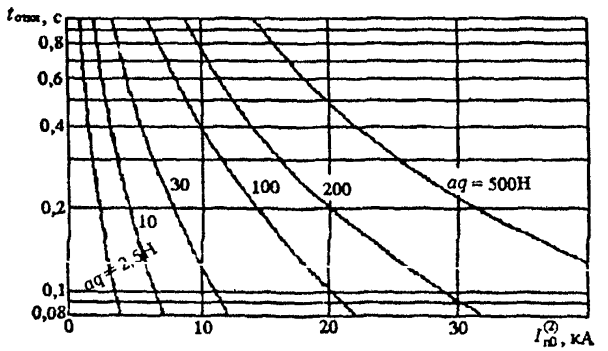


Рисунок 4 – Продолжительность КЗ, при которой $p = 0{,}4$

Если $p > 0{,}4$ кА^2·с/Н, то сначала следует определить предельную продолжительность КЗ, с:

$$t_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{0{,}9}{\omega_0^2} \cdot \frac{Mg}{F^{(2)}_{\text{расч}}}}, \qquad (2)$$

где $\omega_0 = \sqrt{g/L}$ — частота малых собственных колебаний расчетного маятника, 1/с, причем $L = 2f/3$, м;

$M = m_{\text{пог}} l$ — масса проводника пролета, кг;

l — длина пролета, м;

$F^{(2)}_{\text{расч}}$ — расчетная электродинамическая сила при двухфазном КЗ, Н.

Последняя вычисляется по формуле:

$$F^{(2)}_{\text{расч}} = F^{(2)}_0 \lambda = \frac{\mu\mu_0 l \left(\sqrt{2}\, I^{(2)}_{\text{п0}}\right)^2 \cdot 10^6}{4\pi a} \lambda = k_1 \frac{l \left(\sqrt{2}\, I^{(2)}_{\text{п0}}\right)^2}{a} \lambda, \qquad (3)$$

где $k_1 = \dfrac{\mu\mu_0 \cdot 10^6}{4\pi} = \dfrac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6}{4\pi} = 0{,}1 \dfrac{\text{Гн}}{\text{м}}$;

$F^{(2)}_0$ — постоянная составляющая электродинамической нагрузки на проводник в пролете при двухфазном КЗ, Н;

μ — относительная магнитная проницаемость воздушной среды (для воздуха $\mu = 1$);

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

При $t_{\text{откл}} \leq t_{\text{пред}}$ горизонтальное смещение проводника при КЗ, м, вычисляется по формуле

$$s = 1{,}23 \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \sqrt{gf} \frac{\lambda \left(\sqrt{2}\, I^{(2)}_{\text{п0}}\right)^2 \cdot 10^6 t_{\text{откл}}}{aq} = k_2 \sqrt{gf} \frac{\lambda \left(\sqrt{2}\, I^{(2)}_{\text{п0}}\right)^2 t_{\text{откл}}}{aq}, \qquad (4)$$

где $k_2 = 1{,}23 \dfrac{\mu\mu_0 \cdot 10^6}{4\pi} = 1{,}23 \dfrac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6}{4\pi} = 0{,}123 \dfrac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

В случае, если вычисленное по формуле (4) значение s оказывается больше стрелы провеса проводника в середине пролета, следует принимать $s = f$.

При $t_{пред} < t_{откл} \le 0{,}6\ (2\pi/\omega_0)$ горизонтальное смещение проводника при КЗ, м, вычисляется по одной из формул:

$$\left.\begin{aligned} s &= f \sin \alpha_{max} \quad \text{при} \quad \frac{\Delta W_к}{MgL} \le 1; \\ s &= f \quad \text{при} \quad \frac{\Delta W_к}{MgL} > 1, \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

где α_{max} — угол максимального отклонения проводника от вертикали, рад:

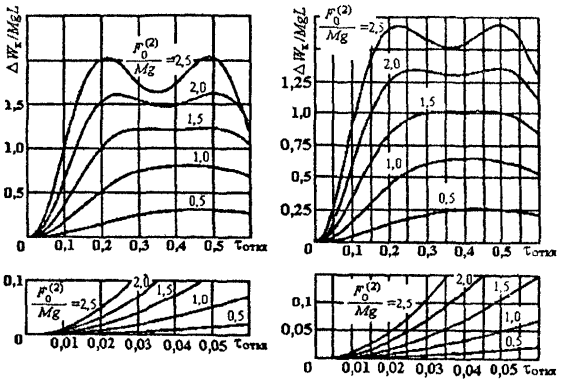
$$\alpha_{max} = \arccos\,(1 - \Delta W_к / Mg\,L); \qquad (6)$$

$\Delta W_к = f\left[\left(F^{(2)}_{расч}/Mg\right), \left(L/a\right), \tau_{откл}\right]$ — энергия, накопленная проводником пролета за время КЗ, Дж, и определяемая с использованием графиков рисунка 5, где $\tau_{откл} = t_{откл}/T_0 = t_{откл}\omega_0/2\pi$ — относительная продолжительность КЗ в долях от периода собственных колебаний проводника в пролете.

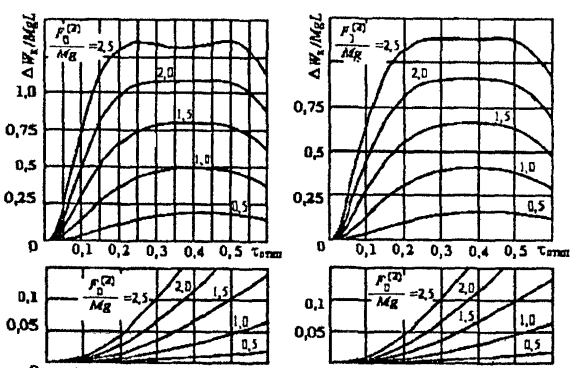
При $t_{откл.} > 0{,}6\ (2\pi/\omega_0)$ горизонтальное смещение проводника также вычисляется по формулам (5), однако входящая в формулы (5) и (6) энергия $\Delta W_к$, Дж, приближенно оценивается по одной из формул:

$$\left.\begin{aligned} \Delta W_к &= 0{,}5F^{(2)}_{расч}\, a \ln\frac{a+2L}{a}, \quad \text{если} \quad 0{,}5F^{(2)}_{расч}\, a \ln\frac{a+2L}{a} > MgL; \\ \Delta W_к &= Mgh, \qquad\qquad\quad \text{если} \quad 0{,}5F^{(2)}_{расч}\, a \ln\frac{a+2L}{a} \le MgL, \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

где h — высота подъема проводника над его положением до КЗ, м, которая определяется с использованием рисунка 6.



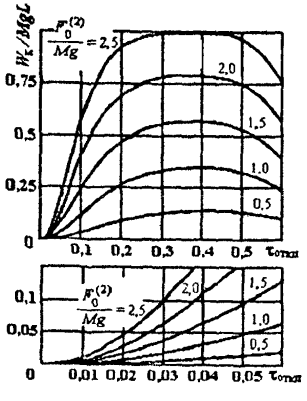
а) при $2L/a = 0{,}5$; *б*) при $2L/a = 1{,}1$;



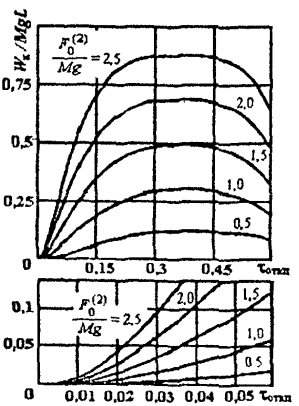
в) при $2L/a = 2{,}1$; *г*) при $2L/a = 3{,}1$;

Рисунок 5 – Характеристики $\Delta W_к / Mg\,L$ при двухфазном КЗ

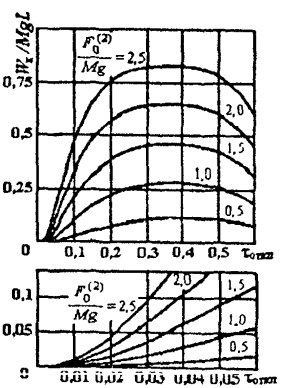
(*Окончание рисунка см. на обороте*)



д) при $2L/a = 4,1$;



е) при $2L/a = 5,1$;



ж) при $2L/a = 5,7$

Окончание рисунка 5

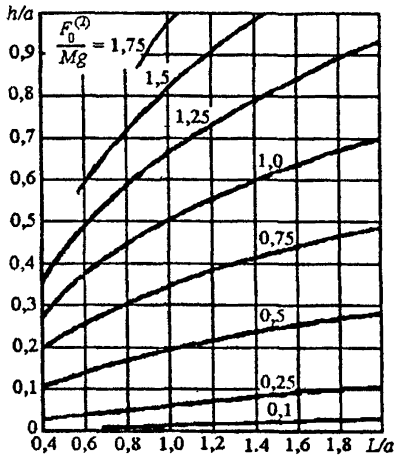


Рисунок 6 – Характеристики *h/a* при двухфазном КЗ

Максимальное сближение проводников (минимальное расстояние между проводниками) вычисляется по формуле

$$a_{min} = a - 2\,(s + r_p), \qquad (8)$$

где s – найденное максимальное горизонтальное смещение проводника в середине пролета от равновесного положения, а для расщепленных фаз – это горизонтальное смещение оси расчетного одиночного проводника с поперечным сечением, равным сумме сечений всех проводников фазы в середине пролета;

r_p – радиус расщепления фазы, м.

Влияние гирлянд изоляторов можно приближенно учесть увеличением погонного веса и стрелы провеса проводников путем замены в приведенных выше формулах массы

проводника M "приведенной" массой $M_{пр} = M\gamma$ и стрелы провеса f "приведенной" стрелой провеса $f_{пр} = f + l_г \cos\beta$, где γ – коэффициент приведения массы (см. таблицу 1); $l_г$ – длина гирлянды изоляторов, м; β – угол отклонения натяжных гирлянд от вертикали до КЗ рад.

Наличие отводов приближенно может также учитываться увеличением массы проводников. При этом приведенную массу проводника можно оценить по формуле

$$M_{пр} = M\gamma + M_{отв},$$

где $M_{отв}$ – масса отводов в пролете, кг.

Таблица 1 – Коэффициент приведения массы γ

$f_г/f$	Значение коэффициента приведения массы γ при различных $M_г/M$								
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	1,00	2,00	3,00
0,01	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001	1,002	1,003	1,005	1,006
0,02	1,000	1,000	1,000	1,001	1,002	1,004	1,007	1,010	1,012
0,05	1,000	1,000	1,001	1,002	1,004	1,010	1,016	1,024	1,029
0,10	1,000	1,001	1,002	1,004	1,008	1,019	1,031	1,048	1,058
0,20	1,001	1,002	1,004	1,008	1,015	1,034	1,059	1,090	1,110
0,50	1,002	1,003	1,008	0,016	1,031	1,071	1,130	1,200	1,250
1,00	1,002	1,005	1,012	1,024	1,048	1,110	1,200	1,330	1,430
2,00	1,003	1,007	1,017	1,033	1,065	1,150	1,290	1,500	1,670
3,00	1,004	1,007	1,019	1,037	1,073	1,180	1,330	1,600	1,820

Примечание – $M_г$ – масса гирлянд (суммарная масса двух натяжных гирлянд у двух опор проводников в пролете или масса одной гирлянды, если на опорах гирлянды подвесные); M – масса проводника в пролете; $f_г$ – провес гирлянд; f – стрела провеса проводника.

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ И МАКСИМАЛЬНОГО СБЛИЖЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ПРИ КЗ

Максимальное смещение гибких проводников при их раскачивании в условиях двухфазного КЗ определяется по выражению:

$$y_{max} = s.$$

Методика определения s дана выше.

Минимальное расстояние между гибкими проводниками при их сближении в условиях КЗ определяется по выражению:

$$a_{min} = a - 2\,y_{max}.$$

Необходимо соблюдать условие $a_{min} > a_{min\ доп}$, где $a_{min\ доп}$ — минимально допустимое расстояние между проводниками фаз. Согласно ПУЭ (гл. 5) и исследованиям, проведенным в МЭИ, $a_{min\ доп}$ при разных номинальных напряжениях $U_{ном}$, составляют:

$U_{ном}$ кВ	$a_{min\ доп}$ м
35	0,2
110	0,45
150	0,6
220	0,95
330	1,4
500	2,0
750	3,3
1150	5,4

Обоснования указанных соотношений даны в настоящих Методических указаниях.

6 РЕКОМЕНДАЦИИ

При определении условий опасных сближений гибких проводников при КЗ сначала следует по формуле (1) вычислить значение критерия p. Если $p \le 0{,}4$ кА$^2 \cdot$ с/Н, то проводники находятся в неопасной зоне и могут нормально эксплуатироваться; если же $p > 0{,}4$ кА$^2 \cdot$ с/Н, то проводники находятся в опасной зоне, т.е. возможны пробои изоляционных промежутков между ними и даже схлестывание. В этом случае необходимо производить детальный расчет качаний проводников и воздействовать на режимные параметры $I_{п0}^{(2)}$ и $t_{откл}$ в отдельности или совместно.

Таблица А.1 – Параметры и характеристики элементов ВЛ

Номинальное напряжение, кВ	Шифр опоры	Схема расположения проводов	Материал опоры	Расстояние между проводами разных фаз на опоре, м			Предельные марки проводов
				А – В	В – С	С – А	
1	2	3	4	5	6	7	8
35	П35-1	1	Сталь	3,27	~5,22	~4,94	АС70/11-150/24
	П35-2	2	Сталь	3,27	3,27	6	АС70/11-150/24
	ПБ35-1	1	Железобетон	3,35	~3,42	~3,56	АС95/16-150/24
	ПБ35-2	2	Железобетон	3,09	3,09	6	АС95/16-150/24
	ПД35-1	3	Дерево	3	3	6	АС50/8-120/19
	ПД35-3	3	Дерево	3	3	6	АС150/24
	ПД35-5	3	Дерево	3	3	6	АС50/8-150/24
110	П110-1	1	Сталь	4,52	~6,02	~5,6	АС70/11-95/16
	П110-3	1	Сталь	4,52	~6,22	~5,74	АС120/19-240/32
	П110-2	2	Сталь	4,52	4,52	8	АС70/11
	П110-4	2	Сталь	4,52	4,52	8	АС120/19-240/32
	ПБ110-1	1	Железобетон	3,35	~5,42	~4,94	АС70/11-150/24
	ПБ110-3	1	Железобетон	3,35	~5,42	~4,94	АС185/29; 240/32
	ПБ110-2	2	Железобетон	3,35	3,35	6	АС70/11-120/19
	ПБ110-4	2	Железобетон	3,35	3,35	6	АС185/29; 240/32

ДАННЫХ ВЛ

Район по гололеду и габаритные пролеты, м	Погонная масса провода, кг/км	Тип изолятора	Количество изоляторов в гирлянде, шт.	Длина гирлянды изоляторов с арматурой, м	Масса изоляторов с арматурой кг	Расстояние от поверхности земли до ближайшего провода в месте его крепления, м
9	10	11	12	13	14	15
I:319-350; II:250-310	276-559	ПФ70-В ПС70-Б	3	0,69 0,68	19 16	14,31 14,32
I:295-335; II:235-290	276-559	ПФ70-В ПС70-Б	3	0,69 0,68	19 16	13,31 13,32
I:390-375; II:280-330	385-559	ПФ70-В ПС70-Б	3	0,69 0,68	19 16	14,81 14,32
I:275-265; II:230-255	385-559	ПФ70-В ПС70-Б	3	0,69 0,68	19 16	11,81 11,82
I:240-275; II:180-240	195-471	ПФ70-В ПС70-Б	2 2	0,56 0,55	13 12	12,34 12,35
I:275 II:265	559	ПФ70-В ПС70-Б	2 2	0,56 0,55	13 12	12,34 12,35
I:245-280; II:190-270	195-559	ПФ70-В ПС70-Б	2 2	0,56 0,55	13 12	12,59 12,50
I:386-375; II:300-305	276-385	ПФ70-Б ПС70-Б	7 8	1,25 1,35	38 36	18,75 17,65
I:435-445-435; II:365-380	471-921	ПФ70-Б ПС70-Б	7 8	1,25 1,35	38 36	17,75 17,65
I:380; II:300	276	ПФ70-Б ПС70-Б	7 8	1,25 1,35	38 36	17,75 17,65
I:435-445-435; II:365-380	471-921	ПФ70-Б ПС70-Б	7 8	1,25 1,35	38 36	17,75 17,65
I:295-330; II:235-300	276-959	ПФ70-Б ПС70-Б	7 8	1,25 1,35	38 36	13,25 13,15
I:330; 325; II:310; 315	728; 921	ПФ70-Б ПС70-Б	7 8	1,25 1,35	38 36	13,25 13,15
I:276; 260-275; II:215; 235-250	276-471	ПФ70-Б ПС70-Б	7 8	1,25 1,35	38 36	12,25 12,15
I:275; II:275	728; 921	ПФ70-Б ПС70-Б	7 8	1,25 1,35	38 36	12,25 12,15

Продолжение таблицы А.1

Номинальное напряжение, кВ	Шифр опоры	Схема расположения проводов	Материал опоры	Расстояние между проводами разных фаз на опоре, м			Предельные марки проводов
				А – В	В – С	С – А	
1	2	3	4	5	6	7	8
110	ПД110-1	3	Дерево	4	4	8	АС70/11-120/19
	ПД110-3	3	Дерево	4	4	8	АС150/24; 185/29
	ПД110-5	3	Дерево	4	4	8	АС70/11-185/29
150	П150-1	1	Сталь	6,21	~6,72	~7,89	АС120/19-240/32
	П150-2	2	Сталь	6,21	~6,21	12	АС120/19-240/32
	ПБ150-1	1	Железобетон	4,27	~6,42	~6,34	АС120/19-240/32
	ПБ150-2	2	Железобетон	4,27	4,27	8	АС120/19-240/32
	ПСБ150-1	3	Железобетон	~5	~5	~1	АС120/19-240/32
220	П220-3	1	Сталь	7	~9,92	~9,79	АС300/39; 400/51
	П220-2	2	Сталь	6,22	6,96	12,02	АС300/39; 400/51
	ПБ220-1	1	Железобетон	5,85	~7,52	~7,79	АС300/39; 400/51
	ПБ220-3	1	Железобетон	5,85	~7,52	~7,79	АС300/39; 400/51
	ПСБ220-1	3	Железобетон	~5,74	~5,74	~11,48	АС300/39; 400/51
	ПБ220-12	3	Железобетон	~13,76	~13,76	~27,52	АС300/39; 400/51
	ПД220-1	3	Дерево	5,25	5,25	10,5	АС300/39-500/64
	ПД220-3	3	Дерево	5,25	5,25	10,5	АС300/39-500/64

Район по гололеду и габаритные пролеты, м	Погонная масса провода, кг/км	Тип изолятора	Количество изоляторов в гирлянде, шт.	Длина гирлянды изоляторов с арматурой, м	Масса изоляторов с арматурой, кг	Расстояние от поверхности земли до ближайшего провода в месте его крепления, м
9	10	11	12	13	14	15
I:240-260;	276-471	ПФ70-Б	6	1,1	33	10,9
II.190-240.		ПС70-Б	7	1,2	32	10,8
I.260; 255;	559; 728	ПФ70-Б	6	1,1	33	10,9
II:255; 230		ПС70-Б	7	1,2	32	10,8
I:245-260	276-728	ПФ70-Б	6	1,1	33	12,05
		ПС70-Б	7	1,2	32	11,95
I:426-425-413;	471-921	ПФ70-В	9	1,5	47	17,5
II:350-370		ПС70-Б	10	1,6	45	17,4
I:426-425-413;	471-921	ПФ70-В	9	1,5	47	17,5
II:350-370		ПС70-Б	10	1,6	45	17,4
I.290-270;	471-921	ПФ70-В	9	1,5	47	12,0
II:245-270		ПС70-Б	10	1,6	45	11,9
I:290-245;	471-921	ПФ70-В	9	1,5	47	12,0
II:245-255-243		ПС70-Б	10	1,6	45	11,9
I:385-380,	471-921	ПФ70-В	9	1,5	47	16,0
II:325-360		ПС70-Б	10	1,6	45	15,9
I:520; 520;	1132; 1490	ПФ70-В	13	2,2	72	23,3
II:490; 475		ПС70-Б	14	2,3	67	23,2
I:470; 465;	1132; 1490	ПФ70-В	13	2,2	72	20,3
II:440; 425		ПС70-Б	14	2,3	67	20,2
I:310;	1132; 1490	ПФ70-В	13	2,2	72	13,8
II:310		ПС70-Б	14	2,3	67	13,7
I:320;	1132; 1490	ПФ70-В	13	2,2	72	15,3
II:320		ПС70-Б	14	2,3	67	15,2
I.350;	1132; 1490	ПФ70-В	13	2,2	72	15,3
II:345; 350		ПС70-Б	14	2,3	67	15,2
I.430,	1132; 1490	ПФ70-В	13	2,2	72	19,0
II:410, 410		ПС70-Б	14	2,3	67	18,9
I.250-210:	1132-1852	ПФ70-В	12	2,05	67	12,55
II:250-210		ПС70-Б	13	1,9	60	12,7
I:250-210;	1132-1852	ПФ70-В	12	2,05	67	12,55
II 250-210		ПС70-Б	13	1,9	60	12,7

Окончание таблицы А.1

Номинальное напряжение, кВ	Шифр опоры	Схема расположения проводов	Материал опоры	Расстояние между проводами разных фаз на опоре, м			Предельные марки проводов
				А – В	В – С	С – А	
1	2	3	4	5	6	7	8
330	П330-3	1	Сталь	8,28	–14,02	–12,92	2×АС300/39, 2×АС400/51
	П330-1	1	Сталь	8,32	–15,92	–14,42	2×АС300/39
	П330-9	3	Сталь	–8,46	–8,46	–16,92	2×АС300/39; 2×АС400/51
	П330-2	2	Сталь	8,45	7,24	14,02	2×АС300/39, 2×АС400/51
	ПБ330-7Н	3	Железобетон	–8,16	–8,16	–16,32	2×АС300/39; 2×АС400/51
500	ПБ-1	3	Сталь	12	12	24	3×АС400/51; 3×АС500/64
	ПБ500-1	3	Железобетон	–8,36	–8,36	–16,72	3×АС300/43; 3×АС400/51; 3×АС500/64

Примечание – Схема расположения проводов № 1 означает, что проводники двух фаз выше них; схема № 2 означает, что проводники разных фаз находятся на разном расстоянии от поверхности на одинаковом расстоянии от поверхности земли (так называемое горизонтальное расположение

Район по гололеду и габаритные пролеты, м	Погонная масса провода, кг/км	Тип изолятора	Количество изоляторов в гирлянде, шт	Длина гирлянды изоляторов с арматурой, м	Масса изоляторов с арматурой, кг	Расстояние от поверхности земли до ближайшего провода в месте его крепления, м
9	10	11	12	13	14	15
I:495; II.470; 450	2×1132; 2×1490	ПФ70-В ПС70-Б ПС120-А	19 21 17	3,0 3,2 3,1	118 111 130	22,5 22,3 22,4
I:495; II.470	2×1132	ПФ70-В ПС70-Б ПС120-А	19 21 17	3,0 3,2 3,1	118 111 130	22,5 22,3 22,4
I:495; II:470; 450	2×1132; 2×1490	ПФ70-В ПС70-Б ПС120-А	19 21 17	3,0 3,2 3,1	118 111 130	22,5 22,3 22,4
I:445; 425; II:415; 395	2×1132; 2×1490	ПФ70-В ПС70-Б ПС120-А	19 21 17	3,0 3,2 3,1	118 111 130	19,5 19,3 19,4
I:450; II:425; 440	2×1132; 2×1490	ПФ70-В ПС70-Б ПС120-А	19 21 17	3,0 3,2 3,1	118 111 130	20,0 19,8 19,9
II:460; II:425	3×1490 3×1852	ПФ120-А ПС120-А	21 24	4,9 4,5	238 185	22,3 22,7
I:380; II:380 I:385; II:385 I:355; II 355	3×1255 3×1490 3×1852	ПФ120-А ПС120-А	21 24	4,9 4,5	238 185	14,6 15,0

находятся на одинаковом расстоянии от поверхности земли, а проводник третьей фазы закреплен земли и закреплены на двухцепных опорах; схема № 3 означает, что проводники всех фаз находятся проводов)

Таблица А.2 – Основные расчетные характеристики сталеалюминиевых проводов марок АС, АСКС, АСКП, АпСКП, АпСКС

Номинальное сечение, мм² алюминий/сталь	Сечение, мм²		Масса, кг/км			Модуль упругости E, 10^3 Н/мм²	Допустимое напряжение σ, Н/мм²
	Алюминий	Сталь	провода (без смазки)	смазки для			
				АСКС, АпСКС	АСКП, АпСКП		
1	2	3	4	5	6	7	8
50/8	48,2	8,04	195	3,0	3,0	82,5	87
70/11	68,0	11,3	276	4,5	4,5	82,5	87
70/72	68,4	72,2	755	38	38	134	201
95/16	95,4	15,9	385	6,0	6,0	82,5	87
95/141	91,2	141	1357	69	69	146	228
120/19	118,0	18,8	471	11	35	82,5	87
120/27	114	26,6	528	14	37	89	99
150/19	148,0	18,8	554	12	42	77	81
150/24	149,0	24,2	599	14	44	82,5	87
150/34	147,0	34,3	675	18	48	89	99
185/24	187,0	24,2	705	14	51	77	81
185/29	181,0	29,0	728	16	52	82,5	87
185/43	185,0	43,1	846	23	61	89	99
185/128	187,0	128,0	1525	63	101	114	165
205/27	215,0	26,6	74	15	57	77	81
240/32	244,0	31,7	921	17	66	77	81
240/39	236,0	38,6	952	22	71	82,5	87
240/56	241,0	56,3	1106	30	78	89	99
300/39	301,0	38,6	1132	22	83	77	81
300/48	295,0	47,8	1186	27	87	82,5	87
300/66	288,5	65,8	1313	37	95	89	99
300/67	288,5	67,3	1323	37	95	89	99
300/204	298,0	204,0	2428	102	164	114	165
330/30	335,0	29,1	1152	12	112	...	...
330/43	332,0	43,1	1255	23	133	77	81
400/18	381,0	18,8	1199	12	131	...	...

Окончание таблицы А.2

Номинальное сечение, мм² алюминий/сталь	Сечение, мм²		Масса, кг/км			Модуль упругости E, 10^3 Н/мм²	Допустимое напряжение σ, Н/мм²
	Алюминий	Сталь	провода (без смазки)	смазки для			
				АСКС, АпСКС	АСКП, АпСКП		
1	2	3	4	5	6	7	8
401/22	394,0	26,6	1261	12	133	...	...
400/51	394,0	51,1	1490	28	134	77	81
400/64	390,0	63,5	1572	35	115	82,5	87
400/93	406,0	93,2	1851	53	133	89	99
450/56	434,0	56,3	1640	30	145	77	81
500/26	502,0	26,6	1592	15	158	...	...
500/27	481,0	26,6	1537	15	152	66,5	65
500/64	490,0	63,5	1852	33	163	77	81
500/204	496,0	204	2979	105	230	...	...
500/336	490,0	336	4005	168	270	114	165

Примечаний

1 Значения допустимого напряжения указаны при среднегодовой температуре.

2 – · · · – данные отсутствуют.

Приложение Б

(рекомендуемое)

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКЕ МЭИ

Пример 1. Воздушная линия напряжением 110 кВ

Исходные данные:

длина пролета ..... $l = 200$ м,
стрела провеса в середине пролета ..... $f = 10$ м,
расстояние между фазами ..... $a = 4$ м,
гирлянды подвесные, длина гирлянды .... $l_г = 1{,}5$ м,
постоянная времени ..... $T_а = 0{,}05$ с,
погонная масса проводника ..... $m_{пог} = 1{,}3$ кг/м,
масса гирлянды ..... $M_г = 56$ кг,
начальное значение тока двухфазного КЗ $I_{п0}^{(2)} = 10$ кА,
расчетная продолжительность КЗ ..... $t_{откл} = 0{,}1$ с.

Вычисляем приведенную стрелу провеса в середине пролета

$$f_{пр} = f + f_г = f + l_г \cos\beta = 10 + 1{,}5 \cdot 1 = 11{,}5 \text{ м}.$$

Определяем массу проводника $M = m_{пог} l = 1{,}3 \cdot 200 = 260$ кг, а также $f_г/f = 1{,}5/10 = 0{,}15$ и $M_г/M = 56/260 = 0{,}215$ и по таблице 1 настоящего МУ путем интерполяции находим коэффициент приведения массы $\gamma = 1{,}02$. При этом приведенная масса проводника $M_{пр} = M\gamma = 260 \cdot 1{,}02 = 265{,}2$ кг, а приведенная погонная сила тяжести $q_{пр} = M_{пр}\, g/l = 265{,}2 \cdot 9{,}81/200 = 13$ Н/м. В дальнейшем расчете в соответствующие формулы вместо q, M и f подставляем приведенные параметры $q_{пр}$, $M_{пр}$ и $f_{пр}$.

Вычисляем параметр p. При $t_{откл}/T_а = 0{,}1/0{,}05 = 2$ по графику рисунка 3 находим $\lambda = 1{,}5$, тогда $p = \lambda \dfrac{\left(I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq} =$

$= 1{,}5 \dfrac{10^2 \cdot 0{,}1}{4 \cdot 13} = 0{,}29 \dfrac{\text{кА}^2 \cdot \text{с}}{\text{Н}} < 0{,}4 \dfrac{\text{кА}^2 \cdot \text{с}}{\text{Н}}$, поэтому расчет смещений проводников не нужен.

Пример 1а. Произведем расчет смещений проводников этой же линии 110 кВ для случая, когда расчетная продолжительность КЗ составит $t_{откл} = 0{,}3$ с.

В этом случае $t_{откл}/T_a = 0{,}3/0{,}05 = 6$, по графику рисунка 3 находим $\lambda = 1$, тогда $p = \lambda\dfrac{\left(I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq} = 1{,}0\dfrac{10^2 \cdot 0{,}3}{4 \cdot 13} =$

$= 0{,}58\ \dfrac{кА^2 \cdot с}{Н} > 0{,}4\ \dfrac{кА^2 \cdot с}{Н}$, в этом случае расчет смещений проводников необходим.

Вычисляем параметры, необходимые для определения смещений: $L = 2f/3 = 2 \cdot 11{,}5/3 = 7{,}67$ м, $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{g}{L}} = \sqrt{\dfrac{9{,}81}{7{,}67}} = 1{,}13\ \dfrac{1}{с}$

По формуле (3) $F_{расч}^{(2)} = k_1\dfrac{l\left(\sqrt{2}I_{п0}^{(2)}\right)^2\lambda}{a} = 0{,}1\dfrac{200\left(\sqrt{2}\cdot 10\right)^2\cdot 1}{4} = 1000$ Н,

поэтому предельная продолжительность КЗ составляет

$$t_{пред} = \sqrt{\frac{0{,}9 \cdot M_{пр} g}{\omega_0^2 \cdot F_{расч}^{(2)}}} = \sqrt{\frac{0{,}9 \cdot 265{,}2 \cdot 9{,}81}{1{,}13^2 \cdot 1000}} = 1{,}336\ с.$$

Поскольку $t_{откл} = 0{,}3$ с $< t_{пред} = 1{,}336$ с, расчет смещений проводников можно вести по формуле (4):

$$s = k_2\sqrt{g f}\,\frac{\lambda\left(\sqrt{2}\,I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq} = 0{,}123\cdot\sqrt{9{,}81\cdot 11{,}5}\,\frac{1\cdot\left(\sqrt{2}\cdot 10\right)^2\cdot 0{,}3}{4\cdot 13} = 1{,}5\ м.$$

Минимальное расстояние между проводниками при их колебаниях после отключения тока КЗ $a_{min} = a - 2y_{max} = a - 2s = 4 - 2 \cdot 1{,}5 = 1{,}0$ м. Оно больше минимального расстояния, допускаемого ПУЭ: для линий напряжением 110 кВ ПУЭ (см. п. 2.5.73) установлено наименьшее расстояние между фазами по рабочему напряжению в 0,45 м. Следовательно в данном примере опасных сближений проводников не будет.

Пример 1б. Пусть теперь расчетная продолжительность КЗ составит $t_{откл} = 2$ с.

В этом случае $t_{откл}/T_a = 2/0{,}05 = 40$, по графику рисунка 3 находим $\lambda = 1$, тогда $p = \lambda \frac{\left(I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq} = 1{,}0 \frac{10^2 \cdot 2}{4 \cdot 13} =$

$= 7{,}69 \frac{кА^2 \cdot с}{Н} > 0{,}4 \frac{кА^2 \cdot с}{Н}$, $F_{расч}^{(2)} = 1000$ Н. Находим

$$t_{пред} = \sqrt{\frac{0{,}9 \cdot M_{пр} g}{\omega_0^2 \cdot F_{расч}^{(2)}}} = \sqrt{\frac{0{,}9 \cdot 265{,}2 \cdot 9{,}81}{1{,}13^2 \cdot 1000}} = 1{,}36 \text{ с}.$$

Поскольку $t_{пред} = 1{,}36$ с $< t_{откл} = 2$ с $< 0{,}6\ (2\pi/\omega_0) = 3{,}33$ с, расчет смещений проводников следует вести по формуле (5).

Вычисляем нужные для расчета соотношения:

$$\tau_{откл} = \frac{\omega_0}{2\pi} t_{откл} = \frac{1{,}13}{2\pi} \cdot 2 = 0{,}36;\ 2\,L/a = 2 \cdot 7{,}67/4 = 3{,}84;$$

$$\frac{F_{расч}^{(2)}}{Mg} = \frac{1000}{265{,}2 \cdot 9{,}81} = 0{,}397$$

По графикам рисунка 5 при $2\,L/a = 3{,}84$, $\frac{F_{расч}^{(2)}}{Mg} = 0{,}397$ и $\tau_{откл} = 0{,}36$ находим $\Delta W_к/Mg\,L = 0{,}1$.

Максимальный угол отклонения расчетного маятника в соответствии с формулой (6) $\alpha_{max} = \arccos(1 - \Delta W_к/Mg\,L) = \arccos(1 - 0{,}1) = 0{,}45$ рад. и смещение проводника $s = f \sin \alpha_{max} = 11{,}5 \cdot \sin 0{,}45 = 11{,}5 \cdot 0{,}43 = 4{,}94$ м. При этом $a_{min} = a - 2y_{max} = a - 2s = 4 - 2 \cdot 4{,}94 = -5{,}88$ м, т.е. проводники могут схлестываться.

Пример 1в. Рассмотрим случай, когда начальное значение тока двухфазного КЗ составляет 6 кА, а расчетная продолжительность КЗ равна $t_{откл} = 4$ с.

В этом случае $t_{откл}/T_a = 4/0,05 = 80$, по графику рисунка 3 находим $\lambda = 1$, тогда

$$p = \lambda \frac{\left(I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq} = 1,0 \frac{6^2 \cdot 4}{4 \cdot 13} = 2,76 \frac{кА^2 \cdot с}{Н} > 0,4 \frac{кА^2 \cdot с}{Н},$$ а

$$F_{расч}^{(2)} = k_1 \frac{l\left(\sqrt{2}\, I_{п0}^{(2)}\right)^2 \lambda}{a} = 0,1 \frac{200\left(\sqrt{2} \cdot 6\right)^2 \cdot 1}{4} = 360 \text{ Н}.$$

Поскольку $t_{откл} = 4$ с $> 0,6\ (2\pi/\omega_0) = 3,33$ с, расчет смещений проводников следует вести по формуле (5), а значение $\Delta W_к$ определять по формуле (7).

Вычисляем нужные для расчета соотношения:

$$0,5 F_{расч}^{(2)} a \ln \frac{a + 2L}{a} = 0,5 \cdot 360 \cdot 4 \ln \frac{4 + 2 \cdot 7,67}{4} = 1134,6 \text{ Дж},$$

$MgL = 265,2 \cdot 9,81 \cdot 7,67 = 19954$ Дж. Поскольку $0,5 F_{расч}^{(2)} a \ln \frac{a + 2L}{a} = 1134,6$ Дж $< MgL = 19954$ Дж, то энергия $\Delta W_к$, накопленная одним проводником при КЗ, равна $\Delta W_к = Mgh$.

Высоту подъема провода во время КЗ h определяем по графику рисунка 5. При $L/a = 7,67/4 = 1,92$ и $\frac{F_0^{(2)}}{Mg} = \frac{F_{расч}^{(2)}/\lambda}{Mg} = \frac{360/1}{265,2 \cdot 9,81} = 0,138$ отношение h/a составит 0,04, поэтому $h = 0,04 \cdot a = 0,04 \cdot 4 = 0,16$ м и $\Delta W_к = 265,2 \cdot 9,81 \cdot 0,16 = 416$ Дж. Так как $\Delta W_к / MgL = 416/19954 = 0,02 < 1$, то значение максимального отклонения $\alpha_{max} = \arccos(1 - \Delta W_к / MgL) = \arccos(1 - 416/19954) = 0,204$ рад. При этом смещение проводников $s = f \sin \alpha_{max} = 7,67 \sin 0,204 = 1,55$ м.

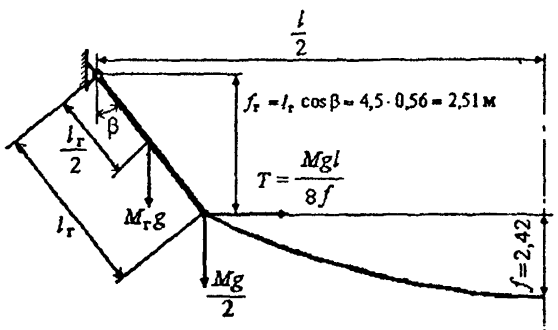
Минимальное расстояние между проводниками при их колебаниях после отключения тока КЗ составит $a_{min} = a - 2y_{max} = a - 2s = 4 - 2 \cdot 1,55 = 0,9$ м. Оно больше минимального расстояния, допускаемого ПУЭ, поэтому опасных сближений проводников не будет.

Пример 2. Распределительное устройство напряжением 330 кВ

Исходные данные:

длина пролета ..... $l = 52$ м,
стрела провеса в середине пролета ..... $f = 2{,}42$ м,
расстояние между фазами ..... $a = 6$ м,
гирлянды натяжные, длина гирлянды ..... $l_г = 4{,}5$ м,
постоянная времени ..... $T_а = 0{,}05$ с,
погонная масса проводника ..... $m_{пог} = 1{,}6$ кг/м,
масса гирлянды ..... $M_г = 110$ кг,
начальное значение тока двухфазного КЗ $I_{п0}^{(2)} = 20$ кА,
расчетная продолжительность КЗ ..... $t_{откл} = 0{,}2$ с.

Вычисляем провес гирлянд $f_г$, рассматривая уравнения статики; результаты вычислений представлены на рисунке Б.1. Приведенная стрела провеса в середине пролета $f_{пр} = f + f_г = 2{,}42 + 2{,}51 = 4{,}93$ м.



$$\beta = \operatorname{arctg}\left[\frac{l}{4f\left(M_г/M + 1\right)}\right] = \operatorname{arctg}\left[\frac{52}{4 \cdot 2{,}42\left(2 \cdot 110/1{,}6 \cdot 52 + 1\right)}\right] = 0{,}98 \text{ рад}$$

$$\cos\beta = 0{,}56$$

Рисунок Б.1 – К определению максимального расстояния между проводниками РУ 330 кВ

Определяем массу проводника $M = m_{пог} l = 1{,}6 \cdot 52 = 83{,}2$ кг, а также $f_г/f = 2{,}51/2{,}42 = 1{,}04$ и $2M_г/M = 2 \cdot 110/83{,}2 = 0{,}264$ и по таблице 1 путем интерполяции находим коэффициент приведения массы $\gamma = 1{,}4$. При этом приведенная масса проводника $M_{пр} = M\gamma = 83{,}2 \cdot 1{,}4 = 116{,}5$ кг, а приведенная погонная сила тяжести $q_{пр} = M_{пр}\, g/l = 116{,}5 \cdot 9{,}81/52 = 21{,}9$ Н/м. В дальнейшем расчете в соответствующие формулы вместо q, M и f подставляем приведенные параметры $q_{пр}$, $M_{пр}$ и $f_{пр}$.

При $t_{откл}/T_а = 0{,}2/0{,}05 = 4$ по графику рисунка 3 находим $\lambda = 1{,}22$, тогда $p = \lambda \dfrac{\left(I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq} = 1{,}22 \dfrac{20^2 \cdot 0{,}2}{6 \cdot 21{,}9} = 0{,}74 \dfrac{кА^2 \cdot с}{Н} > 0{,}4 \dfrac{кА^2 \cdot с}{Н}$, поэтому расчет смещений проводников необходим.

Вычисляем параметры, необходимые для определения смещений: $L = 2f/3 = 2 \cdot 4{,}93/3 = 3{,}29$ м, $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{g}{L}} = \sqrt{\dfrac{9{,}81}{3{,}29}} = 1{,}73 \ \dfrac{1}{с}$.

По формуле (3) $F_{расч}^{(2)} = k_1 \dfrac{l\left(\sqrt{2}\, I_{п0}^{(2)}\right)^2 \lambda}{a} = 0{,}1 \dfrac{52\left(\sqrt{2} \cdot 20\right)^2 \cdot 1{,}22}{6} = 845{,}5$ Н, поэтому предельная продолжительность КЗ составляет $t_{пред} = \sqrt{\dfrac{0{,}9 \cdot M_{пр} g}{\omega_0^2 \cdot F_{расч}^{(2)}}} = \sqrt{\dfrac{0{,}9 \cdot 116{,}5 \cdot 9{,}81}{1{,}73^2 \cdot 845{,}5}} = 0{,}64$ с.

Поскольку $t_{откл} = 0{,}2$ с $< t_{пред} = 0{,}64$ с, расчет смещений проводников можно вести по формуле (4):

$$s = k_2 \sqrt{gf}\, \frac{\lambda\left(\sqrt{2}\, I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq} = 0{,}123 \cdot \sqrt{9{,}81 \cdot 4{,}93}\, \frac{1{,}22 \cdot \left(\sqrt{2} \cdot 20\right)^2 \cdot 0{,}2}{6 \cdot 21{,}9} = 1{,}27 \text{ м}.$$

Минимальное расстояние между проводниками при их колебаниях после отключения тока КЗ $a_{min} = a - 2y_{max} = a - 2s = 6 - 2 \cdot 1{,}27 = 3{,}46$ м. Оно больше минимального расстояния, допускаемого ПУЭ: для линий напряжением 330 кВ ПУЭ (см. п. 2.5.73) установлено наименьшее расстояние между фазами по рабочему напряжению в 1,4 м. Следовательно, в данном примере опасных сближений проводников не будет.

Пример 2а. Рассмотрим случай, когда расчетная продолжительность КЗ составляет $t_{откл} = 2$ с.

В этом случае $t_{откл}/T_a = 2/0{,}05 = 40$, по графику рисунка 3 находим $\lambda = 1$, тогда

$$p = \lambda \frac{\left(I_{п0}^{(2)}\right)^2 t_{откл}}{aq} = 1{,}0 \frac{20^2 \cdot 2}{6 \cdot 21{,}9} = 6{,}08 \frac{кА^2 \cdot с}{Н} > 0{,}4 \frac{кА^2 \cdot с}{Н}.$$

Находим $F_{расч}^{(2)} = k_l \frac{l\left(\sqrt{2}\, I_{п0}^{(2)}\right)^2 \lambda}{a} = 0{,}1 \frac{52\left(\sqrt{2} \cdot 20\right)^2 \cdot 1}{6} = 693$ Н

и $t_{пред} = \sqrt{\frac{0{,}9 \cdot M_{пр} g}{\omega_0^2 \cdot F_{расч}^{(2)}}} = \sqrt{\frac{0{,}9 \cdot 116{,}5 \cdot 9{,}81}{1{,}73^2 \cdot 693}} = 0{,}7$ с.

Поскольку $t_{пред} = 0{,}7$ с $< t_{откл} = 2$ с $< 0{,}6\,(2\pi/\omega_0) = 2{,}178$ с, расчет смещений проводников следует вести по формуле (5).

Вычисляем нужные для расчета соотношения:

$$\tau_{откл} = \frac{\omega_0}{2\pi} t_{откл} = \frac{1{,}73}{2\pi} \cdot 2 = 0{,}55;\ 2\,L/a = 2 \cdot 3{,}29/6 = 1{,}1;$$

$$\frac{F_{расч}^{(2)}}{Mg} = \frac{693}{116{,}5 \cdot 9{,}81} = 0{,}61.$$

По графикам рисунка 5 при $2\,L/a = 1{,}1$, $\frac{F_{расч}^{(2)}}{Mg} = 0{,}61$ и $\tau_{откл} = 0{,}55$ находим $\Delta W_к/Mg\,L = 0{,}25$.

Максимальный угол отклонения расчетного маятника в соответствии с формулой (6) $\alpha_{max} = \arccos(1 - \Delta W_к / Mg\,L) = \arccos(1 - 0{,}25) = 0{,}72$ рад. и смещение проводника $s = f \sin \alpha_{max} = 4{,}93 \cdot \sin 0{,}72 = 4{,}93 \cdot 0{,}43 = 3{,}25$ м. При этом $a_{min} = a - 2y_{max} = a - 2s = 6 - 2 \cdot 3{,}25 = -0{,}5$ м, т.е. проводники могут схлестываться.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие положения. Назначение и область применения 3
2 Вопросы теории 4
2.1 Модели проводников 4
2.2 Физические законы и зависимости, используемые в работе 4
3 Инженерная методика МЭИ 5
3.1 Расчетные условия 5
3.1.1 Общие расчетные условия 5
3.1.2 Расчетные зоны динамики проводников 5
3.1.3 Баланс сил в расчетных зонах 7
3.1.4 Принятые допущения 8
4 Методика расчета 8
5 Определение максимального смещения и максимального сближения проводников при КЗ 17
6 Рекомендации 17
Приложение А База данных ВЛ 18
Приложение Б Примеры расчетов по инженерной методике МЭИ 26

Подписано к печати 20.03.2003
Печать ризография Усл.печ.л. 2,2 Уч.-изд. л. 2,3 Тираж 200 экз.
Заказ № 491 Издат. № 03-51

Лицензия № 040998 от 27.08.99 г.

Производственная служба передового опыта эксплуатации
энергопредприятий ОРГРЭС
107023, Москва, Семеновский пер., д. 15

gost.e-ecolog.ru