

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
по расчету электродинамической
стойкости токоведущих конструкций
распределительных устройств
и линий электропередачи

ГЛАВА 1
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Настоящие Методические рекомендации определяют порядок расчета электродинамической стойкости токоведущих конструкций распределительных устройств (далее – РУ) и линий электропередачи (далее – ЛЭП) с учетом ввода в эксплуатацию новых генерирующих источников и роста уровня токов короткого замыкания (далее – КЗ).

Настоящие Методические рекомендации носят рекомендательный характер и разработаны в целях обеспечения единых методологических подходов по определению основных параметров гибких проводников и их опорно-изолирующих конструкций при воздействии токов КЗ.

2. После ввода в эксплуатацию новых генерирующих источников неизбежно растут расчетные токи КЗ в узлах объединенной энергетической системы Республики Беларусь. Наиболее сильно это проявляется в узлах, расположенных ближе к новым генерирующим источникам. Также на рост уровня токов КЗ влияет появление новых ЛЭП, которые создают новые ветви для протекания тока КЗ.

3. Расчеты электродинамического действия КЗ производятся в соответствии с ГОСТ 30323-95 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания» (далее – ГОСТ 30323-95).

4. В качестве расчетного вида КЗ при проверке гибких проводников по условию их допустимого сближения во время КЗ следует принимать трех- или двухфазное, в зависимости от того, какое из них приводит к большему сближению проводников.

5. В качестве расчетной точки КЗ следует принимать такую точку на расчетной схеме, при КЗ в которой проводник или электрический аппарат подвергается наибольшему электродинамическому или термическому воздействию. При электродинамическом расчете гибких проводников РУ и ЛЭП вероятными точками КЗ могут рассматриваться точки на отходящей линии, на выводах трансформатора, ошиновке РУ и др. Ток КЗ может

протекать по проводам линейного или шинного пролета, по отпайкам присоединений.

6. С выбором расчетной точки КЗ тесно увязаны особенности конструкции пролета, по которому протекает ток КЗ. Типовые конструкции РУ предполагают пролеты с разным количеством отпайк к электрическим аппаратам (или без них), а наличие отпайк в пролете существенно влияет на движение гибких проводников, а соответственно и на возможность их сближения.

7. Расчетные климатические условия выбираются в соответствии с п. 5.3.5 ТКП 339-2022 «Электроустановки на напряжение до 750 кВ линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний».

ГЛАВА 2

ВИДЫ МЕТОДИК РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

8. Методики проверки токоведущих конструкций РУ и ЛЭП на электродинамическую стойкость при КЗ можно разделить на две группы:

1) упрощенные, не учитывающие механических характеристик гибких проводников или учитывающие их приближенно;

2) методы, наиболее полно учитывающие характеристики гибких проводников и опорно-изолирующих конструкций (Advanced Methods – передовые методы), которые реализуются в компьютерных программах и также могут называться численными методами.

ГЛАВА 3

УПРОЩЕННЫЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

9. Рекомендуемая ГОСТ 30323-95 методика расчета гибких токопроводов на электродинамическую стойкость основана на упрощенном представлении провода в виде физического маятника. Оценка электродинамической стойкости гибких проводников производится по следующим критериям:

$$S_{\max} \leq S_{\text{доп}},$$

$$T_{\max} \leq T_{\text{доп}},$$

где $S_{\max}$, $T_{\max}$, $S_{\text{доп}}$, $T_{\text{доп}}$ – соответственно максимальные расчетные и допустимые отклонения и тяжения гибких проводов при КЗ.

Максимальное возможное тяжение в гибких проводниках определяется по выражению:

$$F_{\max f} = \sqrt{2Es \frac{\Delta W_p}{l} + F_{st}^2},$$

где s – площадь поперечного сечения проводника, м^2 ;

E – модуль упругости проводника, Н/м^2 ;

F_{st} – начальное (статическое) тяжение в проводнике до КЗ, Н ;

l – длина проводника в пролете, м ;

ΔW_p – расчетная энергия, Дж .

Расчетная энергия определяется исходя из величины кинетической энергии провода-маятника ΔW_k , накопленной за расчетное время КЗ.

Максимальное горизонтальное отклонение провода определяется по формуле

$$s_{\max} = f_0 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\Delta W_k}{Mgl}\right)^2}, \quad \text{при } \frac{\Delta W_k}{Mgl} < 1,$$

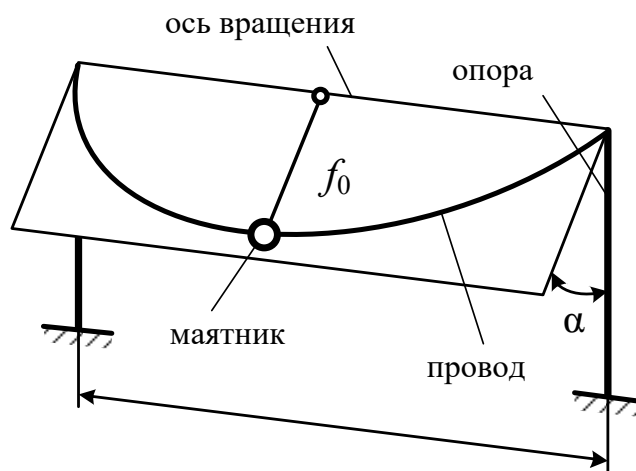
$$s_{\max} = f_0, \quad \text{при } \frac{\Delta W_k}{Mgl} \geq 1,$$

где f_0 – начальная стрела провеса (провес) провода в пролете, м ;

M – масса провода в пролете, кг ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Выражения максимально горизонтального отклонения провода описывают движение маятника, которым в расчете является провод. Масса маятника равна суммарной массе провода и гирлянд изоляторов в пролете, которая сосредоточена в точке его наибольшего провеса, и под действием приложенных электродинамических усилий может вращаться вокруг оси, проходящей через точки крепления провода на опорных конструкциях (рисунок 1). Таким образом, максимальное отклонение провода $s_{\max}$ не превысит начальной стрелы провеса f_0 . Отклонение $s_{\max}$ будет наблюдаться при отклонении плоскости провода на угол $\alpha \geq 90^\circ$. При наиболее сильном электродинамическом воздействии провод-маятник переходит к круговой траектории движения.

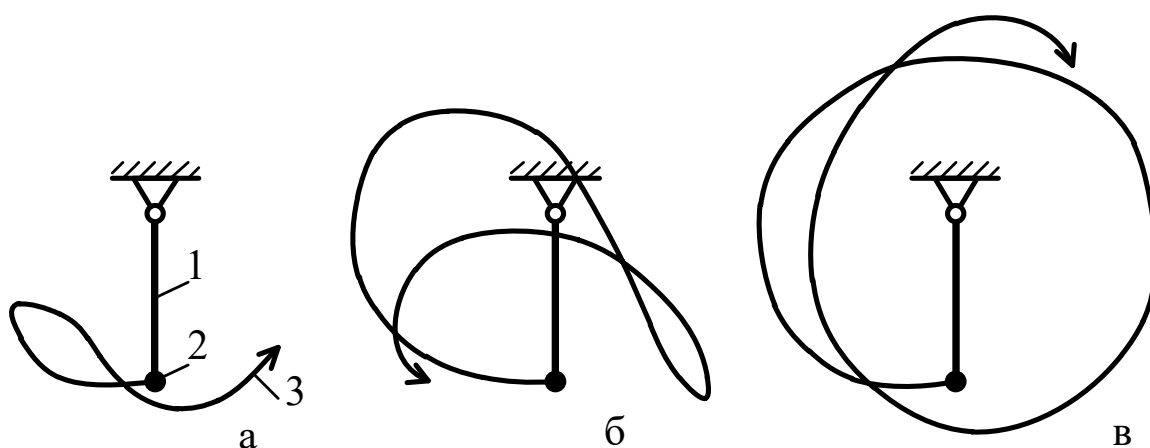


α – угол отклонения плоскости провода

Рисунок 1 – Отклонение провода в пролете

10. Упрощенная методика расчета гибких токопроводов на электродинамическую стойкость не учитывает изменение формы провода в пролете, которая может отличаться от параболической как на рисунке 1, например, из-за растяжения провода. Предварительные оценки тяжений в проводниках и смещений проводников допускается делать на основе закона сохранения энергии без учета расщепления проводников.

11. Характерные траектории движения средней точки провода в пролете имеют вид, представленный на рисунке 2.



1 – статическое положение провода; 2 – средняя точка провода;
3 – траектория движения средней точки

Рисунок 2 – Типичные траектории движения средней точки провода
(разрез перпендикулярно пролету)

То, по какой траектории будет двигаться провод, зависит от степени электродинамического воздействия. При самом малом воздействии траектория движения средней точки напоминает маятниковую (рисунок 2а), при среднем провод достигнув своего наивысшего положения практически отвесно падает вниз (рисунок 2б) и при самом сильном воздействии переходит на круговую траекторию (рисунок 2в). После отключения КЗ колебания провода начинают затухать, поэтому наибольшие отклонения наблюдаются в первый период колебаний.

Максимальные отклонения $s_{\max}$ могут как превысить расчетные величины, так и быть ниже их.

12. При использовании метода физического маятника (методика СИГРЭ) можно учесть изменение формы провода в пролете путем введения поправочных коэффициентов:

$$s_{\max} = \begin{cases} c_d c_f f_0, & \text{при } \alpha_{\max} \geq 90^\circ; \\ c_d c_f f_0 \sin \alpha_{\max}, & \text{при } \alpha_{\max} < 90^\circ, \end{cases}$$

где $\alpha_{\max}$ – максимальный угол отклонения плоскости провода от начального положения;

c_d и c_f – поправочные коэффициенты.

Коэффициент c_d характеризует удлинение провода в пролете в результате нагрева от протекания тока КЗ и растяжения под воздействием электродинамических усилий. Коэффициент c_f учитывает изменение формы провода при его движении во время КЗ. Среднее значение c_f :

$$c_f = \begin{cases} 1,05, & \text{при } r \leq 0,8; \\ 0,97 + 0,1r, & \text{при } 0,8 < r < 1,8; \\ 1,15, & \text{при } r \geq 1,8, \end{cases}$$

где r – это отношение электромагнитных сил, отнесенных на единицу длины, к весу на единицу длины.

Точно коэффициент c_f может быть найден только с использованием компьютерных программ для каждого конкретного пролета.

ГЛАВА 4

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

13. Разработка компьютерных алгоритмов расчета динамики гибких проводников предусматривает представление провода в качестве гибкой упругой нити (рисунок 3). Уравнения нити имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(T \frac{\partial \bar{R}}{\partial s} \right) + \bar{P} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2},$$

где $\bar{R}$ – радиус-вектор произвольной точки провода в пролете, м;

s – дуговая координата данной точки, м;

$\bar{P}$ – вектор распределенной внешней нагрузки на единицу длины провода (весовая, гололедная, ветровая и другие нагрузки), Н/м;

T – модуль тяжения, Н;

t – время, с;

ρ – масса единицы длины провода с учетом его растяжения, кг/м.

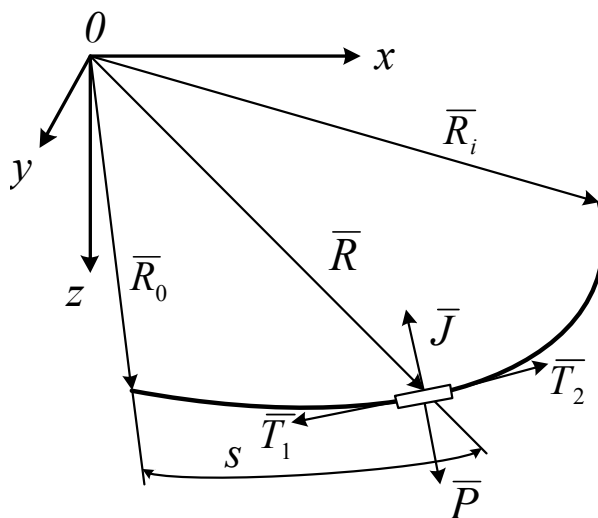


Рисунок 3

В проекциях на оси координат получаются векторно-параметрические уравнения движения гибких проводников следующего вида:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} &= \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial x}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial x}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial y}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial x}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial z}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_x^*, \\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= b^2 \frac{\partial y}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial x}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial y}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial y}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial z}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_y^*, \\ \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= b^2 \frac{\partial z}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial x}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial z}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial y}{\partial s_0} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial z}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_z^*,\end{aligned}$$

где

$$\lambda^2 = \frac{T}{\rho_0(1+e)}; \quad b^2 = \frac{a^2 - \lambda^2}{(1+e)^2}; \quad a^2 = \frac{1}{\rho_0 \alpha_y (1 + \alpha_t \vartheta)},$$

где e – относительное удлинение единичного элемента провода в результате растяжения и нагрева;

ρ_0 – масса единицы длины провода до растяжения, кг/м;

α_y – коэффициент упругого удлинения провода;

α_t – коэффициент температурного удлинения;

ϑ – текущая температура провода, °C;

P^* – распределенная внешняя нагрузка на единицу массы провода, Н/кг;

∂s_0 – длина элемента провода до растяжения и нагрева, м;

x, y и z – проекции радиус-вектора $\bar{R}$ на оси координат, м.

ГЛАВА 5

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ АППАРАТОВ И ИЗОЛЯТОРОВ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

14. При расчете механической прочности опорных изоляторов, силовых выключателей, измерительных трансформаторов тока и напряжения учитывается лишь их статическое нагружение, обусловленное тяжениями проводов (спусков) и собственным весом аппаратов. Максимальная нагрузка, передающаяся от проводников на аппараты при трехфазном КЗ согласно методике ГОСТ 30323-95, определяется по формуле:

$$F_{из}^{(3)} = \beta F_{max}^{(3)} \eta,$$

где $F_{max}^{(3)}$ – максимальная сила (эквивалентная равномерно распределенной по длине пролета нагрузке), действующая в трехфазной системе проводников на расчетную фазу при трехфазном КЗ, Н;

β – коэффициент, зависящий от условия закрепления проводников, а также числа пролетов конструкции;

η – коэффициент динамической нагрузки, зависящий от расчетной основной частоты собственных колебаний шины f_1 .

Расчетную частоту собственных колебаний шины f_1 следует определять по выражению:

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}},$$

где EJ – изгибная жесткость аппарата, Н·м²;

m – масса шины на единицу длины, кг/м;

r_1 – параметр основной частоты собственных колебаний шины.

При этом параметр r_1 является функцией безразмерных величин $\frac{c_{\text{оп}} l^3}{EJ}$ и $\frac{M}{mL}$, где $c_{\text{оп}}$ – жесткость опоры, L – длина шины, а M – приведенная масса.

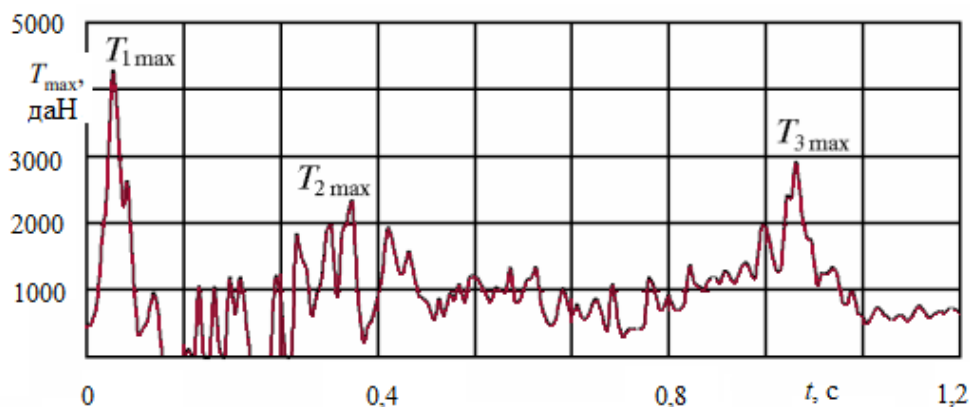
Значение приведенной массы M в килограммах определяется по формуле:

$$M = \frac{c_{\text{оп}}}{(2\pi f_{\text{оп}})^2},$$

где $c_{\text{оп}}$ – жесткость опоры, практически равная жесткости аппарата, Н/м;

$f_{\text{оп}}$ – частота собственных колебаний опоры, равная частоте колебаний аппарата, Гц.

15. На провода и подстанционные аппараты при КЗ действуют динамические усилия с широким спектром частот (рисунок 4) длительностью всего 0,1–1,0 с, после чего отключение КЗ быстродействующими защитными устройствами прекращает влияние указанных нагрузок на конструктивные элементы РУ.



$T_{1\text{max}}$, $T_{2\text{max}}$, $T_{3\text{max}}$ – первый, второй и третий максимумы тяжения соответственно

Рисунок 4 – Пример диаграммы тяжений гибких проводников при КЗ

Действие такой переменной силы вызывает вынужденные изгибающие колебания аппарата как консоли. При этом возможны резонансы составляющих гармоник возмущающей силы с одной из собственных частот изолятора, а учет лишь основной частоты колебаний аппарата $f_{\text{оп}}$ не позволяет

однозначно определять изгибную жесткость аппарата, которая при динамическом характере усилий должна определяться по выражению:

$$EJ = c_{\text{оп}} l^3 \sum_{j=1}^n \frac{1}{k_j^4},$$

где l – длина аппарата;

k_j – параметры собственных частот колебаний аппаратов;

n – количество учитываемых частот собственных колебаний аппарата.

16. При попадании в резонанс амплитуда возмущающей силы не играет определяющей роли, так как даже очень небольшая сила в этом случае может разрушить аппарат. Достоверное определение динамических нагрузок с учетом действующих на электрические аппараты проводников возможно только при совместном решении движения проводников и аппаратов.

17. Для решения указанной задачи подходит метод расчета электродинамической стойкости конструктивных элементов РУ, в котором гибкие проводники вместе с аппаратами рассматриваются как единая колебательная система при КЗ. Для удобства математического описания задачи используется принцип связей механики, в соответствии с которым действия проводов на опорные изоляторы, силовые выключатели и измерительные трансформаторы тока заменяются реакциями связей. После этого рассматриваются затухающие колебания конструктивных элементов под действием приложенных от проводов динамических сил. Гибкие проводники при этом представляются уравнениями из пункта 13.



а – опорный изолятор; б – колонковый выключатель;
в – измерительный трансформатор тока

Рисунок 5 – Характерные примеры конструкций электрических аппаратов

18. Математическое описание электрических аппаратов (рисунок 5) основано на их представлении консольным стержнем, закрепленным в одной точке, к вершине которых приложено динамическое тяжение $\bar{T}$ от провода. Если упрощенно учитывать соединительные фланцы, то можно считать, что указанные упругие стержни имеют равномерно распределенную по высоте массу. При численном моделировании аппаратов стержень может быть разбит на отрезки с разной массой, что позволяет учесть конструктивные особенности трансформатора тока (рисунок 5в).

19. Провода вместе с аппаратами образуют единую колебательную систему. Поэтому математическое описание этой задачи включает в себя уравнения динамики проводов и аппаратов, которые должны решаться совместно.

Действие проводов на аппараты заменяется реакциями связей. Упругая податливость аппаратов обусловлена собственной податливостью, деформациями несущих конструкций, подвижностью болтовых соединений, наличием эластичных прокладок под фланцами и др. Поэтому их жесткость наиболее точно определяется экспериментально и характеризуется коэффициентом $c_{оп}$, равным отношению статической силы, приложенной к вершине аппарата, к соответствующему прогибу. В расчете динамики электрические аппараты напряжением 110 кВ и выше представляются упругим стержнем с равномерно распределенной массой и постоянной жесткостью по длине. Один конец аппарата жестко закреплен, на второй действуют динамические силы, обусловленные тяжениями в проводах. В общем случае на аппараты действуют силы, определяемые по выражению:

$$P_i = \sum_{i=1}^n \bar{T}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где $\bar{T}_i$ – векторы тяжения в точках крепления провода к аппаратам.

$\bar{T}_i$ определяется по следующему выражению:

$$\bar{T}_i = (-1)^{i+1} T_i \left(\frac{d\bar{R}}{ds} \right)_i,$$

где T_i – модули тяжения в точках крепления провода к аппаратам.

Силы, приложенные к аппаратам, могут иметь три составляющие по координатным осям. При определении динамических прогибов изоляторов в разных плоскостях используется принцип независимости действия сил. Под действием динамической силы аппараты совершают вынужденные колебания. Для выбранной расчетной модели вынужденные колебания аппаратов представляются в виде ряда:

$$R_i = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} X_j, \quad i = x, y, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где φ_{ij} – функции времени;

X_j – нормальные функции, соответствующие условиям закрепления на концах колеблющегося стержня.

Для принятой расчетной модели конструктивных элементов открытых распределительных устройств (далее – ОРУ) в виде консоли нормальные функции имеют вид:

$$X_j = \operatorname{ch} k_j z' - \cos k_j z' - \alpha_i (\operatorname{sh} k_j z' - \sin k_j z'),$$

где k_j – параметры собственных частот колебаний аппаратов:

$$k_j = \operatorname{ch} k_j l \cos k_j l = -1,$$

z' – текущая координата по длине аппарата;

$$z' = l - z;$$

α_i – коэффициенты, рассчитываемые по значениям корней частотного уравнения из выражения:

$$\alpha_i = \frac{\cos k_j l + \operatorname{ch} k_j l}{\sin k_j l + \operatorname{sh} k_j l}.$$

Функции времени φ_{ij} определяются из уравнения

$$\frac{d^2 \varphi_{ij}}{dt^2} + \omega_j^2 \varphi_{ij} = \frac{2P_i}{ml} (-1)^{j+1}, \quad i = x, y,$$

где ω_j – угловые частоты последовательных форм колебаний:

$$\omega_j^2 = \frac{EJ}{m} k_j^4,$$

m – масса единицы длины аппарата, кг.

При расчете воздействия проводников на аппараты определяют наибольшие перерезывающие силы и моменты по выражениям:

$$M_{zi} = EJ \frac{d^2 R_i}{dz_i'^2},$$

$$Q_{zi} = EJ \frac{d^3 R_i}{dz_i'^3}.$$

Математическая модель динамики аппаратов проверена по аналитическому решению задачи, полученному для синусоидальной силы. Количество учитываемых в расчете гармоник ряда зависит от принятой погрешности расчета. Для вычисления поперечной силы с погрешностью до 3 % необходимо удерживать не менее 11 гармоник, а для прогибов достаточно удерживать 6 членов ряда.

ГЛАВА 6

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ

20. Одной из наиболее совершенных компьютерных программ для расчета динамики гибких проводников РУ и ЛЭП является программа

«SAMCEF for Power Lines and Substations» Бельгийской лаборатории SAMTECH. S4PL&S – это интегрированная среда для проектирования и анализа электрических сетей, включающая расчет электродинамического действия токов КЗ. Алгоритм численного решения уравнений движения гибких проводников, как и многие другие программные продукты SAMTECH, основан на методе конечных элементов. Программа учитывает гололедные, ветровые и температурные нагрузки. Имеется возможность расчета перемещений проводов и опорных конструкций, реакции связей в опорных точках, выделяемого тепла и т.п. Недостатком такого компьютерного обеспечения является его высокая стоимость и неприспособленность к нуждам отечественного пользователя.

21. На основе разработанной математической модели составлен алгоритм компьютерного расчета воздействия токов КЗ, протекающих по гибким токоведущим частям, который приведен на рисунке 6.

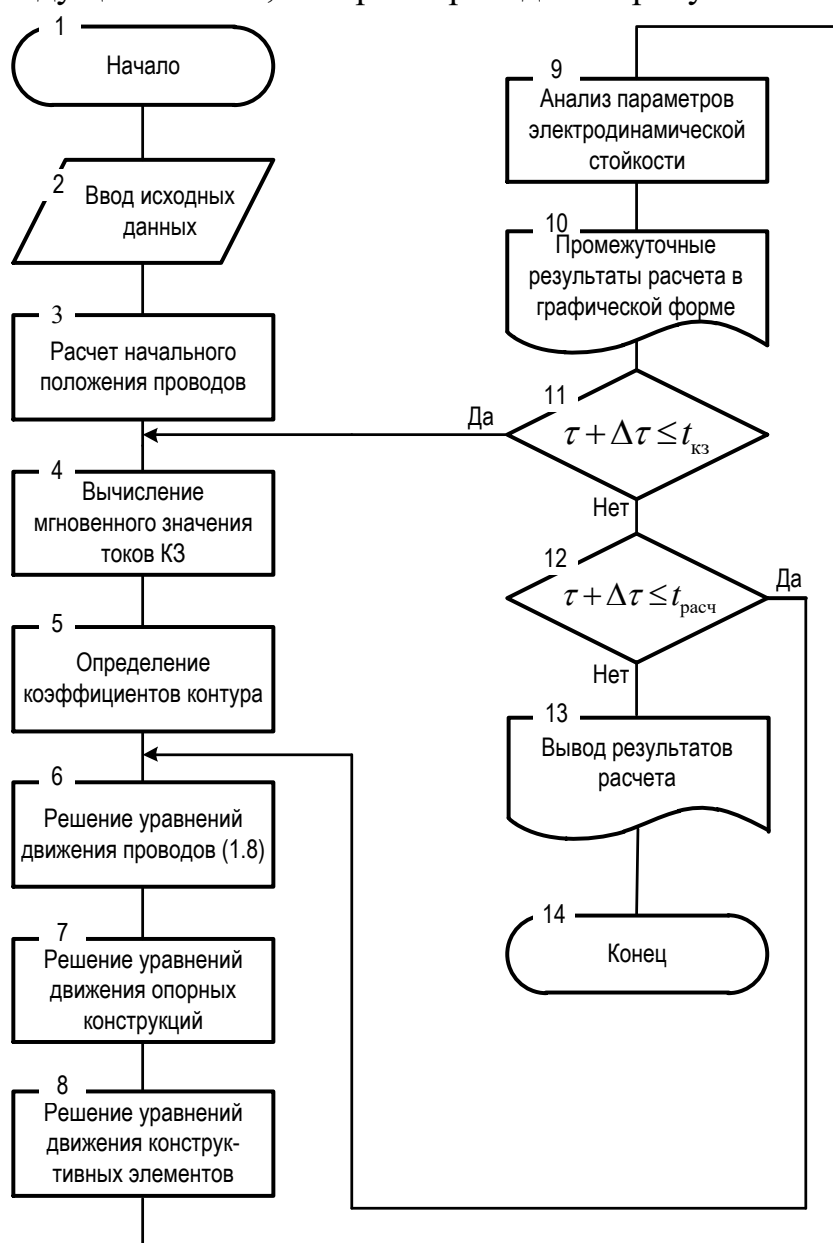


Рисунок 6 – Алгоритм компьютерного расчета

22. На основе указанного алгоритма составлены компьютерные программы по расчету токоведущих конструкций РУ и ЛЭП на электродинамическую стойкость:

компьютерная программа FleBus, адаптированная для РУ с гибкими проводниками;

компьютерная программа LinEDyS+, адаптированная для ЛЭП (рисунок 7).

23. Пролеты РУ имеют меньшую длину, меньшее междуфазное расстояние, подвес проводов осуществляется с помощью натяжных гирлянд изоляторов, в них присутствует большое количество отпаяк к электрическим аппаратам. На ЛЭП используются преимущественно подвесные гирлянды, фазы могут располагаться на разных высотах, протекает только сквозной ток КЗ и т.п. Программы могут быть объединены в одну, но с более громоздким интерфейсом.

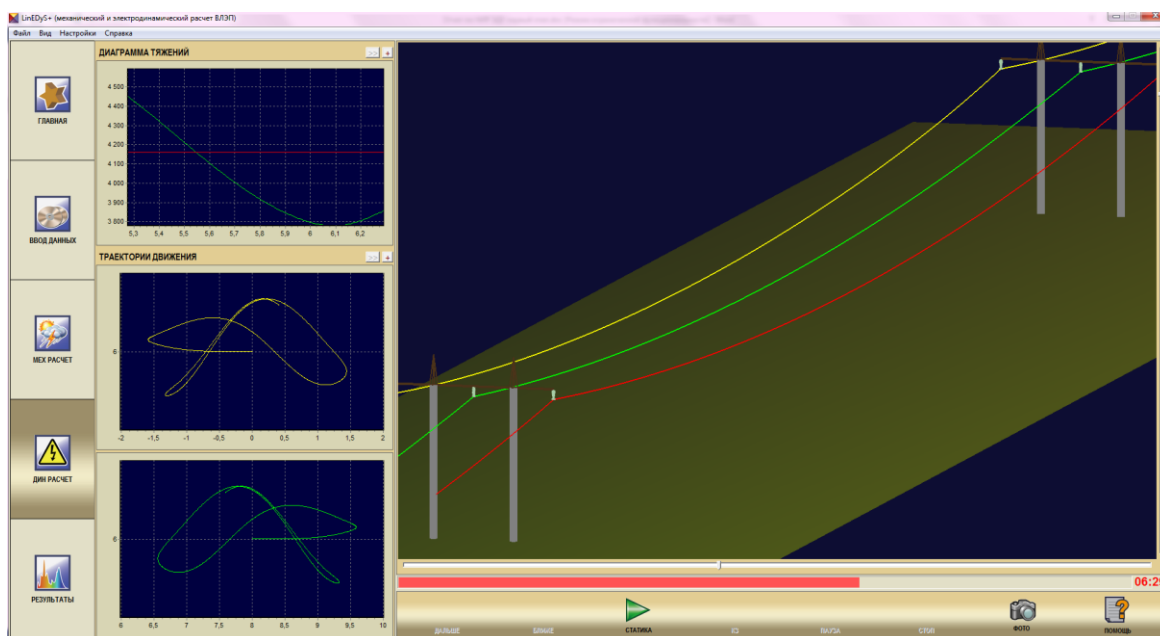


Рисунок 7 – Скриншот компьютерной программы LinEDyS+

24. Компьютерные программы работают в среде Microsoft Windows и каких-либо особых требований к программно-аппаратному обеспечению не предъявляют. Для формирования отчетов необходимо наличие на компьютере Microsoft Word.

25. Расчет производится при двухфазном или трехфазном КЗ с учетом реального расположении гибких проводов, упругого и температурного удлинения под действием гололедных и ветровых нагрузок. В расчете учитываются гирлянды изоляторов, расщепление фазы, отпайки к электрическим аппаратам, внутрифазные и междуфазные распорки.

26. В ходе расчета определяются нагрузки на провода и гирлянды изоляторов; усилия от сборных шин (фазных проводников) и отпаяк на порталы (опоры) и аппараты; колебания порталов и аппаратов под действием приложенных усилий; тяжения в сборных шинах, проводах и отпайках;

траектории движения проводников в любой точке пролета; минимальные расстояния между проводами соседних фаз, а также между сборными шинами и отпайками; максимальные отклонения проводников и другие характеристики. Предусмотрено определение токов электродинамической стойкости для конструкций с гибкими проводниками путем проведения серии расчетов в автоматическом режиме.

27. В программе LinEDyS+ по желанию заказчика может быть встроен блок механического расчета гибких проводников.

ГЛАВА 7 УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

28. Оценка электродинамической стойкости гибких проводников производится по следующим критериям:

$$\begin{aligned} s_{\max} &\leq s_{\text{доп}}, \\ T_{\max} &\leq T_{\text{доп}}, \end{aligned}$$

где $s_{\max}$, $T_{\max}$, $s_{\text{доп}}$, $T_{\text{доп}}$ – соответственно максимальные расчетные и допустимые отклонения и тяжения гибких проводов при КЗ.

29. Учитывая специфику расчетных объектов, для удобства пользования компьютерными программами допустимые отклонения проводников $s_{\text{доп}}$ выражают через минимальные допустимые расстояния между проводниками фаз $A_{\text{ф-ф, доп}}$ и между проводниками и заземленными частями $A_{\text{ф-з, доп}}$, которые определяются как допустимые изоляционные расстояния между проводами и между проводами и элементами опоры (в общем между проводами и любой другой заземленной конструкцией). Такой выбор обусловлен тем, что при недопустимом сближении проводников между собой или с заземленными конструкциями, воздушный промежуток может быть пробит при рабочем напряжении.

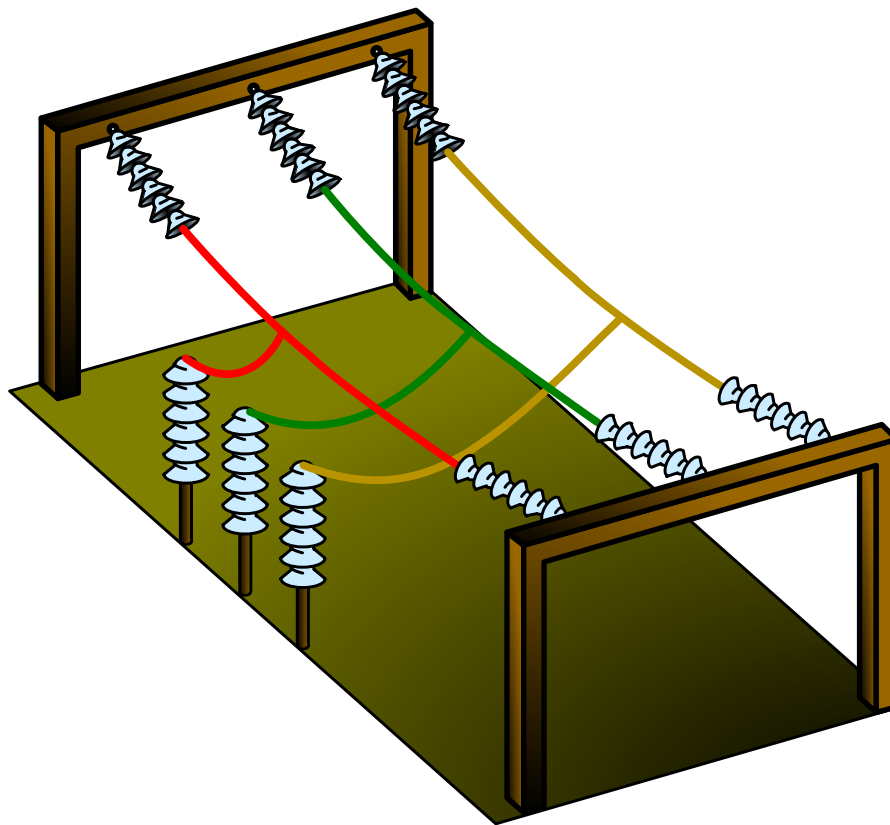
Критерий электродинамической стойкости гибких проводников по допустимым отклонениям запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} A_{\text{ф-ф, min}} &\geq A_{\text{ф-ф, доп}}, \\ A_{\text{ф-з, min}} &\geq A_{\text{ф-з, доп}}, \end{aligned}$$

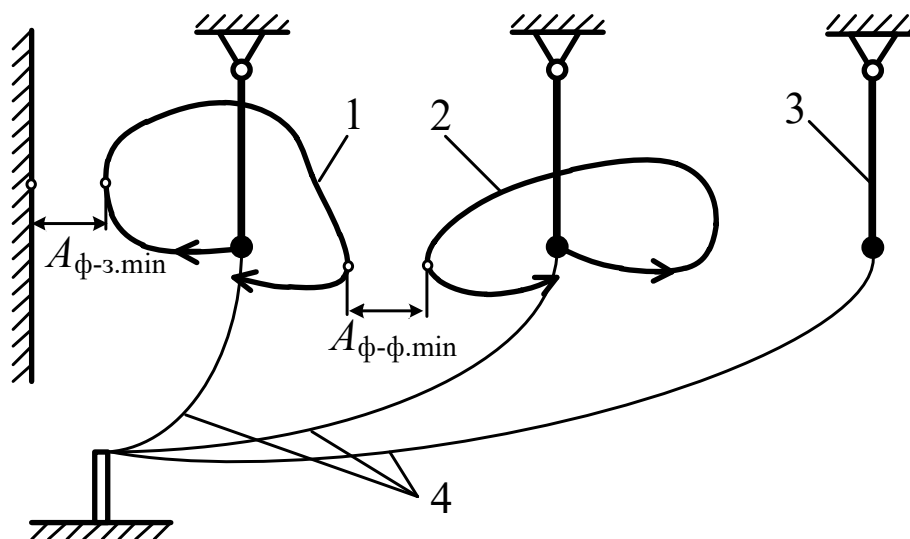
где $A_{\text{ф-ф, min}}$ и $A_{\text{ф-з, min}}$ соответственно минимальные расстояния между проводниками и между проводниками и заземленными конструкциями, определяемые расчетным путем (рисунок 8).

$A_{\text{ф-ф, min}}$ программы определяют автоматически и сравнивают их с $A_{\text{ф-ф, доп}}$.

30. $A_{\text{ф-з, min}}$ может быть определено по траекториям движения проводников (их максимальным отклонениям $s_{\max}$) для каждой конкретной конфигурации пролета и близрасположенных заземленных конструкций. Однако обычно этого не требуется, поскольку $A_{\text{ф-з, доп}}$ задается с большим запасом еще на стадии проектирования, и условие, предусмотренное пунктом 29 настоящих Методических рекомендаций, выполняется автоматически.



а) вид пролета ОРУ с гибкими проводниками



б) расчетная схема пролета ОРУ (вид спереди)

1, 2 – траектории движения средней точки проводов при двухфазном КЗ,
3 – статическое положение провода, 4 – отпайки к электрическим аппаратам
Рисунок 8 – Расчетная схема пролета РУ с гибкими проводниками

31. Допустимые тяжения проводов $T_{\text{доп}}$ к условию, предусмотренному пунктом 28 настоящих Методических рекомендаций, определяются допустимыми механическими напряжениями в них. Допустимое механическое напряжение провода

$$\sigma_{\text{доп}} = N\sigma_{\text{пр}},$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ – предел прочности при растяжении, Н/мм²;

N – коэффициент допустимой нагрузки, равный 35–50 % от предела прочности.

Через допустимое механическое напряжение провода рассчитывается допустимое тяжение провода

$$T_{\text{доп}} = NS\sigma_{\text{пр}},$$

где S – площадь поперечного сечения проводника, мм².

32. Максимальные расчетные тяжения T_{max} могут быть определены с помощью упрощенных методов или по компьютерным программам FleBus и LinEDyS+. В результате компьютерного расчета определяются не только их величины, но и максимальные проекции тяжений на оси координат в точках крепления проводов к опорным конструкциям и аппаратам.

33. Условие, предусмотренное пунктом 29 настоящих Методических рекомендаций, должно последовательно применяться к проводам, гирляндам изоляторов, сцепной арматуре и зажимам. Провода имеют большой предел прочности на растяжение. В зависимости от конструкции и сечения провода максимальное допустимое растягивающее усилие достигает 100 кН и более. Таких же величин достигают минимальные разрушающие нагрузки натяжных и ответвительных зажимов, указанные в каталогах. Разрушающая электромеханическая нагрузка тарельчатых изоляторов в зависимости от их типа может составлять несколько сот килоньютон, что позволяет ограничиться оценкой электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками по допустимому тяжению только применительно к проводам.

34. Более всего электродинамические усилия при КЗ опасны для опорных конструкций и аппаратов РУ, конструктивным элементом которых выступают изоляторы, из-за их недостаточной механической прочности. Максимальные изгибающие нагрузки на изоляторы определяются по формуле:

$$F_{\text{из}} = \beta F_{\text{max}} \eta,$$

где η – коэффициент динамической нагрузки, зависящий от отношения f_1 / f_c , где f_1 – расчетная основная частота собственных колебаний шины, а $f_c = 50$ Гц;

β – коэффициент, зависящий от условий опирания (закрепления) токоведущих частей;

F_{max} – максимальное усилие, действующее на изолятор, Н.

F_{max} определяется натяжением спуска к аппарату, которое в свою очередь зависит от движения сборных шин при КЗ, тянущих спуск за собой. Для конструкции с гибкими проводниками определить F_{max} аналитически не представляется возможным, поэтому целесообразно использование компьютерных программ.

ГЛАВА 8

РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

35. При проверке гибких проводников по условию их допустимого сближения во время КЗ расчетным видом КЗ следует принимать трех- или двухфазное КЗ, в зависимости от того, какое из них приводит к большему сближению проводников.

36. При горизонтальном расположении проводников в пролете для оценки сближения проводников на недопустимое сближение расчетным видом КЗ следует принимать двухфазное.

37. При расположении проводников по треугольнику расчетным видом КЗ может быть либо двухфазное, либо трехфазное, поэтому следует производить расчеты для обоих видов КЗ и по результатам расчетов определять, происходит ли недопустимое сближение проводников.

38. Определение расчетной продолжительности КЗ зависит от объекта расчета. Наибольшей тяжестью электродинамического воздействия характеризуется, как правило, ток КЗ наибольшей продолжительности. При КЗ проводники достигают своего максимального отклонения $s_{\max}$ за время начиная от 0,3–0,5 с и более. Наименьшие значения характерны для коротких пролетов с легким проводом. После достижения $s_{\max}$ провода начинают движение навстречу друг другу, и если КЗ не отключено, то усилия начинают противодействовать движению проводника, уменьшая $A_{\phi-\phi.\min}$. То же самое можно сказать о повторном КЗ в цикле неуспешного автоматического повторного включения (далее – АПВ).

39. При расчете пролетов ОРУ 110 кВ за расчетную следует принимать максимальную возможную продолжительность КЗ, обусловленную действием основных или резервных защит и временем отключения выключателя, но не более 0,3–0,5 с.

40. Для ОРУ 220 кВ и выше, а также для ЛЭП, характеризующихся большой длиной пролетов, расчетная продолжительность КЗ определяется максимальным временем срабатывания защиты с учетом наличия устройств резервирования отказа выключателя (УРОВ) и возможного неуспешного АПВ.

41. При выборе величины расчетного тока КЗ следует учитывать особенности объекта расчета. При расчетах электродинамической стойкости ЛЭП за расчетный следует принимать максимальный расчетный ток КЗ в начале указанной линии. В РУ по разным пролетам могут протекать разные токи КЗ в зависимости от расположения данного пролета в схеме и последовательности подключения присоединений. Наиболее тяжелым расчетным случаем является КЗ в начале отходящей тупиковой линии, тогда по смежным с ней пролетам будет протекать максимальный суммарный ток КЗ.

ГЛАВА 9

РАСЧЕТНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

42. Климатические условия в меньшей степени влияют на результаты электродинамического расчета, чем, например, на результаты механического. Однако, климатические условия, предшествующие КЗ, определяют начальное положение провода. При увеличении температуры увеличивается стрела провеса провода, а соответственно и его максимальные отклонения. При воздействии бокового ветра провода отклоняются от вертикали, что также может повлиять на процесс их сближения.

43. При расчете электродинамической стойкости следует выделить следующие сочетания климатических условий по нормальному режиму работы:

- 1) высшая температура, ветер и гололед отсутствуют;
- 2) максимальная ветровая нагрузка при соответствующей температуре (обычно -5°C).

Режимы с гололедной нагрузкой предлагается не учитывать, поскольку гололед утяжеляет провод и препятствует его движению.

44. Высшая температура, указанная в первом климатическом режиме, является максимальной температурой окружающей среды. Провод же может в длительном режиме иметь более высокую температуру, если находится под нагрузкой. Начальная стрела провеса в режиме перед КЗ, а соответственно и максимальные отклонения проводников определяются именно температурой провода, а не температурой окружающей среды. В качестве расчетной рекомендуется принимать температуру провода при расчетном максимальном токе в нем, но не ниже 40°C . Если такие данные отсутствуют, то допустимо принимать допустимую температуру проводов в процессе эксплуатации. Для провода марки АС, например, это 70°C .

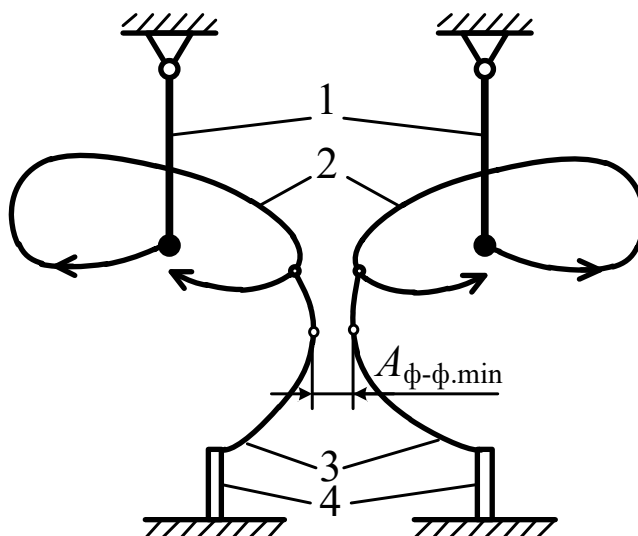
45. В режиме с максимальной ветровой нагрузкой следует принимать, что ветер направлен перпендикулярно пролету. При расчете несимметричного пролета, как например шинный пролет ОРУ на рисунке 8 с боковыми отпайками, рекомендуется проводить расчет с воздействием ветра с обеих сторон пролета, поскольку условия движения всех трех фаз неодинаковы.

ГЛАВА 10

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОЛЕТОВ ОРУ

46. После КЗ на ЛЭП возможно сближение проводников соседних фаз в пролетах. В РУ с гибкими проводниками в отличие от ЛЭП кроме сближения шин возможно также сближение отпайек к электрическим аппаратам между собой и с ошиновкой соседней фазы, причем это может происходить при меньшем значении тока КЗ. Возможные случаи сближения проиллюстрированы на рисунках 9 и 10. Сближение спусков при КЗ характерно для пролетов ячейки ОРУ (рисунок 9), в которых аппараты располагаются под сборными шинами. Сближение спуска с ошиновкой

наблюдаются в шинном пролете ОРУ, где аппараты располагаются сбоку от пролета (рисунок 10).



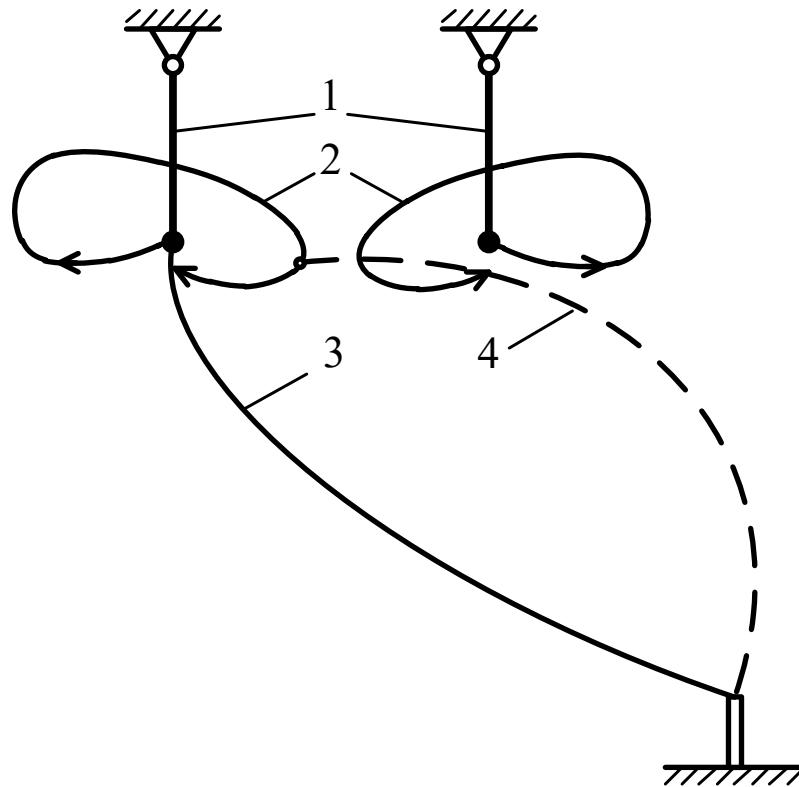
1 – начальное положение сборных шин; 2 – траектории движения шин;
3 – положение спусков в момент их максимального сближения; 4 – аппараты
Рисунок 9 – Сближение спусков в пролете ячейки при двухфазном КЗ

47. Компьютерная программа FleBus в процессе расчета определяет пространственное положение каждой точки проводников сборных шин и отпаяк, поэтому позволяет выявить случаи нарушения электродинамической стойкости с участием отпаяк к электрическим аппаратам.

48. Одной из особенностей пролетов ОРУ в отличие от ЛЭП является возможность протекания разных токов КЗ по участкам пролета, например, если КЗ произошло в цепи присоединения. На рисунке 11 представлена схема пролета с отпайкой к присоединению и возможное распределение тока при КЗ в цепи присоединения.

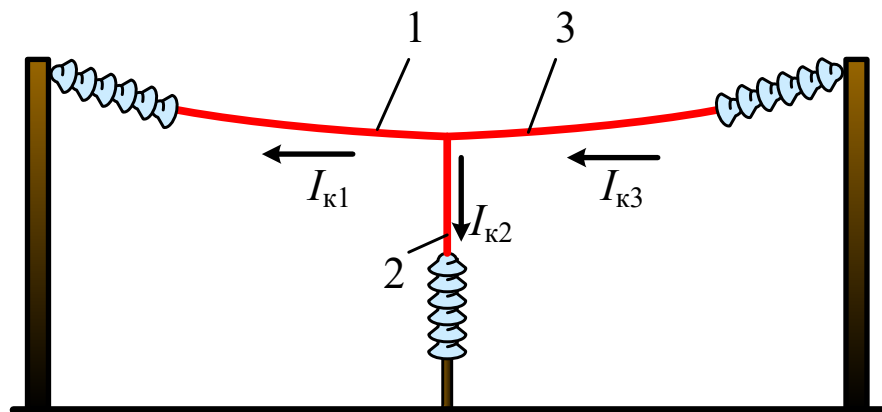
49. Компьютерная программа FleBus позволяет задавать разный ток КЗ на участках ошиновки с учетом до трех отпаяк. Рекомендуется выбирать в ОРУ в качестве расчетного один из пролетов, по которому может протекать суммарный ток сквозного КЗ. По критерию сближения проводников это будет наиболее тяжелый случай.

50. На основании результатов глубоких исследований с проведением многочисленных расчетов для объектов объединенной энергетической системы Республики Беларусь и других стран установлено, что наиболее подвержены электродинамическому воздействию ЛЭП и РУ на напряжение 110 кВ, так как на этом уровне напряжения наблюдаются наибольшие расчетные токи КЗ и наименьшие междофазные расстояния в соответствии с типовыми решениями.



1 – начальное положение сборных шин; 2 – траектории движения шин;
3 – статическое положение спуска; 4 – положение спуска при сближении с шиной

Рисунок 10 – Сближение спуска и шины в шинном пролете
при двухфазном КЗ



1–3 – участки разбиения ошиновки

Рисунок 11 – Распределение тока КЗ по участкам пролета

ГЛАВА 11

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ПО РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

51. Компьютерные программы FleBus и LinEDyS+ снабжены графическим интерфейсом с визуализацией процесса расчета в режиме реального времени (рисунок 7). Процесс расчета сопровождается отображением траекторий движения проводников, диаграмм тяжений и анимацией движения гибких проводников в пролете, что позволяет получить

дополнительную информацию, важную для понимания происходящих процессов. Дополнительные графики можно получить в отдельном окне по окончании расчета.

52. Интерфейс программы интуитивно понятен для пользователя, поскольку навигация и управление соответствуют общепринятым канонам приложений для персонального компьютера. Рабочая область программы разбита на отдельные блоки, каждый из которых структурирован по своему функционалу и открывается в отдельной вкладке.

53. Компьютерные программы снабжены подробной инструкцией пользователя, в которой последовательно рассмотрены все этапы от ввода данных до анализа результатов расчета.

54. Набор исходных данных для электродинамического расчета включает в себя до сотни параметров в зависимости от конфигурации объекта, поэтому подготовка к расчету может представлять определенные трудности для нового пользователя. Для облегчения работы расчетчика к компьютерным программам приложены готовые наборы исходных данных, которые составлены на основе типовых проектов ОРУ разных классов напряжений, существующих ЛЭП и других объектов, для которых производились расчеты. Готовый набор исходных данных подгружается из файлов с расширением **.dat*, после чего он может редактироваться в окнах ввода данных и сохраняться под другим именем.

55. Геометрия пролета может быть достаточно сложной, поэтому пользователю необходимо задать координаты крепления всех проводников на опорных конструкциях. За начало отсчета принимается точка крепления крайней левой фазы на левой опоре согласно чертежу пролета. Остальные точки задаются относительно нее. Ось x направлена по горизонтали вдоль крайней левой фазы, ось y – перпендикулярно оси x в горизонтальной плоскости, ось z – вертикально вниз. Координаты по оси z задаются высотами подвеса проводов.

56. Для расчета задаются начальными стрелами провеса проводов f_0 и начальным тяжением T_0 . Это величины взаимозависимые, поэтому расчет ведется относительно f_0 . Однако, величину T_0 также следует задать в первом приближении, поскольку расчет начального положения проводов ведется итерационными методами.

57. Междофазные распорки обычно используются для ограничения колебаний проводников при пляске или КЗ. При выявлении случаев нарушения электродинамической стойкости распорки можно использовать, как действенный инструмент для предотвращения недопустимых сближений проводников.

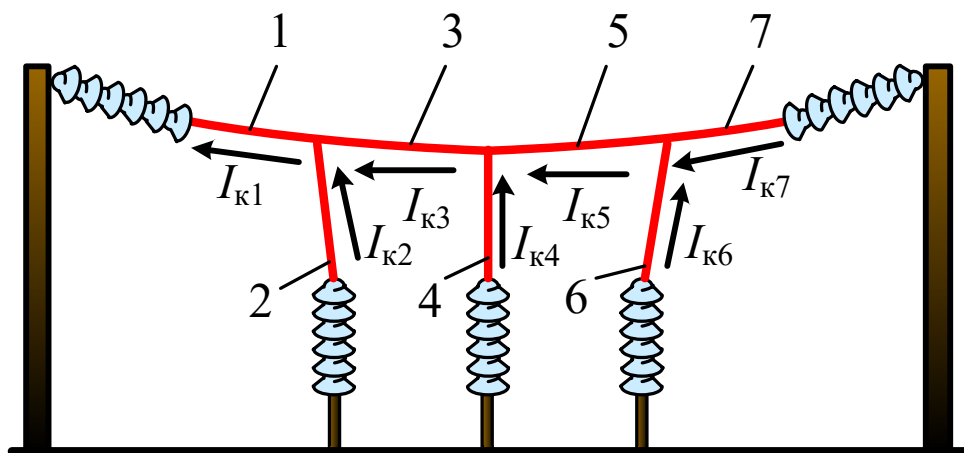
58. Наличие отпаяк к электрическим аппаратам является особенностью РУ с гибкой ошиновкой. По умолчанию они выполнены тем же проводом, что и сборные шины. Их местоположение задается аналогично сборным шинам. Точка крепления отпайки к проводу определяется компьютерной программой при расчете начального положения проводников,

точка крепления к аппарату определяется расположением вершины аппарата. Параметры аппарата определяются по справочным данным. Динамические характеристики некоторых аппаратов и опорных конструкций высоковольтных подстанций определяются в соответствии с приложением 1. В случае отсутствия такой информации вводятся нулевые значения, поскольку параметры аппаратов значительного влияния на результаты расчета недопустимого сближения проводников не оказывают. Однако такой подход неприменим в том случае, если с помощью компьютерной программы определяются динамические нагрузки на аппараты для последующей проверки его механической прочности.

59. При расчете пролетов ЛЭП, особенно на промежуточных опорах с подвесными гирляндами изоляторов, параметрами опорных конструкций в случае отсутствия данных можно пренебречь, задав нулевые значения. В пролетах ОРУ, которые имеют сравнительно небольшую длину, используются натяжные гирлянды изоляторов, поэтому все механические усилия передаются на металлические порталы. Порталы обладают определенной гибкостью за счет самого металла, из которого они изготовлены, и болтовых соединений, и пренебречь их параметрами нельзя, поскольку если задать их абсолютно жесткими, это искусственно уменьшит размах колебаний проводников и даст заниженные результаты. При отсутствии данных о механических характеристиках портала рекомендуется брать их из предлагающихся наборов исходных данных для данного класса напряжения. Отклонения порталов могут достигать нескольких миллиметров, в чем можно убедиться, проанализировав результаты расчета.

60. Для удобства пользователя в программы встроен каталог сталеалюминиевых проводов, который можно дополнять.

61. Параметры КЗ задаются в соответствии с расчетными данными и рекомендуемыми расчетными условиями КЗ (глава 8). Имеется возможность задать режим повторного КЗ в цикле неуспешного АПВ. При расчете ОРУ можно задавать разный ток КЗ по участкам ошиновки (рисунок 12) с учетом до трех отпаек. Для случая сквозного КЗ по нечетным участкам задается суммарный ток КЗ, по четным – нулевые значения.



1–7 – участки разбиения ошиновки

Рисунок 12 – Распределение тока КЗ по участкам пролета

62. Параметры электродинамического расчета задаются пользователем самостоятельно. Время расчета следует выбирать исходя из того, что проводники должны совершить полный цикл колебаний (оборот) относительно своего равновесного положения. Чем тяжелее и длиннее провод в пролете, тем больше будет это время. В среднем не более 3–10 с. Затягивать продолжительность расчета не имеет смысла, поскольку колебания затухают, поэтому максимальные отклонения и сближения наблюдаются в первом цикле.

63. Количество точек для построения графиков зависит от степени детализации процесса необходимой пользователю. Увеличение их числа приводит к замедлению процесса расчета.

64. Момент паузы в расчете предусмотрен для приостановки расчета, например, в случае обнаружения недопустимого сближения проводников в предшествующих расчетах, для того, чтобы сделать скриншот пролета в удобном ракурсе для использования в отчете.

65. Отслеживание траекторий расчета в определенной точке предусмотрено также для построения графиков в отчет, чтобы проиллюстрировать процесс сближения проводников. По умолчанию фиксируется положение средней точки пролета, однако в несимметричных пролетах максимальные отклонения проводников могут наблюдаться и в других сечениях. На каждом шаге расчета компьютерной программой заполняются значительные массивы данных, поэтому хранение траекторий движения всех точек проводников представляется затруднительным. И если пользователю необходимо включить в отчет траектории движения точки пролета, отличной от средней, то ее необходимо задать заранее перед выполнением электродинамического расчета (смотри инструкцию пользователя).

66. Проведение серии расчетов с изменением величины тока КЗ предусмотрено для определения тока электродинамической стойкости $I_{\text{дин}}$ – минимального тока КЗ при котором происходит недопустимое сближение проводников. Расчет тока $I_{\text{дин}}$ не является прямой задачей расчета электродинамической стойкости, однако позволяет определить ее запас относительно расчетного значения тока КЗ.

Значение $I_{\text{дин}}$ зависит от многих параметров пролета и определяется индивидуально для каждого конкретного объекта. Для этого в автоматическом режиме проводится серия расчетов с фиксацией минимальных расстояний между проводниками и строятся графики, по которым определяется $I_{\text{дин}}$.

ГЛАВА 12

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА АППАРАТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

67. Компьютерная программа FleBus адаптирована для РУ с гибкими проводниками с учетом спусков к электрическим аппаратам, с ее помощью можно получать характерные осциллограммы динамических усилий при различных видах и расчетных условиях КЗ (рисунок 4).

68. Учитывая упругие и инерционные характеристики аппаратов, необходимо рассматривать действие на них некой эквивалентной силы, которая будет отличаться от максимального усилия $F_{\max}$. Для ее определения необходимо представить диаграмму динамических усилий, подобную графику на рисунке 4 в аналитическом виде.

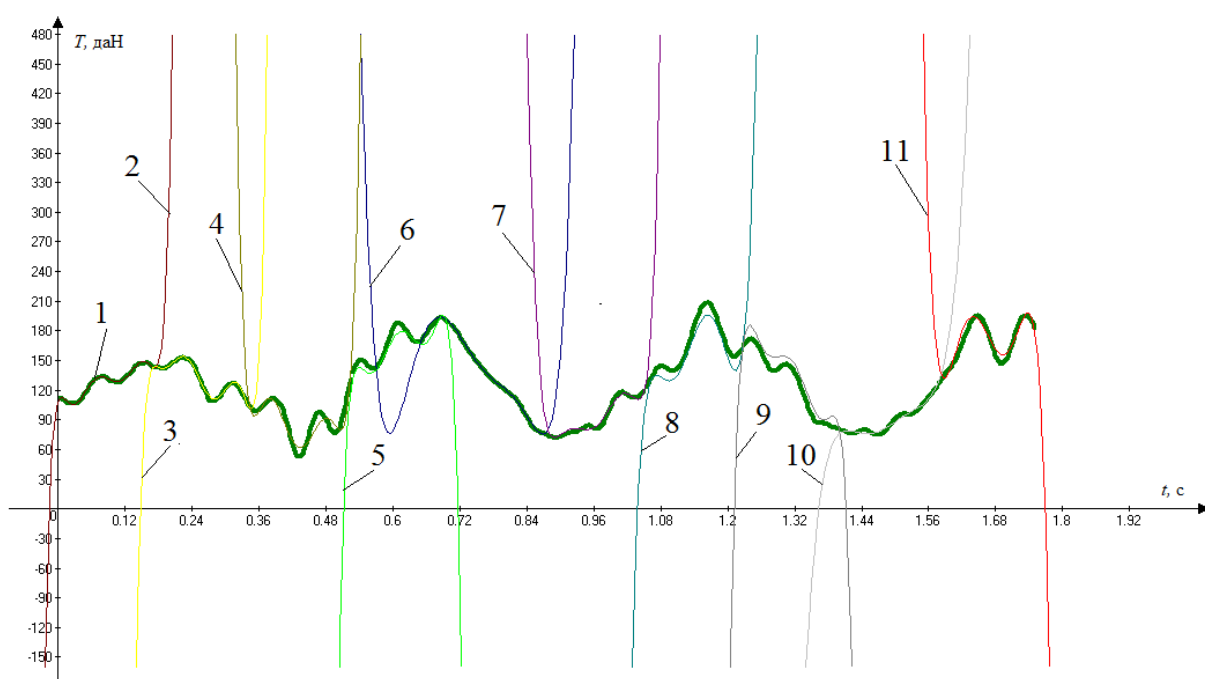


Рисунок 13 – График динамического тяжения участвующей в КЗ фазы
в ячейке типового ОРУ 110 кВ

69. Например, на рисунке 13 цифрой 1 обозначена кривая тяжения участвующей в КЗ фазы. Остальные кривые являются результатом частичной интерполяции и на определенных промежутках приближенно описывают первоначальный график. Далее с помощью прикладных программ, позволяющих проводить регрессивный анализ, можно получить набор функций, описывающих кривую 1 на различных промежутках времени. После чего для получения спектра частот вынужденных колебаний выбранная функция подвергается разложению в ряд Фурье на заданном интервале времени:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum a_n \cos \frac{\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{\pi n t}{T},$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) dt,$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \cos \frac{\pi n t}{T} dt,$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \sin \frac{\pi n t}{T} dt,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – количество учитываемых гармоник.

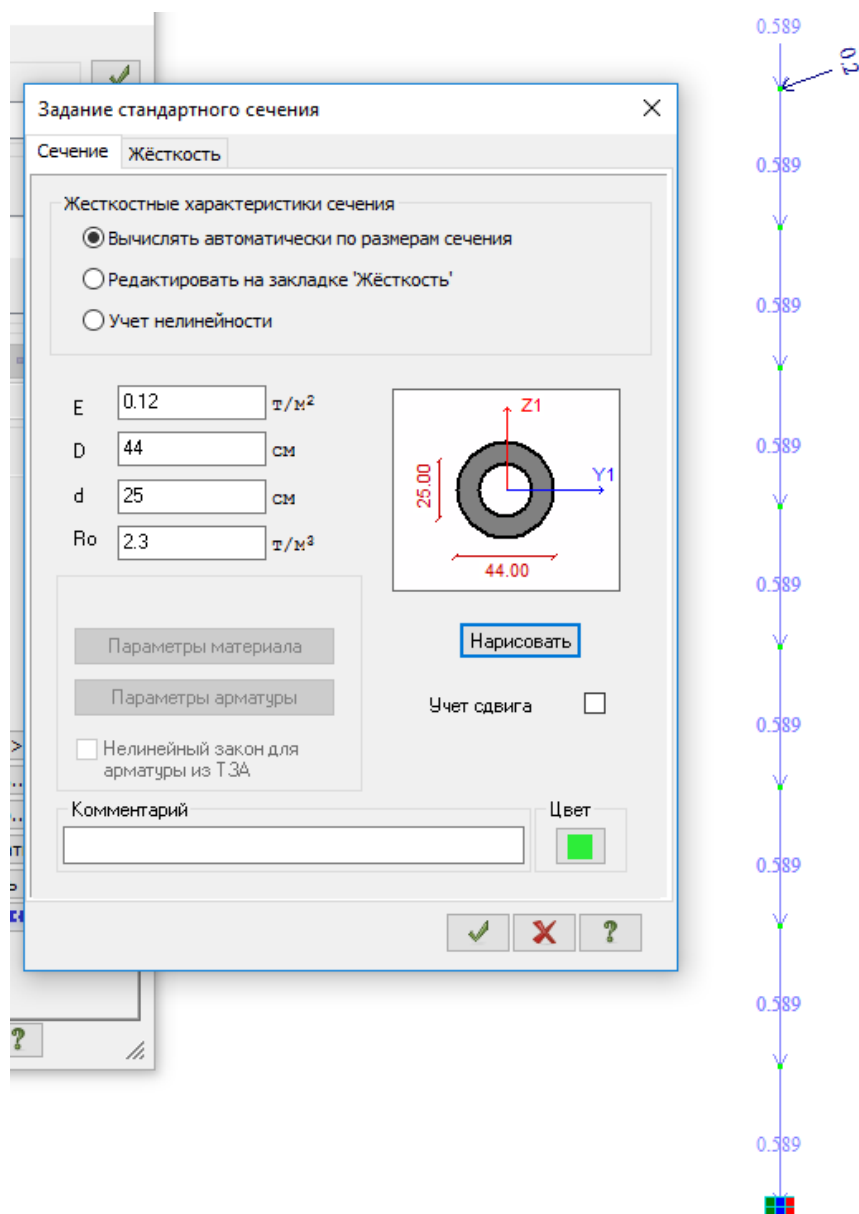


Рисунок 14 – Задание параметров в ЛИРА-САПР

70. Расчеты собственных частот колебаний аппаратов можно выполнять, например, с помощью программного комплекса ЛИРА-САПР, интерфейс которого позволяет задавать форму аппарата, его геометрические размеры, а также механические параметры (рисунок 14).

71. Для удобства математического описания задачи используется принцип связей механики, в соответствии с которым действия проводов на аппараты заменяются реакциями связей. При определении динамических прогибов аппарата в разных плоскостях используется принцип независимости действия сил.

72. Следует отметить, что для выбранной математической модели в которой аппараты представляются в виде упругого стержня узлы совершают колебания лишь по линейным степеням свободы, другими словами, во внимание принимаются только поперечные колебания стержня. Крутильными колебаниями также пренебрегаем, поскольку стержень в своем основании имеет жесткую заделку.

73. В расчете динамики электрические аппараты представляются упругим стержнем с равномерно распределенной массой и постоянной жесткостью по длине. Однако, интерфейс программного комплекса ЛИРА-САПР на этапе задания механических характеристик позволяет делить стержень на отдельные фрагменты и задавать массу и изгибную жесткость для каждого фрагмента. Данная функция может понадобиться при моделировании, например, маслонаполненных трансформаторов тока 110 кВ и выше в которых до 30 % массы трансформатора сосредоточено в его верхней части.

ГЛАВА 13

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ № 1. ПРОВЕРКА ГИБКОЙ ОШИНОВКИ ЯЧЕЙКОВОГО ПРОЛЕТА ТИПОВОГО ОРУ 110 КВ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ

74. Необходимо выполнить проверку гибкой ошиновки ячейкового пролета типового ОРУ 110 кВ на электродинамическую стойкость при токе двухфазного КЗ $I_{п,0}^{(2)}$ 30 кА. Продолжительность КЗ – 0,15 с, постоянная времени КЗ – 0,1 с. Марка провода – АС-400/51, гирлянда изоляторов – 11 штук ПС70-Д. Начальная стрела провеса – 1,35 м, междуфазное расстояние – 2,5 м. Климатические условия: температура +25 °С, ветер и гололед отсутствуют.

Запустив программу FleBus, открыть файл исходных данных «110 27,5 yach.dat», который поставляется вместе с программой и содержит все данные по пролету в соответствии с приведенным заданием. Указанный файл можно использовать как основу для создания нового набора исходных данных, меняя, например, марку провода, продолжительность КЗ и т. п.

В параметрах КЗ указать, что в КЗ участвуют фазы *A* и *B*, место КЗ – «сквозное». Это значит, что КЗ произошло вне ячейки и ее присоединения и

по ошиновке протекают сквозные токи КЗ по участкам 1, 3 и 5 (рисунок 12).
Время расчета выбрать 2–3 с.

Запустить расчет. После его окончания проанализировать результаты расчета (рисунок 15).

...

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА:

Наблюдались следующие сближения проводов $A_{ф-ф\min}$:

фаза А - фаза В - 0,111 м при $t = 0,794$ с - недопустимое

фаза В - фаза С - 1,100 м при $t = 0,250$ с

отп.1 ф.А - фаза В - 0,374 м при $t = 0,816$ с - недопустимое

отп.1 ф.А - отп.1 ф.В - 0,018 м при $t = 0,844$ с - недопустимое

...

Рисунок 15 – Фрагмент результатов расчета к примеру № 1

Из приведенного на рисунке 15 фрагмента результатов расчета видно, что при заданных параметрах КЗ может произойти недопустимое сближение гибких проводников в пролете, и их электродинамическая стойкость будет нарушена.

Для более глубокого анализа результатов расчета приводятся траектории движения проводников, их максимальные отклонения и тяжения, отклонения порталов, диаграммы тяжений в проводниках и другая информация.

ГЛАВА 14

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ № 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ ЯЧЕЙКОВОГО ПРОЛЕТА ТИПОВОГО ОРУ 110 КВ

75. Для пролета по данным примера № 1 необходимо определить ток электродинамической стойкости $I_{\text{дин}}$. Критерием электродинамической стойкости выступает минимальное междофазное расстояние между гибкими проводниками $A_{ф-ф.\min}$ в процессе их движения, которое сравнивается с допустимым $A_{ф-ф.\text{доп}}$. Для РУ 110 кВ $A_{ф-ф.\text{доп}} = 0,45$ м. Нарушение электродинамической стойкости в результате приближения проводников к заземленным конструкциям или превышения расчетных нагрузок над допустимыми анализируется пользователем самостоятельно. В результатах расчета для этого имеется достаточная информация.

Для определения $I_{\text{дин}}$ необходимо произвести серию расчетов, изменяя ток КЗ в достаточно широком диапазоне, чтобы там находилось предполагаемое значение $I_{\text{дин}}$, что подразумевает наличие определенного опыта расчетов электродинамической стойкости у пользователя.

Произведем серию расчетов, изменяя ток КЗ от 10 до 50 кА с шагом 2 кА (от 20 % до 100 % от заданного с шагом 4 %). В результате расчетов получаем диаграммы сближений $A_{\phi-\phi.min}$ гибких шин и аппаратных отпаяк разных фаз друг с другом как, например, на рисунке 16.

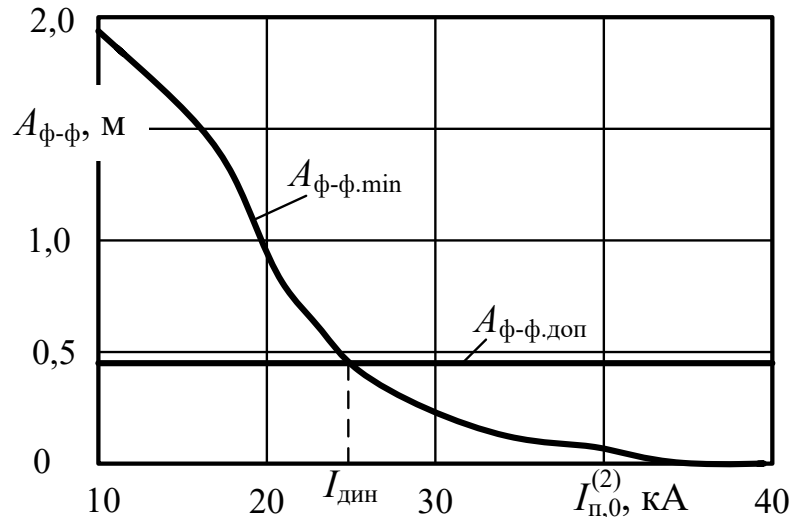


Рисунок 16 – Фрагмент результатов расчета к примеру № 1

Как видно из рисунка 16, недопустимое сближение токоведущих частей (в данном случае спусков фаз A и B) происходит при токе КЗ $I_{п,0}^{(2)} = 25$ кА. Соответственно для этого пролета $I_{дин} = 25$ кА.

ГЛАВА 15

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ОПОРНЫЙ ИЗОЛЯТОР В ПРОЛЕТЕ ТИПОВОГО ОРУ 110 КВ

76. Необходимо определить величину нагрузки на опорный изолятор, установленный в пролете типового ОРУ 110 кВ длиной 27 м, при токе двухфазного КЗ $I_{п,0}^{(2)} 30$ кА.

В пролете установлен изолятор марки ИОС-110-600, паспортные данные которого приведены в таблице 1. Токоведущие части пролета выполнены проводом марки АС-240/32, паспортные данные которого представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Параметры опорного изолятора ИОС-110-600

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, кВ	110
Минимальная разрушающая нагрузка на изгиб, даН	600
Масса, кг	71
Высота изолятора H , мм	2100
Наибольший диаметр изоляционной части D , мм	225
Высота верхнего фланца h_1 , мм	94
Высота нижнего фланца h_2 , мм	94

Таблица 2 – Паспортные данные провода АС-240/32

Параметр	Значение
Площадь сечения алюминиевой части, мм ²	244
Площадь сечения стальной части, мм ²	31
Расчетная масса провода на единицу длины m , кг/м	0,921
Наружный диаметр D , мм	21,6
Модуль упругости E , Н/м ²	$75 \cdot 10^9$
Момент инерции провода J , м ⁴	$9,5 \cdot 10^{-9}$

Максимальная нагрузка, передающаяся от проводников на аппараты при двухфазном КЗ согласно методике ГОСТ 30323-95 определяется по формуле:

$$F_{\text{из}}^{(2)} = \beta F_{\text{max}}^{(2)} \eta,$$

где η – коэффициент динамической нагрузки, зависящий от отношения $\frac{f_1}{f_c}$,

f_1 – расчетная основная частота собственных колебаний шины;

$f_c = 50$ Гц.

Расчетную частоту собственных колебаний шины f_1 следует определять по выражению:

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}.$$

Значения коэффициентов по справочным данным: $\beta = 1,25$ и $r_1 = 3,93$.

$$f_1 = \frac{3,93^2}{2 \cdot \pi \cdot 4^2} \sqrt{\frac{75 \cdot 10^9 \cdot 9,5 \cdot 10^{-9}}{0,921}} = 4,273 \text{ Гц.}$$

$$\frac{f_1}{f_c} = \frac{4,273}{50} = 0,085.$$

Значение динамического коэффициента $\eta \approx 0,5$.

Величину максимальной силы, передающейся на опорный изолятор определим из графика динамических усилий представленного на рисунке 13 $F_{\text{max}}^{(2)} = 200$ даН.

Величина максимальной нагрузки на изолятор будет равна:

$$F_{\text{из}}^{(2)} = \beta F_{\text{max}}^{(2)} \eta = 1,25 \cdot 200 \cdot 0,5 = 125 \text{ даН.}$$

ГЛАВА 16

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ № 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ОПОРНЫЙ ИЗОЛЯТОР С УЧЕТОМ ЕГО УПРУГО-ИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВОЗМОЖНОСТЬЮ НАСТУПЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА ВЫНУЖДАЮЩИХ И СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

77. Расчет производится для аппарата из примера № 3 с учетом его упруго-инерционных характеристик и возможностью наступления резонанса

вынуждающих и собственных колебаний. Динамическое усилие на аппарат определяются по выражению:

$$G_{\text{дин}} = G_{\text{ст}} + \mu P_0.$$

Как видно из диаграммы динамических тяжений (рисунок 13), затухание колебаний практически отсутствует, следовательно:

$$\mu = \frac{y_{\text{дин}}^{\text{max}}}{y_{\text{ст}}} = \frac{1}{\left(\frac{\Theta}{\omega}\right)^2 - 1},$$

где Θ и ω частоты вынужденных и собственных колебаний изолятора соответственно.

78. После разложения кривой 1 диаграммы на рисунке 13 в ряд Фурье и определения значений собственных частот колебаний изолятора с помощью программного комплекса ЛИРА-САПР сведем полученные результаты расчета в таблицу 3.

Таблица 3 – Частоты собственных и вынужденных колебаний

№ гармоники	Частота собственных колебаний опорного изолятора ИОС-110-600, Гц	Частота вынужденных колебаний, Гц
1	0,0218104	2,9411
2	0,109845	5,8821
3	0,320432	8,8232
4	0,660025	12,3643
5	0,929676	14,7054
6	1,51565	17,6464
7	1,87721	20,5875
8	2,27408	23,5286
9	4,32837	26,4697
10	6,54867	29,4124
11	8,58072	32,3519

Для опорного изолятора ИОС-110-600 одиннадцатая гармоника собственных колебаний $\omega = 8,58072$ Гц практически совпадает с третьей гармоникой вынужденных колебаний $\Theta = 8,8232$ Гц. Динамический коэффициент μ в этом случае будет равен

$$\mu = \frac{1}{\left(\frac{8,8232}{8,58072}\right)^2 - 1} = \frac{1}{0,05732} = 17,446.$$

Динамическое воздействие на опорный изолятор будет складываться из суммы статического нагружения $G_{\text{ст}}$, связанного, как видно из диаграммы динамического тяжения фазы (рисунок 13), с нелинейностью колебания изолятора (график поднят над осью x) и вибрационного нагружения частоты Θ , приведенного к статической силе посредством коэффициента

динамичности μP_0 . Величины $G_{ст}$ и P_0 являются амплитудными коэффициентами на резонансных гармониках. Для изолятора ИОС-110-600 динамическое воздействие на опорный изолятор будет равно:

$$G_{дин} = \alpha'_0 + \mu\alpha'_3 = 89,9 + 17,446 \cdot 27,0 = 560,78 \text{ даН}$$

В результате сравнения расчетов по двум методикам можно заключить, что учет только основной частоты колебаний аппарата позволяет лишь приблизительно определить значения максимальной нагрузки на аппарат при КЗ. По этой причине при выполнении динамического расчета необходимо проводить как можно более полный частотный анализ.

ГЛАВА 17

МЕЖДУФАЗНЫЕ ИЗОЛИРУЮЩИЕ РАСПОРКИ

79. После ввода в эксплуатацию новых генерирующих источников возрастает уровень токов КЗ в узлах объединенной энергетической системы Республики Беларусь. В этом случае даже те электроустановки с гибкими проводниками, которые ранее имели запас электродинамической стойкости, могут оказаться в зоне риска. Значения токов электродинамической стойкости $I_{дин}$ для пролетов типовых ОРУ 110–330 кВ, указанные в приложении 2, определены расчетным путем с использованием компьютерной программы FleBus и могут быть использованы для предварительной оценки необходимости произведения расчетов.

80. Если расчетным путем определена возможность нарушения электродинамической стойкости даже в действующей электроустановке, можно предложить ряд технических мероприятий для повышения электродинамической стойкости до безопасного уровня.

81. Наиболее простым решением, не требующим больших материальных вложений, является установка междуфазных изолирующих распорок (рисунок 17). Основу такого изолятора составляет стержень из стеклопластика, который способен выдерживать значительные механические нагрузки во всех направлениях.



Рисунок 17 – Междуфазная изолирующая распорка

82. Распорки препятствуют движению проводников в пролете, тем самым уменьшая риск их недопустимого сближения, а также уменьшают пиковые тяжения, снижая динамическую нагрузку на опорные и изолирующие конструкции и электрические аппараты. Необходимое число и место установки распорок могут быть определены только расчетным путем для каждого конкретного пролета РУ и ЛЭП. Такую возможность дают компьютерные программы.

83. Установка одной распорки в середине пролета значительно повышает его электродинамическую стойкость, а применение двух и более распорок может полностью исключить возможность недопустимого сближения гибких проводников при любых возможных токах КЗ. Это проиллюстрировано на рисунке 18, где показаны зависимости минимального расстояния между проводниками $A_{\phi-\phi.min}$ от величины тока КЗ в одном из расчетных пролетов.

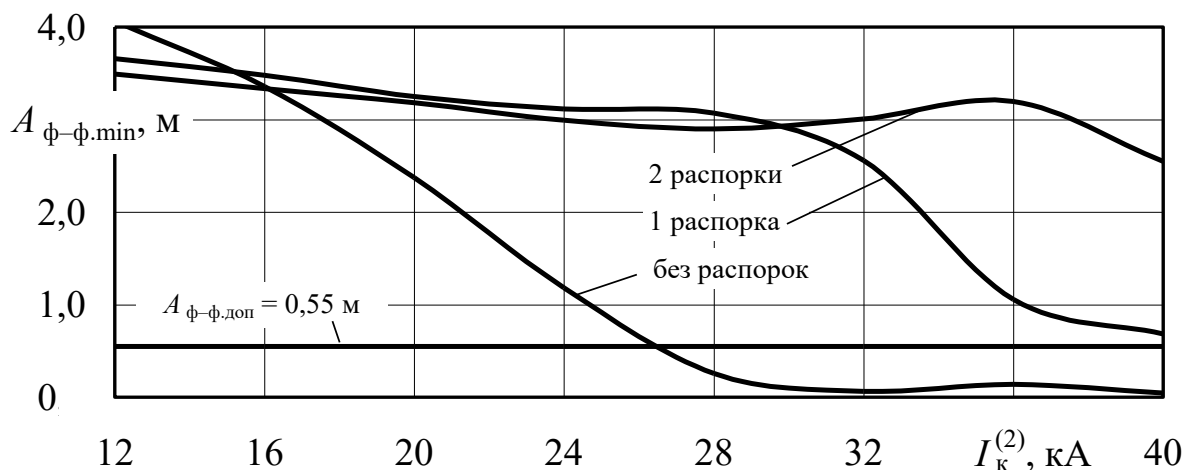


Рисунок 18 – Сближение проводников в пролете в зависимости от числа междуфазных распорок

84. На рисунке 19 проиллюстрировано влияние установки распорок на тяжения спусков к электрическим аппаратам. Очевидно, что тяжения в отпайках в расчетном пролете, а соответственно и усилия, передаваемые на аппараты, снизились практически на порядок.

85. Также распорки могут быть применены для предотвращения сближения между собой отпайек к электрическим аппаратам, возможность чего проиллюстрирована на рисунке 9. При применении междуфазных распорок уменьшается размах колебаний отпайек (рисунок 20), а соответственно и усилия, предающиеся на аппараты.

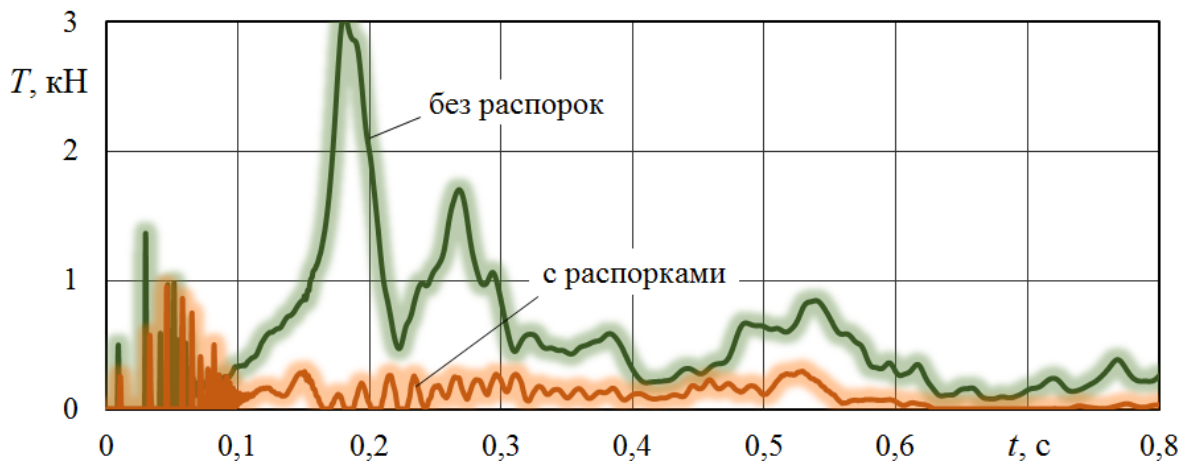
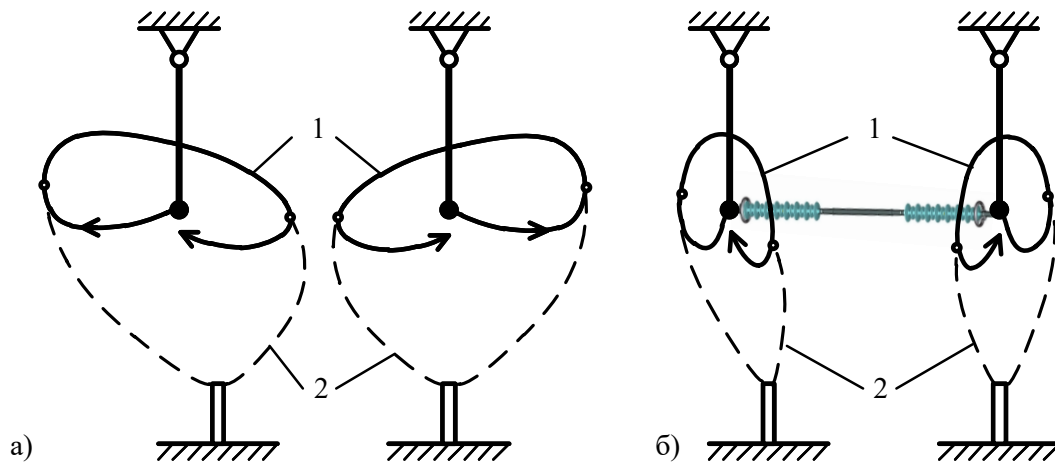


Рисунок 19 – Ограничение тяжений спусков при использовании междуфазных изолирующих распорок на фазных проводах



1 – траектории движения в точке крепления спуска;
 2 – положение спуска при максимальном сближении
 а – без распорок; б – с распорками

Рисунок 20 – Траектории движения проводов и спусков

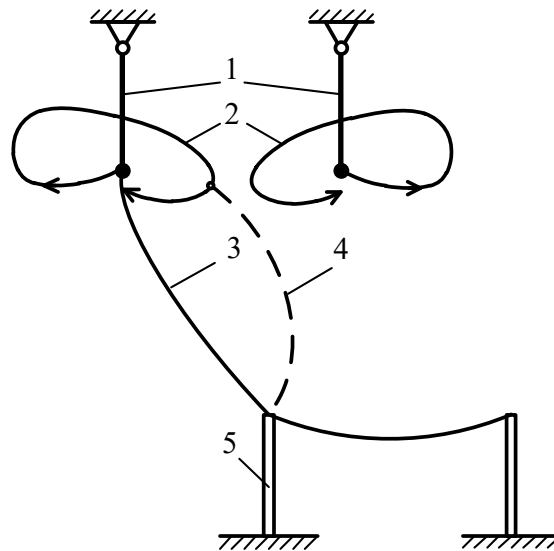
ГЛАВА 18

УСТАНОВКА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОПОРНОГО ИЗОЛЯТОРА

86. На рисунке 10 проиллюстрирована возможность сближения спуска к электрическому аппарату с проводом соседней фазы, что характерно для конструкции шинных пролетов ОРУ. Для исключения возможности нарушения электродинамической стойкости в этом случае предлагается установка дополнительного опорного изолятора (рисунок 21).

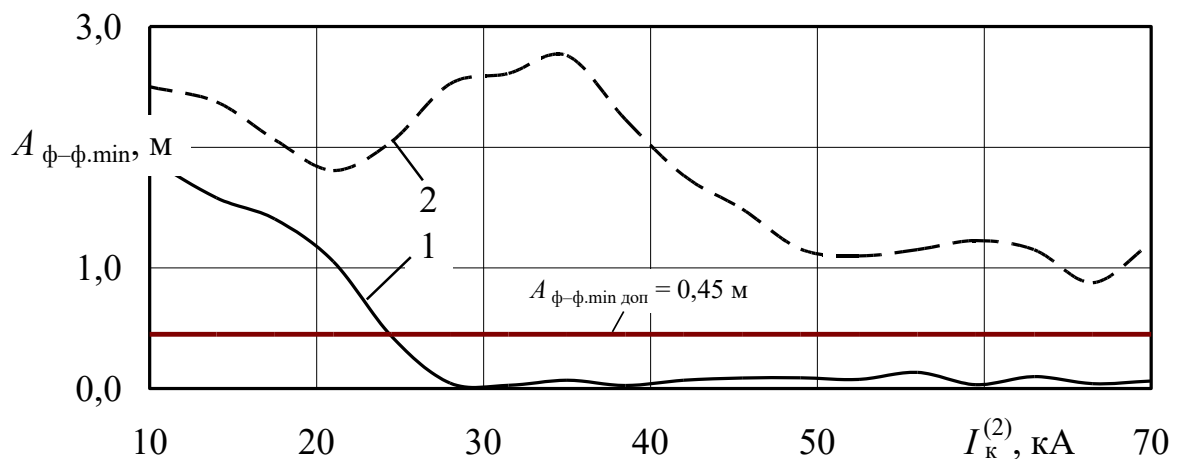
87. Расчет для шинного пролета типового ОРУ показывает, что установка дополнительного изолятора позволяет предотвратить недопустимое сближение отпайки со сборными шинами (рисунок 22).

88. Причиной большого числа аварийных ситуаций является поломка опорно-стержневых фарфоровых изоляторов. Наибольшее число таких случаев происходит в осенне-весенний период, когда суточные колебания температур могут быть особенно велики. К причинам повреждения относят «механические повреждения», а также «скорость ветра выше расчетной». При рассмотрении конструкции опорно-стержневого изолятора представляется маловероятным непосредственное его разрушение напором ветра в силу небольшой площади и аэродинамических характеристик. Разрушение изолятора происходит вероятнее всего из-за воздействия ветра на токоведущие части, которые при сильных порывах могут раскачиваться или даже перейти в режим пляски, нагружая тем самым изоляционные конструкции. В целом воздействие ветра на опорные изоляторы имеет тот же характер, что и при электродинамическом взаимодействии проводников при КЗ, которое также может вызвать разрушение изоляторов и не будет зафиксировано, как первопричина поломки.



1 – начальное положение сборных шин; 2 – траектории движения шин;
3 – статическое положение спуска; 4 – положение спуска при сближении с шиной; 5 – дополнительный опорный изолятор

Рисунок 21 – Сближение спусков и шин при двухфазном КЗ в шинном пролете при установке дополнительного опорного изолятора

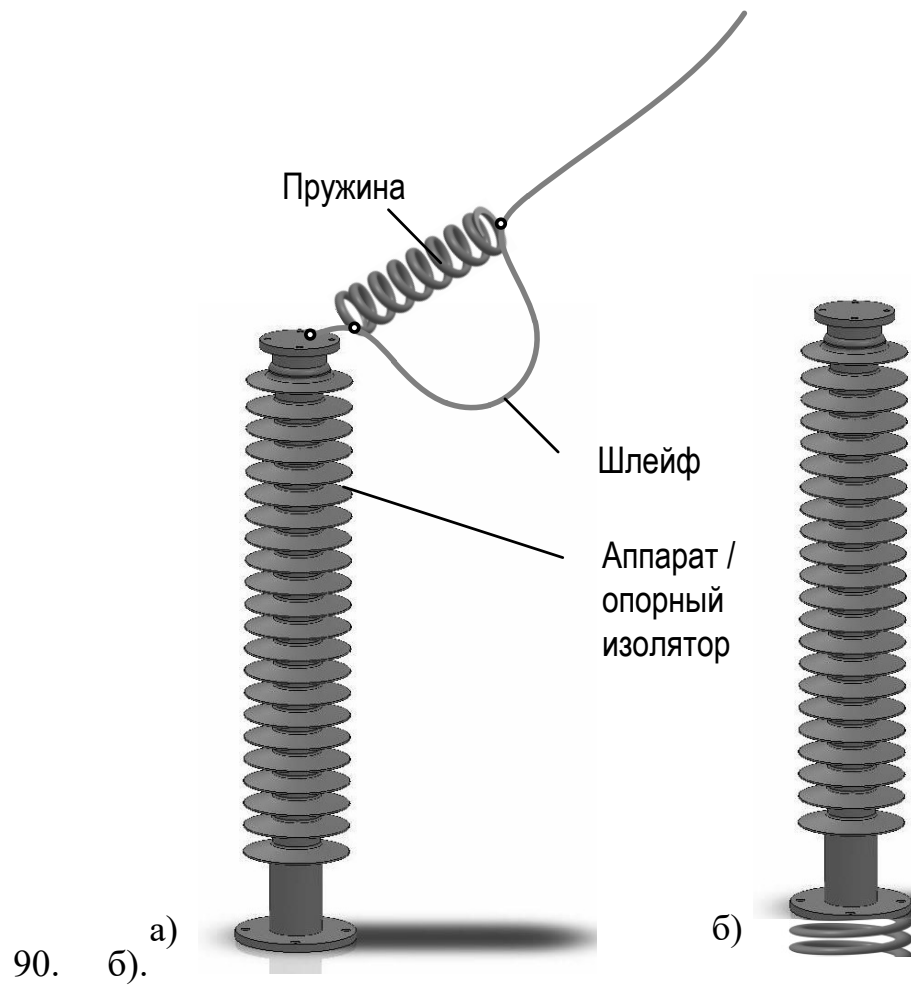


1 – до установки дополнительного опорного изолятора; 2 – после
Рисунок 22 – Сближение фазы с отпайкой в пролете типового ОРУ

ГЛАВА 19

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ПРЕДОТВРАЩАЮЩИЕ ПОЛОМКУ ИЗОЛЯТОРОВ

89. Для предотвращения поломки изоляторов предлагаются такие технические решения, как крепление провода к изолятору через демпфирующий элемент (пружину) (рисунок 23а) или крепление изолятора на опорной поверхности через демпфирующую прокладку (рисунок 23 б).



а – крепление провода через демпфирующий элемент;
 б – крепление изолятора через демпфирующую прокладку
 Рисунок 23 – Решения по предотвращению поломки изолятора

Приложение 1
к Методическим рекомендациям
по расчету электродинамической
стойкости токоведущих
конструкций распределительных
устройств и линий электропередачи

Динамические характеристики некоторых аппаратов
и опорных конструкций высоковольтных подстанций

Таблица А1 – Типичный ряд частот аппаратов и опорных конструкций

	Номинальное напряжение, кВ		
	110	220	330 и выше
Типичная высота аппаратов, м	1...1,7	2,1...2,5	3,1...4,5
Опорные (стержневые) изоляторы			
Частотный ряд, Гц	20...60	7...14	4...12
Измерительные трансформаторы / изоляторы / выключатели			
Частотный ряд, Гц	10...40	3...7	1,5...6
Опорные конструкции (порталы)			
Типичная высота, м	5...6	8...10	12...15
Частотный ряд, Гц	3...6	3...5	1...4

Таблица А2 – Жесткость аппаратов и опорных конструкций

Тип аппарата	Стержневой изолятор			Трансформатор тока		
Напряжение, кВ	110	220	330	110	220	330
Жесткость, Н/м	$1,5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$

Приложение 2
к Методическим рекомендациям
по расчету электродинамической
стойкости токоведущих
конструкций распределительных
устройств и линий электропередачи

Токи электродинамической стойкости
для пролетов типовых ОРУ 110–330 кВ

Объект		Ток электродинамической стойкости $I_{\text{д.ст}}$, кА			
		Высшая температура		Максимальная ветровая нагрузка	
Наименов.	Провод	фаза-фаза	<u>отпайка-</u> <u>фаза</u> <u>отп-отп</u>	фаза-фаза	<u>отпайка-</u> <u>фаза</u> <u>отп-отп</u>
110 кВ, ячейка 27,5 м	АС-185/29	24	13	29	27
	АС-300/39	24	16	32	32
	АС-400/51	24	19	—	—
	АС-500/64	25	22	—	—
110 кВ, шинный 27 м	АС-300/39	>70	20	>70	24
	АС-400/51	>70	21	>70	—
	АС-500/64	>70	23	>70	—
	2хАС-400/51	>70	29	>70	34
220 кВ, ячейка 40,5 м	АС-300/39	29	35	37	—
	АС-400/51	31	39	39	33
	АС-500/64	34	43	41	34
	2хАС-400/51	43	>70	55	53
220 кВ, шинный 30,8 м	АС-400/51	>70	33	33	36
	АС-500/64	>70	36	37	38
	2хАС-300/39	>70	40	41	42
	2хАС-500/64	51	49	51	50
330 кВ, ячейка 77,5 м	2хАС-300/48	43	35	59	58
	2хАС-400/51	46	37	62	61
	2хАС-500/64	51	41	66	67