

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-503-513>

УДК 621.316.37.064.1

Анализ крутильной стабильности расщепленных фаз

И. И. Сергей¹⁾, Е. Г. Пономаренко¹⁾, Я. В. Потачиц¹⁾, Н. А. Юдина²⁾

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

²⁾Казанский государственный энергетический университет (Казань, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Специфика работы воздушных линий электропередачи связана с тем, что длина проводников между опорными конструкциями может достигать десятков тысяч метров. Провода и их компоненты подвергаются воздействию климатических факторов: ветра, дождя, льда, снега. По сравнению с другими конструктивными элементами проводники имеют самую высокую гибкость и низкую жесткость, потому являются элементами, наиболее чувствительными к этим воздействиям. С начала 50-х гг. XX в. увеличение энергопотребления привело к строительству воздушных линий высокого и сверхвысокого напряжения с расщепленными фазами. Для проводников такого типа на участках между распорками были замечены новые формы колебаний, суть которых заключается в закручивании расщепленной фазы. В результате этого наблюдается нарушение крутильной стабильности фазы: соударение проводов в середине подпролета и трение проволок витого проводника друг о друга, что приводит к повреждению проводников и, как следствие, к нарушению электрооборудования потребителей. Практически на любых воздушных линиях возможно возникновение колебаний проводов в пролете под воздействием ветра. Одним из видов таких механических колебаний является пляска – низкочастотные колебания проводов с амплитудой, достигающей величины стрелы провеса провода, а с учетом возможности удлинения провода и превышающей ее. Колебания при пляске могут вызывать значительные механические усилия и длиться достаточно долго, чтобы привести к разрушению конструктивных элементов линий электропередачи: проводов, изоляторов, арматуры и даже опор. Из-за большой амплитуды колебаний проводники соседних фаз могут сблизиться на недопустимое расстояние, что приведет к короткому замыканию. Поставлена и решена краевая задача расчета крутильной стабильности расщепленной фазы с заданной кратностью расщепления. Определены критические длины подпролетов, при которых наиболее вероятно устойчивое нарушение крутильной стабильности. Разработана компьютерная программа, которая может быть использована при проектировании высоковольтных линий с расщепленной фазой.

Ключевые слова: энергетика, воздушные линии, опорные конструкции, расщепленная фаза, крутильная стабильность, пляска

Для цитирования: Анализ крутильной стабильности расщепленных фаз / И. И. Сергей [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 6. С. 503–513. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-503-513>

Адрес для переписки

Пономаренко Евгений Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Address for correspondence

Panomarenka Yauhen G.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Analysis of the Torsional Stability of Split Phases

I. I. Sergey¹⁾, Y. G. Panamarenka¹⁾, Y. V. Potachits¹⁾, N. A. Yudina²⁾

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

²⁾Kazan State Power Engineering University (Kazan, Russian Federation)

Abstract. The specificity of overhead power lines is associated with the fact that the length of conductors between the supporting structures can reach tens of thousands of meters. Wires and their components are exposed to climatic factors, viz. wind, rain, ice, snow. As compared to other structural elements, conductors are of the highest flexibility and lowest rigidity, and, therefore, they are the most sensitive elements to these effects. Since the early fifties of the XX century, the increase in energy consumption has caused the construction of high and ultra-high voltage overhead lines with split phases. For these types of conductors, new forms of oscillations have been noticed in the areas between the struts, the essence of which is torquing the split phase. As a result, there is a violation of the torsional stability of the phase: collision of wires in the middle of sub-span and friction of wires of stranded conductor against each other, which leads to damaging conductors and, as a consequence, to disruption of power supply to consumers. Almost any overhead lines may be subjected to oscillations of wires in the span under the influence of wind. One of the types of such mechanical oscillations is galloping, i. e. low-frequency oscillations of wires with an amplitude reaching the value of the boom of wire sagging, and, taking into account the possibility of elongation of the wire, even exceeding it. Fluctuations in the galloping can cause significant mechanical forces and last long enough to lead to the destruction of structural elements of power lines, viz. wires, insulators, fittings and even pillars. Due to the large amplitude of oscillations, conductors of neighboring phases can approach each other at an unacceptable distance, resulting in a short circuit. The boundary value problem of the torsional stability calculation of the split phase with a given multiplicity of splitting has been set and solved. The critical lengths of the sub-spans at which the stable violation of torsional stability is most likely have been determined. A computer program has been developed, which can be used in the design of high-voltage lines with split phase.

Keywords: power engineering, overhead lines, support structures, split phase, torsional stability, galloping

For citation: Sergey I. I., Panamarenka Y. G., Potachits Y. V., Yudina N. A. (2019) Analysis of the Torsional Stability of Split Phases. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (6) 503–513. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-503-513> (in Russian)

Введение

Проектирование высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) требует исследования поведения проводов в неблагоприятных климатических условиях: при воздействии ветра, гололеда и электродинамических усилий при коротком замыкании. Практически на любых воздушных линиях (ВЛ) возможно возникновение колебаний проводов в пролете под воздействием ветра [1]. Одним из видов таких механических колебаний является пляска – низкочастотные колебания проводов (0,1–1,0 Гц) с амплитудой, достигающей величины стрелы провеса провода, а с учетом возможности удлинения провода и превышающей ее. Колебания при пляске могут вызывать значительные механические усилия и длиться достаточно долго, приводя к разрушению конструктивных элементов ЛЭП: проводов, изоляторов, арматуры и даже опор. Из-за большой амплитуды колебаний проводники соседних фаз могут сблизиться на недопустимое расстояние, что приведет к короткому замыканию (КЗ).

Основная часть

Как показывает опыт эксплуатации, на ВЛ с расщепленной фазой пляска возникает гораздо чаще [2]. Это объясняется использованием жестких внутрифазных распорок, которые не способствуют гашению колебаний. При пляске расщепленной фазы наиболее часто наблюдаются так называемые субколебания – колебания проводов в субпролетах.

Один из видов субколебаний расщепленных фаз – крутильные колебания, которые могут преобладать по амплитуде по сравнению с другими видами и по этой причине использоваться для количественной оценки устойчивости ВЛ при пляске [2]. При закручивании расщепленной фазы (рис. 1) может утратиться ее крутильная стабильность (закручивание без возврата в исходное состояние). Соударение проводов в середине подпролета и трение проволок витого проводника друг о друга приводит к повреждению проводников (рис. 2) и, как следствие, к нарушению электроснабжения потребителей.

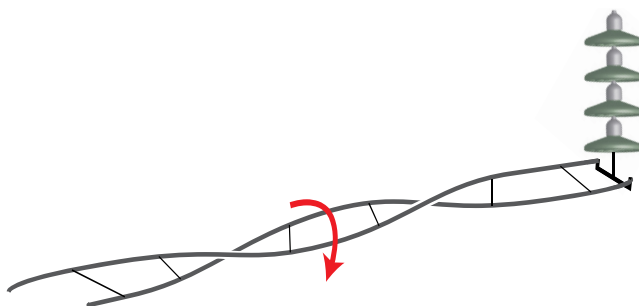


Рис. 1. Закручивание расщепленной фазы

Fig. 1. Split phase twisting



Рис. 2. Повреждение провода в результате субколебаний

Fig. 2. Damage to the wire due to sub-oscillations

Крутильные колебания могут вызываться не только воздействием ветра, но и КЗ. Это касается в первую очередь линий электропередачи сверхвысокого напряжения с расщепленной фазой и установленными дистанционными распорками в фазе [3–5]. Последствия таких колебаний при КЗ аналогичны вышеописанным последствиям при пляске.

При выборе схемы расстановки распорок в пролете актуальной проблемой является исследование крутильной стабильности фазы – ее способно-

сти восстанавливать исходную геометрию после устранения действия внешних сосредоточенных и распределенных моментов, действующих на провода и распорки фазы во время пляски или при КЗ.

Уравнение кручения расщепленной фазы вокруг линии центров масс ее поперечных сечений имеет следующий вид [6]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{f}{I} \frac{\partial \theta}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial s_0^2}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения по проводу волн деформации кручения; θ – угол закручивания провода; I – момент инерции кручения провода вокруг его оси жесткости.

Уравнения пляски расщепленной фазы [7]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \rho h \left[\sin \theta_G \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \cos \theta_G \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 \right] + \delta \frac{\partial y}{\partial t} &= T \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + P + F_y; \\ \rho \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \rho h \left[\cos \theta_G \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \sin \theta_G \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 \right] + \delta \frac{\partial z}{\partial t} &= T \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + F_z; \\ I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + f_c \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho h \left[\cos \theta_G \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - \sin \theta_G \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 \right] &= GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial s_0^2} + M_a - M_\rho, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\theta_G = \theta_0 + \theta; \quad T = T_1; \quad P = P_1; \quad \bar{F} = \bar{F}_1;$$

$$\delta = \delta_1; \quad M_a = M_{a1}; \quad M_\rho = M_{\rho1};$$

ρ – масса единицы длины провода; ρ_1 – то же одного провода; θ_0 – начальный угол оледенения; T_1 , P_1 – тяжение и вес единицы длины провода, даН; $I = nI_c + \rho r_p^2$ – момент инерции 1 м расщепленной фазы; r_p – радиус расщепленной фазы, м.

В процессе постановки краевой задачи динамики расщепленной фазы указанные уравнения дополняются начальными и краевыми условиями, выделяющими единственное решение задачи [8]. Выбор конкретной схемы анализа крутильной стабильности определяется заданием начальных и краевых условий.

Для анализа крутильных колебаний использована расчетная модель расщепленной фазы с сосредоточенными моментами заданной величины и времени действия, прилагаемыми в месте крепления распорки к элементарному проводнику. Это позволяет отказаться от учета внешних распределенных моментов, действующих по длине проводников фазы, а также

значительно упрощает математическую модель и алгоритм компьютерной программы, не оказывая при этом влияния на конечный результат [9]. Следовательно, задача сводится к исследованию крутильных колебаний фазы в схеме с неравномерной в общем случае установкой дистанционных распорок. Для ее решения на кафедре «Электрические станции» Белорусского национального технического университета разработаны методы расчета крутильных колебаний проводов при указанных видах воздействий.

Для анализа крутильной стабильности расщепленной фазы была модифицирована компьютерная программа LINEDYS+ (рис. 3), в которой реализован численный метод расчета динамики проводов при их произвольном расположении в пространстве.

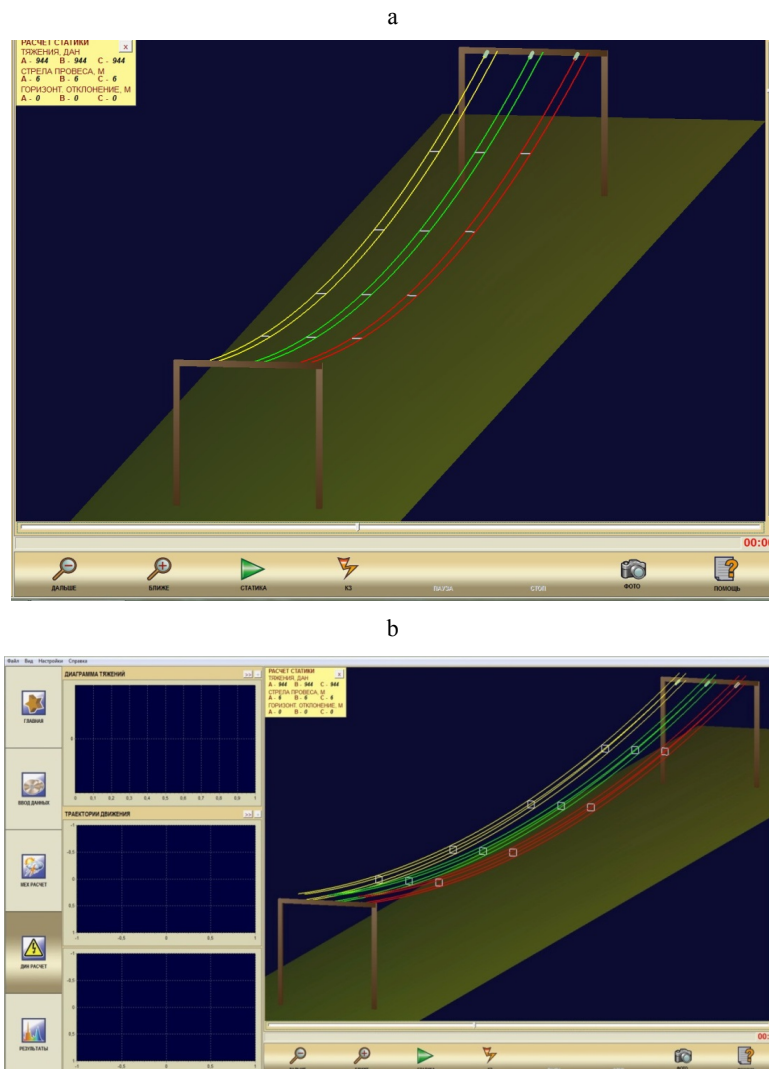


Рис. 3. Внешний вид программы: расщепление фазы на два (а) и четыре (б) проводника
Fig. 3. Appearance of the program: phase splitting into two (a) and four (b) conductors

Критерием крутильной стабильности расщепленной фазы может быть величина угла закручивания провода в каждом из подпролетов [10]. Если она приближается к нулю, то крутильная стабильность в этом подпролете обеспечивается. Таким образом можно проверить все подпролеты расщепленной фазы. При выявлении закручивания проводов необходимо изменить длину подпролета и повторить расчет.

Другим критерием крутильной стабильности может выступать длина подпролета [11]. Очевидно, что в подпролетах небольшой длины скручивание невозможно. Поэтому перед проектировщиком стоит задача расстановки распорок в пролете таким образом, чтобы закручивание проводов изначально было недопустимо. Предполагается, что наиболее вероятным является закручивание проводов в ближайшем к опоре подпролете.

Крайевые условия определяются условиями закрепления расщепленной фазы на опорах и конструктивных элементах. Начальные тяжения проводов определяются решением уравнений статики, полученных из уравнений динамики (2) исключением производных по времени. Возбуждение колебаний расщепленной фазы во времени производится приложением к внутрифазным распоркам крутящего момента, величина которого подбирается экспериментально, с таким расчетом, чтобы кинетической энергии хватило для закручивания фазы относительно своей оси на 180° .

Компьютерная программа позволяет выполнять анализ закручивания расщепленной фазы от двух до четырех проводников (рис. 3). Графическая визуализация процесса расчета позволяет определить, произошло ли закручивание проводов в фазе (рис. 4).

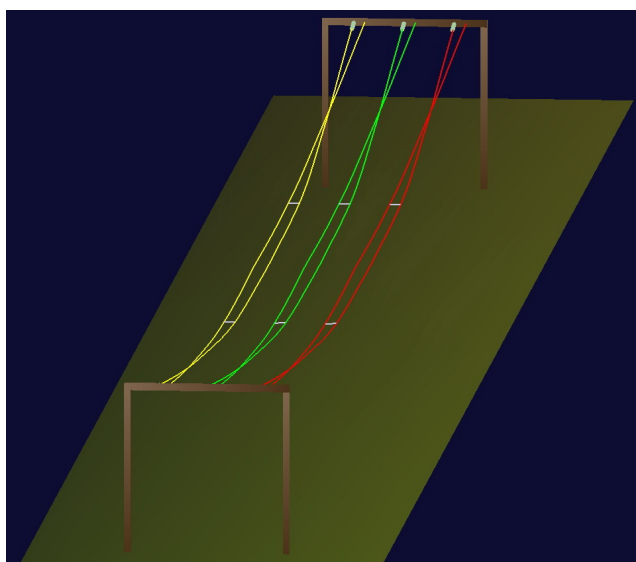


Рис. 4. Закручивание проводников в расщепленной фазе

Fig. 4. Twisting of conductors in the split phase

Для исследования крутильной стабильности расщепленной фазы выбраны пролеты ЛЭП длиной от 100 до 200 м. Нарушение стабильности более вероятно именно в длинных пролетах.

С помощью компьютерной программы исследовалось влияние различных параметров пролета (длина пролета L , длина подпролета l , начальная стрела провеса f_0 и тяжение T_0 , масса провода p и шаг расщепления h) на крутильную стабильность фазы. Результаты представлены в табл. 1–6.

Таблица 1

**Крутильная стабильность расщепленной фазы
 в зависимости от числа распорок в пролете**
**Torsional stability of the split phase depending
 on the number of struts in the span**

$L, \text{ м}$ \ N	1	2	3	4	5	6	7
100							
150							
200							

Таблица 2

**Крутильная стабильность расщепленной фазы
 в зависимости от стрелы провеса и числа распорок в пролете**
**Torsional stability of the split phase depending on the sag boom
 and the number of struts in the span**

$f_0, \%$ \ N	1	2	3	4	5	6	7
2							
3							
4							
5							

Таблица 3

**Крутильная стабильность расщепленной фазы
 в зависимости от марки провода и числа распорок в пролете**
**Torsional stability of the split phase depending on the brand of the wire
 and the number of struts in the span**

Марка \ N	1	2	3	4	5	6	7
АС-185							
АС-300							
АС-400							

Переменным параметром выступает количество распорок в пролете N , так как именно от этого параметра зависит длина подпролета. Все распорки расставлены по пролету равномерно через одинаковые интервалы по длине.

Таблица 4

**Крутильная стабильность расщепленной фазы
в зависимости от шага расщепления и числа распорок в пролете
Torsional stability of the split phase depending on the splitting step
and the number of struts in the span**

N $h, \text{ м}$	1	2	3	4	5	6	7
0,1							
0,2							
0,4							
0,7							
1,0							

Таблица 5

**Критическая длина подпролета $l_{кр}$ для пролета ЛЭП длиной 200 м
Critical length of the sub-span $l_{кр}$ for a 200 m long power line span**

$l, \text{ м}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$l, \%$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Зона $l_{кр}$				$l_{кр}$						

Таблица 6

**Критическая длина подпролета $l_{кр}$ для пролета ЛЭП длиной 100 м
Critical length of the sub-span $l_{кр}$ for a 100 m long power line span**

$l, \text{ м}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	80
$l, \%$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Зона $l_{кр}$				$l_{кр}$						

На первом этапе исследования проводились для фазы, расщепленной на два провода. В табл. 1–4 заливкой ячеек показаны случаи нарушения крутильной стабильности. Если ячейка пустая – перекручивания проводников не наблюдалось или они возвратились в исходное положение. Расчеты по программе производились для продолжительности процесса от 25 до 100 с, что соответствует практически полному успокоению колебаний.

Исследования показали, что изменение параметров пролета и провода мало влияет на возможность закручивания проводников в фазе. Чем больше количество распорок, тем меньше вероятность закручивания фазы. Следует отметить, что в большинстве расчетных случаев наблюдалось скручивание фазы, однако после прекращения воздействия вращающего момента провода фазы возвращались в исходное состояние, поэтому их нельзя считать случаями нарушения крутильной стабильности. Но следует понимать, что даже при неустойчивом перекручивании фазы возможны

соударение и трение проводников в средней части подпролета, что в конечном итоге может привести к последствиям, показанным на рис. 2.

В пролете длиной 200 м нарушение крутильной стабильности наблюдалось при двух и трех комплектах распорок (табл. 1), поэтому в дальнейших расчетах целесообразно рассматривать именно такой пролет.

Как видно из табл. 2, стрела провеса практически не влияет на возможность закручивания расщепленной фазы. Лишь при $f_0 = 2\%$ нарушения крутильной стабильности не наблюдалось, вероятно, из-за большого натяжения проводников, которые, подобно струне, стремились вернуться в исходное положение.

Из анализа результатов расчета можно сделать вывод, что критическими, с точки зрения нарушения крутильной стабильности, являются длины первого и последнего подпролетов l , если каждая из них составляет примерно от четверти до трети длины всего пролета L . Руководствуясь таким предположением, для повышения крутильной стабильности можно предложить расставлять распорки неравномерно по длине пролета: гуще у опор и реже в центральной части. В этом случае актуальной задачей является определение критической длины подпролета $l_{кр}$, при которой возможно закручивание проводников в расщепленной фазе. Для решения этой задачи использована расчетная схема расщепленной фазы, в которой установлены две распорки, равноудаленные от опор. Затем в процессе проведения вычислительного эксперимента пошагово изменялось местоположение распорок с целью определения критических значений длины подпролета. Результаты представлены в табл. 5.

Расчеты показали, что критической для крайних подпролетов является длина от 50 до 84 м, или 25–42 % от всей длины пролета (200 м).

Аналогичные расчеты были проведены и для пролета длиной 100 м (табл. 6). Критическим оказался участок 24–40 %.

Основываясь на результатах проведенных расчетных экспериментов, можно заключить, что если первый от опоры подпролет будет иметь длину 20 % и менее от всей длины пролета, то крутильная стабильность не будет нарушена.

Подобные исследования проведены и для фазы, расщепленной на четыре провода. Однако при изменении параметров пролета и проводов в широком диапазоне выявить случаи закручивания фазы не удалось. Поэтому можно сделать предположение, что вероятность нарушения крутильной стабильности в подобных конструкциях мала.

Итогами проведенных исследований являются: разработка методики расчета крутильных колебаний в расщепленной фазе; модификация компьютерной программы в соответствии с разработанной методикой; определение возможности и условий нарушения крутильной стабильности в расщепленной фазе. Указанную компьютерную программу можно рекомендовать как инструмент для помощи в принятии проектных решений при конструировании расщепленных фаз воздушных ЛЭП и гибкой ошиновки ОРУ.

Авторы планируют расширить диапазон своего исследования и выявить, как на крутильную стабильность расщепленной фазы влияет установка демпфирующих распорок.

ВЫВОДЫ

1. Поставлена и решена краевая задача расчета крутильной стабильности расщепленной фазы с заданной кратностью расщепления.
2. Определены критерии крутильной стабильности для ВЛ с расщепленными фазами.
3. Выявлены случаи устойчивого нарушения крутильной стабильности расщепленных фаз.
4. Определены критические длины подпролетов, при которых наиболее вероятно устойчивое нарушение крутильной стабильности.
5. Разработанная компьютерная программа может быть использована при проектировании высоковольтных линий с расщепленной фазой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов, С. В. Гасители пляски спирального типа / С. В. Колосов, С. В. Рыжов, В. А. Фельдштейн // Современное состояние эксплуатации проектирования и строительства ВЛ: материалы Четвертого междунар. электроэнерг. семинара. М.: ИАЦ «Энергия», 2010. С. 96–103.
2. Блинов, И. В. Демпфирующие распорки как эффективное средство предупреждения пляски, гашения колебаний и вибрации проводов ВЛ высокого напряжения / И. В. Блинов // Электрические сети и системы. 2011. № 4. С. 35–38.
3. State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers: Part 1 – General Description [Electronic resource] / CIGRE – SC22 WG11_TF5. Mode of Access: <https://ru.scribd.com/document/212413985/CIGRE-1>.
4. State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers: Part 2 – Technical Aspects [Electronic resource] / CIGRE – WG 22.11 TF5 DRAFT November 2002 22-00(WG11-TF5)-75. Mode of access: <https://www.semanticscholar.org/paper/STATE-OF-THE-ART-SURVEY-ON-SPACERS-AND-SPACER-PART-Cloutier/ab869c5796ee59c696d601cd00c3a6108c663acc>.
5. State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers: Part 3 – Experience with Current Practice [Electronic resource] / CIGRE – Task force B2.11.05, Draft May 2003, Version 9. Mode of access: <https://ru.scribd.com/document/349324172/Spacer-Damper-Issues>.
6. Сергей, И. И. Динамика гибких проводов электроустановок энергосистем: Теория и вычислительный эксперимент: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / И. И. Сергей. Минск, 2002. 324 л.
7. Вычислительный эксперимент и полевые наблюдения пляски расщепленных фаз при наличии гасителей колебаний / И. И. Сергей [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2007. № 1. С. 5–15.
8. Сергей, И. И. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами / И. И. Сергей, Ю. В.Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
9. Пономаренко, Е. Г. Методы расчета и анализ электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками: дис. ... к-та техн. наук: 05.14.02 / Е. Г. Пономаренко. Минск, 2010. 151 л.
10. Horowitz, S. H. Power System Relaying / S. H. Horowitz, A. G. Phadke, J. K. Niemira. John Wiley & Sons, 2014. 399 p.

11. Александров, Г. Н. Движение проводов расщепленной фазы воздушной линии при коротких замыканиях / Г. Н. Александров, И. П. Щеглов, И. Ф. Половой // Электричество. 1980. № 6. С. 12–18.

Поступила 26.06.2019 Подписана в печать 02.09.2019 Опубликовано онлайн 29.11.2019

REFERENCES

1. Kolosov S. V., Ryzhov S. V., Fel'dshtein V. A. (2010) Suppressors of Galloping of Spiral Type. *Sovremennoe Sostoyanie Eksploataatsii Proektirovaniya i Stroitel'stva VL: (Materialy Chetvertogo Mezhdunarodnogo Elektroenergeticheskogo Seminara)* [Current State of Operation of Design and Construction of Overhead Lines: (Materials of the Fourth International Electric Power Seminar)]. Moscow, IAC "Energy", 96–103 (in Russian).
2. Blinov I. V. (2011) Damping Struts as an Effective Means of Preventing Galloping, of Vibrations Suppressing and Suppressing Oscillations and Vibrations of Conductors of Overhead Power Lines High Voltage. *Elektricheskie Seti i Sistemy* [Electrical Networks and Systems], (4), 35–38 (in Russian).
3. CIGRE – SC22 WG11_TF5. *State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers: Part 1 – General Description*. Available at: <https://ru.scribd.com/document/212413985/CIGRE-1>.
4. CIGRE – WG 22.11 TF5 DRAFT November 2002 22-00(WG11-TF5)-75. *State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers: Part 2 – Technical Aspects*. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/STATE-OF-THE-ART-SURVEY-ON-SPACERS-AND-SPACER-PART-Cloutier/ab869c5796ee59c696d601cd00c3a6108c663acc>.
5. CIGRE – Task Force B2.11.05, Draft May 2003, Version 9. *State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers: Part 3 – Experience with Current Practice*. Available at: <https://ru.scribd.com/document/349324172/Spacer-Damper-Issues>.
6. Sergei I. I. (2002) *Dynamics of Flexible Wires of Electrical Installations of Power Systems: Theory and Computational Experiment*. Minsk. 324 (in Russian).
7. Serguey I. I., Klimkovich P. I., Vinogradov A. A., Lillienne J. (2007) Calculative Experiment and Field Observations of Split Phase Galloping with Oscillation Damper. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 5–15 (in Russian).
8. Sergey I. I., Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Barrage Balls. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 299–309 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
9. Ponomarenko E. G. (2010) *Methods of Calculation and Analysis of Electrodynamical Resistance of Current-Carrying Structures with Flexible Conductors*. Minsk. 151 (in Russian).
10. Horowitz S. H., Phadke A. G., Niemira J. K. (2014) *Power System Relaying*. Fourth ed. John Wiley & Sons. 399.
11. Aleksandrov G. N., Shcheglov I. P., Polovoi I. F. (1980) Movement of Wires of the Split Phase of the Overhead Line at Short Circuits. *Elektrichestvo* [Electricity], (6), 12–18 (in Russian).

Received: 26 June 2019 Accepted: 2 September 2019 Published online: 29 November 2019