

УДК 621.315/316.351.064

Расчет электродинамической стойкости проводов воздушных линий

И. И. Сергей¹⁾, Е. Г. Пономаренко¹⁾, П. И. Климкович¹⁾,
А. П. Долин²⁾, Я. В. Потачиц¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

²⁾Московский энергетический институт (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. На воздушных линиях применяются многопроволочные алюминиевые провода. Из-за их гибкой конструкции в результате электродинамического действия токов короткого замыкания могут происходить недопустимые взаимные сближения и даже схлестывания фазных проводников друг с другом. Ускоренное движение проводов, вызванное действием импульса электродинамических усилий при коротком замыкании, сопровождается ударными динамическими нагрузками, действующими на провода, изоляционные и опорные конструкции воздушных линий. Интенсивность электродинамического действия токов короткого замыкания на гибкие проводники воздушных линий зависит от величины токов короткого замыкания. Для исследования электродинамической стойкости проводов воздушных линий, расположенных по вершинам произвольного треугольника в пролетах большой длины, принимается расчетная модель в виде гибкой растяжимой нити, масса которой равномерно распределена по ее длине. При такой расчетной модели провод под действием внешних сил принимает форму, обусловленную эпюрой приложенных сил, и не сопротивляется изгибу и кручению. Задача расчета начальных условий сводится к решению уравнений статики гибкой нити. Закон движения краевых точек проводов установлен из совместного решения уравнений динамики проводов и конструктивных элементов воздушных ЛЭП. На основе предлагаемого алгоритма на кафедре «Электрические станции» БНТУ разработана компьютерная программа LINEDYS+, которая по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам, например SAMSEF. Для расчета начальных условий модифицировали компьютерную программу механического расчета гибких проводников MR 21. Электродинамическое взаимодействие проводов при коротком замыкании оценивается с учетом конструктивных элементов воздушных линий, гололедных и ветровых нагрузок, реальных характеристик короткого замыкания. Компьютерные программы снабжены простым и понятным пользовательским интерфейсом и могут создавать автоматические отчеты. Оценка достоверности расчетов по разработанной компьютерной программе выполнялась сопоставлением экспериментальных и расчетных данных для опытного пролета французской государственной компанией Electricite de France.

Ключевые слова: динамика токоведущих конструкций, электродинамическая стойкость, максимальные тяжения, силы сжатия, математическое моделирование

Для цитирования: Расчет электродинамической стойкости проводов воздушных линий / И. И. Сергей [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 5–19

Адрес для переписки

Сергей Иосиф Иосифович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-58
power.st@bntu.by

Address for correspondence

Sergey Joseph I.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-58
power.st@ bntu.by

Electrodynamic Stability Computations for Flexible Conductors of the Aerial Lines

I. I. Sergey¹⁾, Y. G. Panamarenka¹⁾, P. I. Klimkovich¹⁾,
A. P. Dolin²⁾, Y. V. Potachits¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

²⁾Moscow Energy Institute (Moscow, Russian Federation)

Abstract. In aerial transmission lines aluminium multiwire conductors are in use. Owing to their flexible design the electrodynamic effect of short circuit currents may lead to intolerable mutual rendezvous and even cross-whipping of the phase conductors. The increasing motion of the conductors caused by effect of the short-circuit electrodynamic force impulse is accompanied by the dynamic load impact affecting the conductors, insulating and supporting constructions of the aerial lines. Intensity of the short-circuit currents electrodynamic impact on the flexible conductors depends on the short circuit current magnitude. For research into electrodynamic endurance of the conductors of the aerial lines located at the vertices of arbitrary triangle with spans of a large length, the authors assume the conductor analytical model in the form of a flexible tensile thread whose mass is distributed evenly lengthwise the conductor. With this analytical model, by the action of the imposed forces the conductor assumes the form conditioned by the diagram of applied external forces, and resists neither bending nor torsion. The initial conditions calculation task reduces to solving the flexible thread statics equations. The law of motion of the conductor marginal points comes out of the conjoint solution of dynamic equations of the conductor and structural components of the areal electric power lines. Based on the proposed algorithm, the researchers of the Chair of the Electric Power Stations of BNTU developed a software program LINEDYS+, which in its characteristics yields to no foreign analogs, e. g. SAMSEF. To calculate the initial conditions they modified a software program computing the flexible conductor mechanics named MR 21. The conductor short-circuit electrodynamic interaction estimation considers structural elements of the areal lines, ice and wind loads, objective parameters of the short circuit. The software programs are accommodated with the simple and intelligible user interface and can produce automatic reports. For the computation certainty valuation of the developed software program, comparison of the experimental and design values was performed on an engineering prototype span of the French state-owned company Electricite de France.

Keywords: dynamics of current-carrying structures, electrodynamic stability, maximum tensions, compressional forces, mathematical modeling

For citation: Sergey I. I., Panamarenka Y. G., Klimkovich P. I., Dolin A. P., & Potachits Y. V. Electrodynamic Stability Computations for Flexible Conductors of the Aerial Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 5–19 (in Russian)

На воздушных линиях (ВЛ) применяются многопроволочные алюминиевые провода со стальным сердечником. В стадии освоения находятся композитные провода со стеклопластиковым сердечником. Из-за их гибкой конструкции в результате электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) могут происходить недопустимые взаимные сближения и даже схлестывания фазных проводников друг с другом или с заземленными конструкциями ВЛ. Случаи нарушения электродинамической стойкости гибких токопроводов наблюдались в России на подстанции 500 кВ «Тихорецкая» при схлестывании фаз гибкого токопровода на стороне 10 кВ автотрансформатора связи (предписание ПП-06-09 РАО ЕС России). Недопустимое сближение фаз гибкого токопровода 10 кВ имело место

в схеме электроснабжения ОАО «Могилевхимволокно» (по данным службы энергетика завода и РУП «БелНИПИэнергопром»). Причем повреждение наступило при токе 13 кА и продолжительности КЗ $t_k = 1,2$ с. В соответствии с ПУЭ [1] наименьшее расстояние между фазами в момент их наибольшего сближения при КЗ не должно быть меньше нормированного значения по рабочему напряжению (табл. 1). Согласно ГОСТ [2], оценка электродинамической стойкости проводов должна проводиться по двум условиям:

Таблица 1

$U_{ном}$, кВ	$A_{ф-ф, доп}$, м
35	0,25
110	0,45
220	0,95
330	1,40

$$\begin{aligned} S_{max} &\leq S_{доп}; \\ T_{max} &\leq T_{доп}, \end{aligned} \quad (1)$$

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

В общем случае проверка проводов на недопустимое сближение и схлестывание при КЗ выполняется по максимальной сумме отклонений проводов соседних фаз в момент их наибольшего сближения [3]

$$A - (S_1 + S_2 + 2r_p) \geq A_{ф-ф, доп} k, \quad (2)$$

где A , $A_{ф-ф, доп}$ – расстояние и допустимое расстояние между соседними фазами в режиме климатических нагрузок, предшествующем КЗ; r_p – единичный радиус-вектор; S_1 , S_2 – отклонения проводов соседних фаз в момент времени их наибольшего сближения [3].

Отклонения S_1 и S_2 не равны между собой не только при расположении фаз на опоре по треугольнику, но даже при горизонтальном расположении фаз из-за разного влияния ветра на движение проводов. Поэтому условие (2) в общем виде имеет следующий вид:

$$\min(\overline{R}_i - \overline{R}_j) - 2r_p \geq A_{ф-ф, доп}, \quad (3)$$

где R_i , R_j – радиусы-векторы мгновенного расположения i -го и j -го проводов в точке их наибольшего сближения ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$; $i \neq j$).

В простом случае, когда провода соседних фаз двигаются по идентичным траекториям навстречу друг другу, условие их недопустимого сближения имеет вид

$$A - 2(Y_{2max} + r_p) \geq A_{ф-ф, доп}, \quad (4)$$

где Y_{2max} – максимальное отклонение фазы при сближении проводов после отключения КЗ, м.

Ускоренное движение проводов, вызванное действием импульса электродинамических усилий (ЭДУ) при КЗ, сопровождается ударными динамическими нагрузками, действующими на провода, изоляционные и опорные конструкции ВЛ, способными вызвать нарушение механической прочности элементов ВЛ. По условию электродинамической стойкости ВЛ

Таблица 2

Тип и марка провода	$T_{\text{доп}}$, даН
АС-120/27	3960
АС-150/24	4350
АС-150/34	4950
АС-185/24	4995
АС-185/29	5365
АС-240/39	6960
АС-300/48	8700
АС-400/22	8600
АС-400/56	10800
АС-400/93	13200
АС-500/64	13500

максимальные тяжения проводов при КЗ не должны превышать их допустимых значений. Допустимые тяжения определяются пределом прочности на растяжение проводов с учетом коэффициента запаса $k_3 = 0,5$ (табл. 2) [2].

Интенсивность электродинамического действия токов КЗ на гибкие проводники ВЛ зависит от величины токов КЗ. Согласно ПУЭ проверка электродинамической стойкости проводов необходима, если действующее значение началь-

ного периодического тока КЗ превышает 20 кА [1]. По данным ведущих белорусских проектных организаций, уровни токов КЗ на стороне 110 и 330 кВ достигают 35–40 кА. Ожидается их рост в связи со строительством Белорусской АЭС. В электрических сетях 110–220 кВ Московского региона только благодаря стационарному делению сети (более 100 точек) токи КЗ находятся на уровне 30–40 кА, а не 130–140 кА, при $U_{\text{ном}} = 110$ кВ и 70–80 кА при $U_{\text{ном}} = 220$ кВ, при отсутствии деления [4]. Длины пролетов при указанных напряжениях достигают 400 м, а стрелы провеса 10 м, что более чем в два раза превышает междуфазные расстояния. Это повышает риск опасного сближения и схлестывания проводов ВЛ при КЗ.

Для исследования электродинамической стойкости проводов ВЛ, расположенных по вершинам произвольного треугольника в пролетах большой длины, принимается расчетная модель провода в виде гибкой растяжимой нити, масса которой равномерно распределена по длине провода. При такой расчетной модели провод под действием внешних сил принимает форму, обусловленную эпюрой приложенных сил, и не сопротивляется изгибу и кручению. Уравнения движения провода, представленного гибкой нитью, записанные в нормальном виде, имеют следующий вид [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial s} \frac{\partial \bar{R}}{\partial s} + T \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s^2} + \bar{P} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где \bar{R} – радиус-вектор произвольной точки провода в пролете, м; s – дуговая координата провода, м; \bar{P} – вектор распределенной внешней нагрузки на единицу длины провода, в состав которой кроме электродинамической

нагрузки от токов КЗ могут входить 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.

После преобразования (5) к нормальному виду получены векторно-параметрические уравнения движения проводов, записанные в проекциях на оси координат [5]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} &= \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial x}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_x^*; \\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= b^2 \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial y}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_y^*; \\ \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= b^2 \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + \left[\lambda^2 + b^2 \left(\frac{\partial z}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_z^*,\end{aligned}\quad (6)$$

где

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

e – относительное удлинение элемента провода в результате растяжения и нагрева при КЗ; α_y – коэффициент упругого удлинения провода; ϑ – текущая температура провода при и после КЗ, °С; P^* – распределенная внешняя нагрузка на единицу длины провода, Н/м.

Вычисление ЭДУ между проводами фаз, взаимное пространственное положение и форма которых в каждый момент времени описываются уравнениями их движения, производится по формуле Био, Савара и Лапласа, записанной в векторно-параметрической форме [5]. В общем виде в системе n гибких проводов ВЛ суммарные ЭДУ на единицу длины k -го провода определяются по выражению

$$\bar{F}_k = \frac{\sum_{j=1}^n d\bar{F}_{kj}}{ds_k}, \quad (7)$$

где ds_k – длина элемента k -го провода, м; $d\bar{F}_{kj}$ – ЭДУ на элемент длины k -го провода от j -го (при $k \neq j$); при $k = j$ – собственные ЭДУ, обусловленные криволинейностью провода, Н/м.

ЭДУ, действующие на элемент k -го проводника в поле j -го, определяются по выражению (рис. 1)

$$d\bar{F}_{kj} = \frac{\mu_0 i_k i_j}{4\pi} \left[d\bar{s}_k \int_{l_j} \frac{d\bar{s}_j \bar{R}_{jk}}{|\bar{R}_{jk}|^3} \right], \quad (8)$$

где i_k, i_j – мгновенные значения токов во взаимодействующих проводниках, А.

Мгновенные значения токов КЗ в трехфазной системе вычисляются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \left(\sin(\omega t + \alpha) - \sin \alpha e^{-\beta t} \right); \\ i_B &= I_m \left(\sin \left(\omega t + \alpha - \frac{2}{3} \pi \right) - \sin \left(\alpha - \frac{2}{3} \pi \right) e^{-\beta t} \right); \\ i_C &= I_m \left(\sin \left(\omega t + \alpha + \frac{2}{3} \pi \right) - \sin \left(\alpha + \frac{2}{3} \pi \right) e^{-\beta t} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где I_m – амплитуда периодической составляющей тока КЗ, А; α – фаза включения тока; $\beta = 1/T_a$ – показатель затухания аperiodической составляющей тока КЗ, 1/с; T_a – постоянная времени цепи КЗ, с.

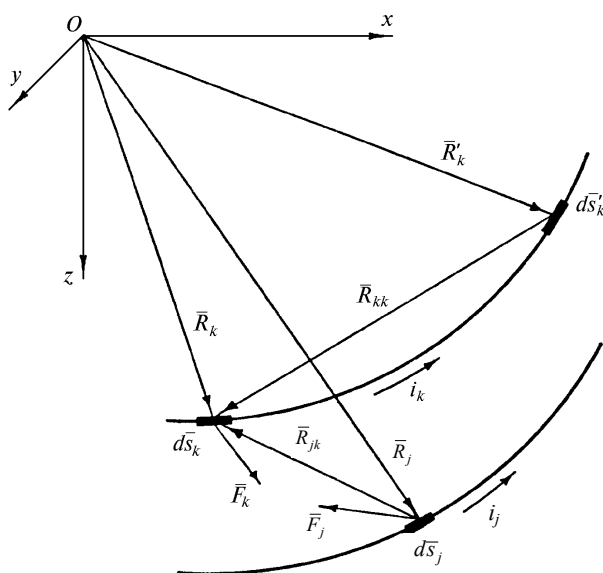


Рис. 1. К расчету ЭДУ в системе гибких проводов

Fig. 1. On EDF estimation in a system of flexible wires

Для выделения единственного решения уравнений движения проводов нужны начальные и краевые условия задачи. Начальные условия для уравнений движения проводов определяются их положением при $t = 0$, краевые – заданными координатами концов провода в полете. Задача расчета начальных условий сводится к решению уравнений статики гибкой нити, полученных из уравнений динамики [2], в которых производные по времени принимаются равными нулю. На кафедре «Электрические станции» БНТУ разработан векторно-параметрический метод расчета равновесного положения проводов ВЛ при их различном пространственном расположении под действием весовых, гололедных и ветровых распределенных

нагрузок. Гололедные и ветровые нагрузки рассчитываются в соответствии с требованиями ПУЭ [1].

Закон движения краевых точек проводов установлен из совместного решения уравнений динамики проводов и конструктивных элементов воздушных ЛЭП. Математическое описание движения проводов, их начального и равновесного положений до КЗ, упругой податливости опорных конструкций позволило сформулировать краевую задачу динамики проводов ВЛ. Для решения нелинейных дифференциальных уравнений динамики (6) проводов используются численный разностный метод и неявная схема (рис. 2) [6].

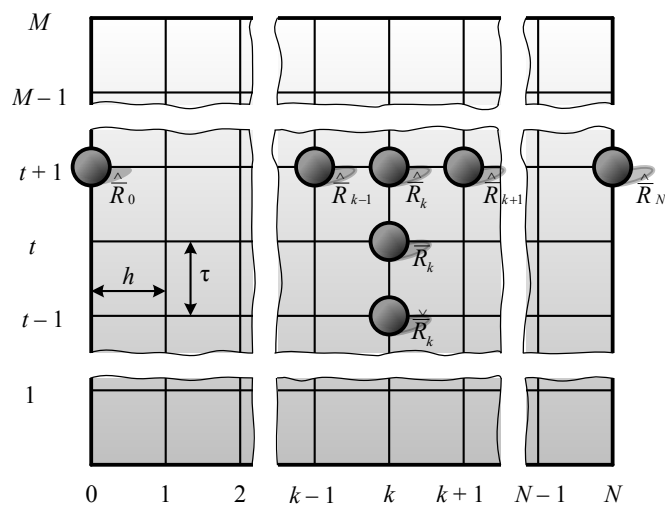


Рис. 2. Сетка для численного решения уравнений движения проводов по неявной схеме

Fig. 2. The grid for numerical calculation of the wires movement equations by implicit scheme

На основе вышеизложенного алгоритма на кафедре «Электрические станции» БНТУ разработана компьютерная программа LINEDYS+ [7], которая по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам, например SAMSEF. Для расчета начальных условий модифицировали компьютерную программу механического расчета гибких проводников MR 21. Электродинамическое взаимодействие проводов при КЗ оценивается с учетом конструктивных элементов ВЛ, гололедных и ветровых нагрузок, реальных характеристик КЗ и неуспешного автоматического повторного включения (АПВ). Компьютерные программы снабжены простым и понятным пользовательским интерфейсом и имеют возможность создания автоматических отчетов. Оценка достоверности расчетов по разработанной компьютерной программе выполнялась сопоставлением экспериментальных и расчетных данных для опытного пролета французской государственной компанией Electricite de France [8–10] (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Сравнение расчетных и экспериментальных данных
для опытного пролета Electricite de France длиной 230 м
Computation and experimental data comparison
for the Electricite de France engineering prototype 230 m span

Фаза \ Параметр	A			B		
	Опыт	Расчет	Расхождение, %	Опыт	Расчет	Расхождение, %
$T_{2\max}$, кН	60,00	59,41	-1,0	–	66,23	–
$T_{3\max}$, кН	77,00	82,64	7,3	79,0	71,40	-9,6
$y_{1\max}$, м	5,00	5,65	13,0	5,0	5,55	10,9
$y_{2\max}$, м	3,90	3,97	1,7	4,0	4,64	16,0
z_{\max} , м	2,77	3,33	20,0	2,0	1,77	-11,7

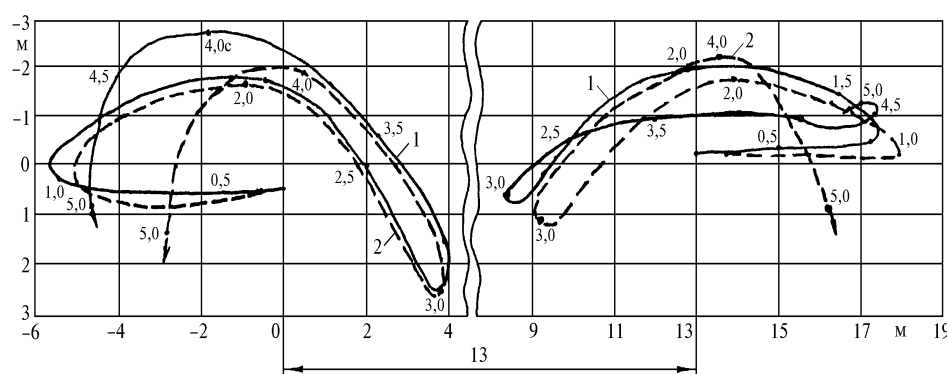


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных траекторий движения проводов опытного пролета Electricite de France длиной 230 м: 1 – расчет по программе; 2 – опыт; провод – 2xASTER-570; длина пролета – 230 м; расстояние между фазами – 13 м; ток КЗ – 54 кА; продолжительность КЗ – 0,35 с; тяжение проводов: фаза A – 41 кН; фаза B – 48 кН

Fig. 3. Comparison of calculated and experimental conductors motion trajectories of the Electricite de France engineering prototype 230 m span: 1 – computer program evaluation; 2 – experiment; conductor – 2xASTER-570; span length – 230 m; phase-to-phase clearance – 13 m; SC (short circuit) current – 54 kA; SC duration – 0,35 sec.; conductor tension: phase A – 41 kN; phase B – 48 kN

Результаты расчетов по программе LINEDYS+ также хорошо согласуются с литературными данными (табл. 4, рис. 4). Для теоретического анализа французскими исследователями в [8–10] использована компьютерная программа CONEX, в которой реализован алгоритм численного разностного решения уравнений движения абсолютно гибкой упругой нити. Идентичность реализованных в программах LINEDYS и CONEX алгоритмов обуславливает высокую степень совпадения результатов.

Таблица 4

Сопоставление результатов расчета
 по компьютерным программам LINEDYS+ и CONEX
 Computation results comparison
 by computer programs LINEDYS+ and CONEX

№ П/П	CONEX		LINEDYS+		$\Delta T, \%$	$\Delta a, \%$
	$T_{\max}, \text{кН}$	$a_{\min}, \text{М}$	$T_{\max}^A (T_{\max}^B), \text{кН}$	$a_{\min}, \text{М}$		
1	33	2,74	32,39 (32,99)	2,33	-1,9	-15,0
2	42	0,40	42,70 (42,85)	0,42	2,0	4,0
3	38	1,70	36,37 (37,44)	1,72	-1,5	1,1
4	38	1,10	35,52 (35,32)	1,27	-6,5	15,4
5	44	1,50	42,83 (41,83)	1,41	-2,6	-6,0
6	35	2,30	34,44 (34,44)	1,62	-1,6	-29,5
7	42	0,00	43,02 (43,02)	0,00	2,4	-
8	38	1,50	38,34 (38,31)	1,23	0,9	-18,0
9	48	0,30	48,47 (47,32)	0,38	0,9	26,6

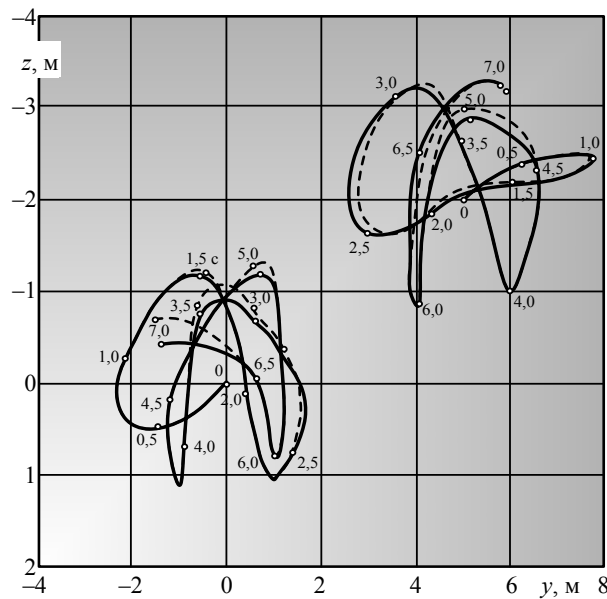


Рис. 4. Траектории движения средних точек проводов: длина пролета – 200 м;
 провод – ASTER-570; тяжение – 20 кН; ток двухфазного КЗ – 30 кА;
 продолжительность – 0,12 с; — — — — LINEDYS+; - - - - CONEX

Fig. 4. The conductor centerpoints motion trajectories: span length – 200 m;
 conductor – ASTER-570; tangential tension – 20 kN; two-phase SC current – 30 kA;
 duration – 0,12 sec.; — — — — LINEDYS+; - - - - CONEX

В качестве примера выполнен расчет движения проводов воздушной линии 110 кВ на типовых опорах ПБ 110-11. Анализ траекторий движения фазных проводников показывает, что результирующее ЭДУ действует на фазу В в горизонтальной плоскости, поэтому траектория движения фазы

B – горизонтальная. Наибольшими вертикальными движениями при КЗ характеризуется фаза *A*, так как под действием результирующего ЭДУ трехфазного КЗ происходит значительный подскок этой фазы в направлении уменьшения тяжения. Аналогичные движения описывает и фаза *A*. Однако в этом случае результирующие ЭДУ действуют на растяжение провода фазы *A* и величина подскока провода после отключения КЗ невелика. Зато для фазы *A* из-за деформации провода ЭДУ на стадии свободного движения наблюдаются значительные горизонтальные перемещения, повышающие риск опасного сближения фаз между собой.

При расположении проводов по вершинам треугольника на типовых опорах ВЛ 110–220 кВ в траекториях их движения при КЗ могут преобладать как вертикальные, так и горизонтальные перемещения в зависимости от фазы включения КЗ (рис. 5, 6).

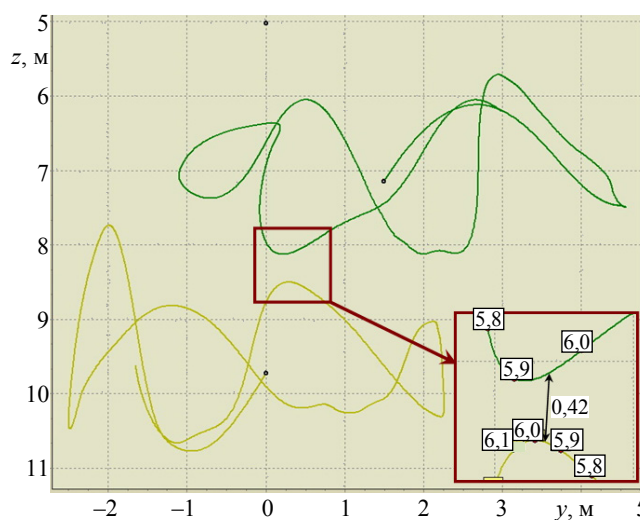


Рис. 5. Траектории движения проводов в точке, удаленной на 195 м от левой опоры, при двухфазном КЗ

Fig. 5. Conductors motion trajectories in the point outlying 195 m from the left pylon in a two-phase SC

После отключения КЗ в последующих циклах свободных колебаний, несмотря на значительное междуфазное расстояние, могут иметь место недопустимые сближения проводников. Тяжесть электродинамического действия усиливается в цикле неуспешного АПВ и при срабатывании резервных защит. Наибольшие отклонения и тяжения проводов наблюдаются при трехфазном КЗ и фазе включения напряжения, равной 160° . Несмотря на меньшие токи КЗ на ВЛ, их электродинамическое действие оказывается более сильным, а электродинамическая стойкость проводов – более низкой, чем для распределительных устройств электростанций и подстанций. Это в первую очередь связано с непропорциональным увеличением длины пролетов ВЛ по сравнению с шинными пролетами открытого распределительного устройства (ОРУ) при близких значениях междуфазных расстоя-

ний. На ВЛ $\frac{l}{a} \approx \frac{300}{4,5} = 67$ при $f_{0*} = 2-3\%$ ($f_0 = 6-19$ м). В то же время для ОРУ 110 кВ отношение $\frac{l}{a} \approx \frac{30}{3} = 10$ при $f_{0*} = 3-5\%$ ($f_0 = 1,0-1,5$ м). В результате при близких углах отклонения плоскостей провода абсолютные отклонения и сближения фаз значительно отличаются друг от друга.

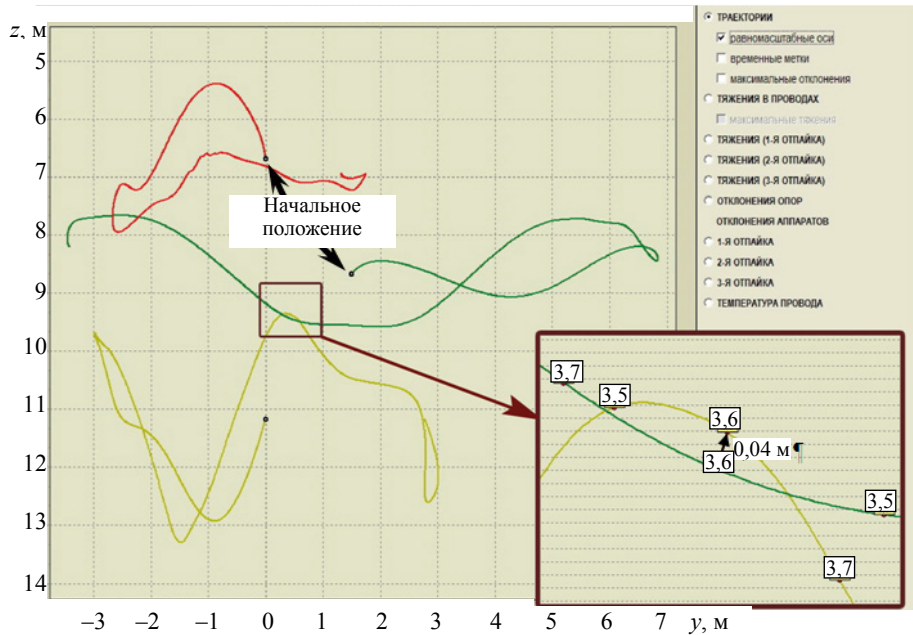


Рис. 6. Траектории движения проводов в средней точке пролета при трехфазном КЗ

Fig. 6. Conductors motion trajectories at the span centerpoint in a three-phase SC

Из-за разности высот подвеса проводов ВЛ, закрепленных на типовых опорах при КЗ, их максимальное сближение происходит не в середине пролета, а ближе к опорам (рис. 7). Объяснить это явление можно, представив провода ВЛ параболическими жесткими конструкциями, которые движутся навстречу друг другу. Схлестывание таких проводов произойдет в двух точках, равноудаленных от центра пролета. Чем больше стрела провеса, тем ближе эти точки будут к опорам. В общем случае, учитывая множество факторов, влияющих на процесс движения проводников, затруднительно произвести какой-либо приближенный анализ с целью выработки заключения об электродинамической стойкости. Поэтому для получения достоверной оценки электродинамической стойкости проводов ВЛ следует использовать компьютерную программу LINEDYS+, позволяющую определять токи электродинамической стойкости проводов ВЛ при различных физико-механических параметрах проводов и геометрических характеристиках пролетов, достоверность расчетов по которой подтверждена опытными данными.

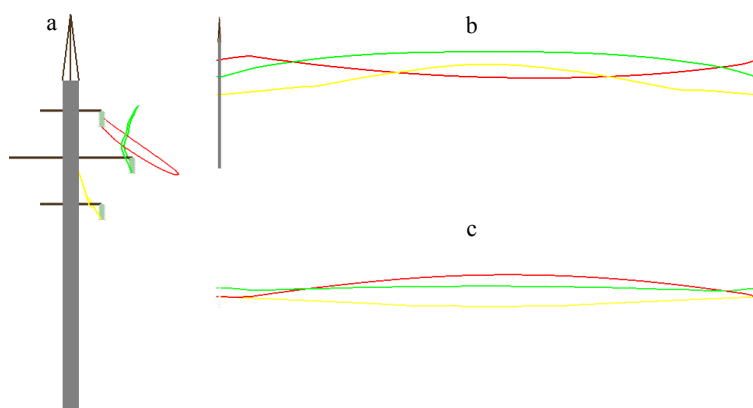


Рис. 7. Недопустимое сближение проводников не в середине пролета:
а – вид пролета с торца; б – сбоку; с – сверху

Fig. 7. Conductors intolerable rendezvous not in the middle of the span:
a – the span end view; b – side view; c – top view

Расчетная осциллограмма тяжения проводов при КЗ (рис. 8) содержит характерные всплески тяжения, которым соответствуют участки траекторий движения, когда после отключения КЗ силы тяжести, инерции и растяжения проводов действуют в одном направлении и провод проходит наиболее низкую точку траектории движения. Указанные пики тяжения при токах электродинамической стойкости 20–25 кА, найденные по условию недопустимого сближения, не превышают $T_{\text{доп}}$ (табл. 2).

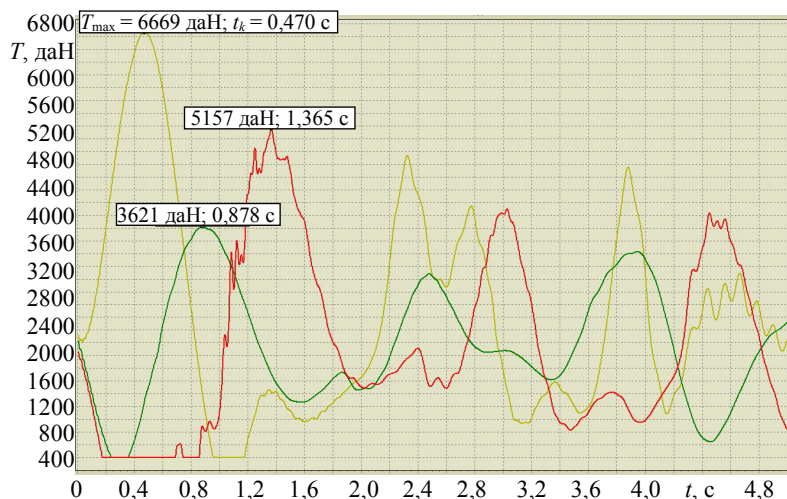


Рис. 8. Изменение тяжения во времени

Fig. 8. Tension alteration in time

Как видно из рис. 8, пиковые тяжения проводов при КЗ носят кратковременный характер и быстро уменьшаются после отключения КЗ. Поэтому подстановка в условие электродинамической стойкости максимального тяжения требует отдельного рассмотрения. Анализ результатов расчета параметров динамики проводов 220 кВ показывает их более высокую элек-

тродинамическую стойкость по сравнению с ВЛ 110 кВ (токи электродинамической стойкости выше в два и более раз, рис. 9–11).

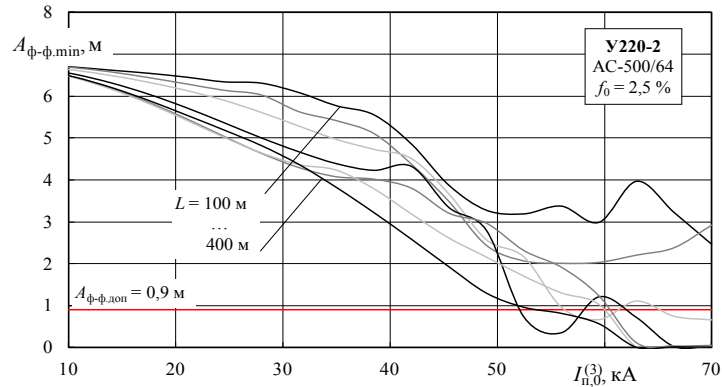


Рис. 9. Сближение проводников в зависимости от тока КЗ для разных длин пролета

Fig. 9. Conductor approach as a function of SC current for various span lengths

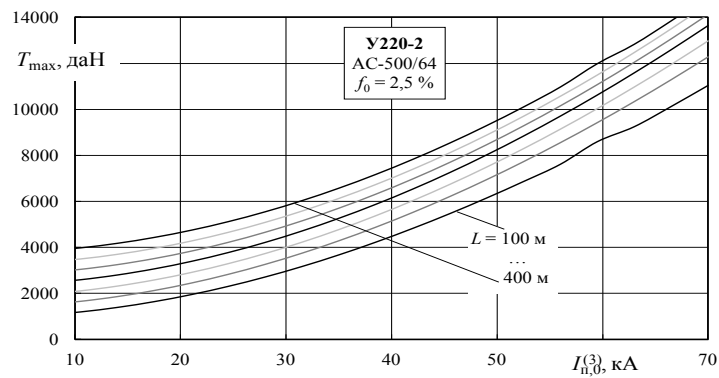


Рис. 10. Максимальные тяжения в проводах в зависимости от тока КЗ для разных длин пролета

Fig. 10. Maximal tensions in conductors as function of SC current for various span lengths

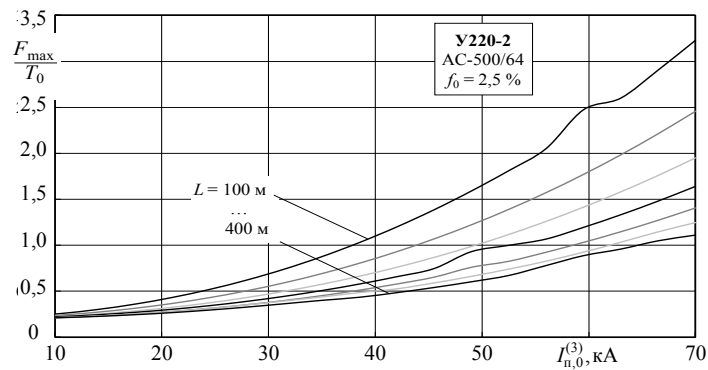


Рис. 11. Относительные максимальные усилия на подвесные гирлянды изоляторов в зависимости от тока КЗ для разных длин пролета

Fig. 11. Relative maximal stress on the suspension sets as function of SC current for various span lengths

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствован векторно-параметрический метод расчета электродинамической стойкости проводов воздушных линий, основанный на численном решении уравнений их движения как системы с распределенной массой с учетом их начального положения в одном из нормированных ПУЭ климатическом режиме и влияния упругих деформаций опорных конструкций воздушных линий.

2. Составлена компьютерная программа LINEDYS+, пригодная для оценки и анализа электродинамической стойкости проводов воздушных линий при их произвольном расположении на опоре воздушных линий в различных режимах короткого замыкания и в цикле неуспешного автоматического повторного включения.

3. Достоверность расчетов по компьютерной программе LINEDYS+ подтверждается сопоставлением результатов расчета с опытными данными Electricite de France в пролетах 200 и 230 м.

4. Выполнена оценка электродинамической стойкости воздушных линий 110–220 кВ с определением токов их электродинамической стойкости, которая может быть использована при реконструкции действующих и сооружении новых воздушных линий 110–220 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., перераб. и доп. М., 2007. 512 с.
2. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ Р 50254–92. Введ. 01.01.1994. М.: Госстандарт России, 1993. 57 с.
3. Сергей, И. И. Динамика гибких проводов электроустановок энергосистем: теория и вычислительный эксперимент: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / И. И. Сергей. Минск, 2000. 324 л.
4. Игнатов, В. В. К вопросу о методах ограничений токов короткого замыкания в энергосистеме / В. В. Игнатов, М. Ш. Миерихаимов, А. В. Шунтов // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 5. С. 94–103.
5. Сергей, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 252 с.
6. Пономаренко, Е. Г. Расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств с применением неявной схемы / Е. Г. Пономаренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 5. С. 34–45.
7. Разработка компьютерной программы расчета и проведение оценки электродинамической стойкости воздушных линий ОАО «МОЭСК» при росте уровней токов КЗ / И. И. Сергей [и др.]: отчет по НИР (заключительный). Минск: БНТУ, 2013. С. 73 с.
8. Dalle, B. Mechanical Effects of High Short Circuit Current on Overhead Lines / B. Dalle, P. Roussel // IEE Power Engineering Society, Winter Meet, Prepr. New York, N. Y., 1979. P. 1–5.
9. Influence of an Increase in Short-Circuit Currents on the Design of 400 kV Installations of the Electricite de France / Y. Thomas [et al.]. Paris, 1976. 20 p. (Preprint/CIGRE; 23–06).
10. Lilien, J. L. Comparison Between Experimental and Numerical Results on Flexible Conductors / J. L. Lilien. Paris, 1980. 10 p. (Preprint/CIGRE; 23–80 (WG–02) 18–IWD).

REFERENCES

1. *Operational Code for Electrical Installations*. 7th ed., Revised and Enlarged. Moscow, 2007. 512 p. (in Russian).
2. State Standard R 50254–92. Closed-Circuit Faults in the Electrical Facilities. Calculation Techniques for the Closed-Circuit Currents Electrodynamic and Thermic Impact. Moscow, GosStandard of Russia, 1993. 57 p. (in Russian).
3. Sergey I. I. (2000) *Dinamika Gibkikh Provodov Elektroustanovok Energosistem: Teoriia i Vychislitel'nyi Eksperiment. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Dynamics of Flexible Wires in Electrical Installations of the Power Network: Theory and Computational Experiment. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk. 324 p. (in Russian).
4. Ignatov V. V., Miyerikhaimov M. Sh., & Shuntov A. V. (2009) On the Issue of the Methods of Limiting Closed-Circuit Currents in the Electric Power System. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 5, 94–103 (in Russian).
5. Sergey I. I. & Strelyuk M. I. (1999) *Dynamics of Wires in the Power Network Electric Installations During Closed-Circuit Faults: Theory and Computational Experiment*. Minsk, VUZ-UNITY. 252 p. (in Russian).
6. Ponomarenko Ye. G. (2008) Computation of the Distributing Gear Flexible Busbar Electrodynamic Endurance with Employment of the Implicit Scheme. *Energetika. Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 5, 34–45. (in Russian).
7. Sergey I. I. [et al.]. *Designing a Software Program for Electrodynamic Endurance Calculation and Estimation Execution for the JSC 'MOESK'-Aerial Lines at Increasing Levels of the Short-Circuit Currents*. Research Memorandum (Concluding). Minsk: BNTU, 2013. 73 p. (in Russian, Unpublished).
8. Dalle B., & Roussel P. (1979) Mechanical Effects of High Short Circuit Current on Overhead Lines. *IEEE Power Engineering Society, Winter Meet, Prepr.* New York, 1–5.
9. Thomas Y. [et al.]. (1976) *Influence of an Increase in Short-Circuit Currents on the Design of 400 kV Installations of the Electricite de France*. Paris. 20 p. (Preprint/CIGRE; 23–06).
10. Lilien J. L. (1980) *Comparison Between Experimental and Numerical Results on Flexible Conductors*. Paris. 10 p. (Preprint/CIGRE; 23–80 (WG–02) 18–IWD).

Received: 31 August 2015 Accepted: 14 October 2015 Published online: 16 December 2015