

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-432-439>

УДК 621.311

## Проектирование больших переходов воздушных линий электропередачи

М. А. Короткевич<sup>1)</sup>, Н. А. Прокофьева<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Установлено, что напряжения в низших точках провеса провода или троса и в точках их подвеса на опорах в одном и том же пролете, определенные в соответствии со свойствами идеально гибкой нити (подобно которой и располагаются провода и тросы в пролете), различаются незначительно и учет разности отмеченных значений имеет лишь методическое значение. В статье представлены результаты расчета стрелы провеса провода и троса больших пролетов линии электропередачи длиной 500 м и более с использованием как традиционной теории цепной линии, так и теории цепи равного сопротивления, когда считается переменной по длине пролета площадь поперечного сечения провода или троса, пропорциональная их натяжению, при которой обеспечивается одинаковая вероятность их разрыва в любой точке пролета. При расчете проводов и тросов в нормальных и аварийных режимах определены наибольшие стрелы провеса, которые имеют место или при высшей температуре окружающего воздуха, или при нагрузке провода гололедом. Провод должен быть смонтирован так, чтобы обеспечивались нормированные допускаемые габариты до пересекаемых инженерных сооружений, водных преград или земли, устанавливаемые в зависимости от номинального напряжения линии. Отмечено, что значения стрел провеса провода и троса, определенные с использованием теории цепной линии для переходных пролетов, меньше по сравнению с данными, полученными на основе теории цепи равного сопротивления. Это необходимо учитывать в процессе проектирования.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, большой переход, водная преграда, габарит, стрела провеса

**Для цитирования:** Короткевич, М. А. Проектирование больших переходов воздушных линий электропередачи / М. А. Короткевич, Н. А. Прокофьева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 5. С. 432–439. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-432-439>

## Design of Large Connectors of Overhead Power Lines

М. А. Korotkevich<sup>1)</sup>, N. A. Prokofieva<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** It is found that the voltage at the lowest points of the wire or cable sag and at the points of their suspension on the pillars in the same span, determined in accordance with the properties of a perfectly flexible filament (similar to which the wires and cables are located in the span), differ slightly, and taking the difference of the mentioned values into account is only of methodology-

---

### Адрес для переписки

Короткевич Михаил Андреевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-65-82  
elsyst@tut.by

### Address for correspondence

Korotkevich Mishail A.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-65-82  
elsyst@tut.by

---

cal importance. The article presents the results of the calculation of wire and cable sag of large spans of power transmission line of 500 m or more length using both the traditional theory of the catenary line and the theory of equal resistance, when the cross-sectional area of a wire or cable, proportional to their tension, is considered variable in the span length, which provides the same probability of breaking them at any point of the span. When calculating the wires and cables in normal and emergency conditions, the largest sags are determined, which take place either at a higher ambient temperature or at a load of the wire with ice. The wire must be mounted in such a way as to ensure the normalized permissible dimensions to crossed engineering structures, water barriers or land, that are determined depending on the nominal voltage of the line. It is noted that the values of the wire and cable sags determined using the theory of the catenary line for the transition spans are less (although slightly) as compared to the data obtained on the basis of the theory of the equal resistance circuit. This must be taken into account in the design process.

**Keywords:** overhead transmission line, a large transition, water barrier, dimension, sag

**For citation:** Korotkevich M. A., Prokofieva N. A. (2018) Design of Large Connectors of Overhead Power Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (5) 432–439. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-432-439> (in Russian)

## Введение

Передача и распределение электрической энергии в Республике Беларусь осуществляются по воздушным (более 87 %) и кабельным линиям электропередачи [1]. Надежное электроснабжение потребителей зависит от механической прочности указанных линий электропередачи. При наличии больших пролетов (500 м и более), сооружаемых при пересечениях воздушными линиями электропередачи широких водных пространств (судоходных и несудоходных рек, заливов, водохранилищ), стрела провеса может достигать нескольких десятков метров, что усложняет возможность обеспечения требуемого [2] габарита, т. е. расстояния от нижней точки провода до наибольшего уровня паводковых вод. Существующая методика расчета основана на теории цепной линии применительно к идеальной гибкой нити, одно из свойств которой – возможность уравнивания тяжения в любой точке массой отрезка такой же нити, опущенной из данной точки до оси абсцисс [3–8]. В реальных условиях масса провода указанной длины, составляющая несколько килограммов, не уравновесит тяжение по проводу, равное нескольким тысячам ньютонов. Сказанное обуславливает рассмотрение других подходов к определению стрелы провеса проводов, например в соответствии с теорией цепи равного сопротивления [9], и сравнение результатов с данными, получаемыми по традиционной методике.

## Определение стрелы провеса провода в соответствии с теорией цепной линии

При использовании теории цепной линии провода и тросы воздушных линий рассматриваются как идеальные гибкие равномерно нагруженные собственным весом нити. Под действием собственного веса провод провисает подобно идеальной гибкой нити.

Нить – это пространственная материальная линия, которая под действием внешних сил может принимать любую форму. Нить считается однородной, если ее масса распределена равномерно по длине, и идеальной, если

она не сопротивляется изгибу и кручению [10]. При отмеченных условиях идеальная гибкая нить принимает очертания цепной линии (рис. 1).

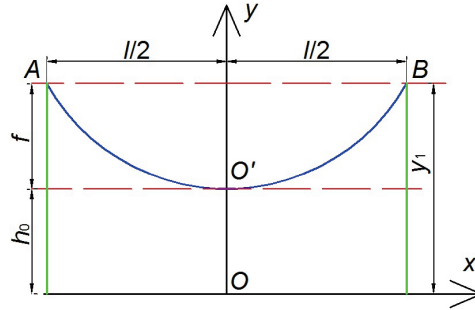


Рис. 1. Кривая провисания провода:  $l$  – длина пролета;  $f$  – стрела провеса;  $h_0$  – габарит (расстояние от нижней точки провода до оси  $x$ );  $y_1$  – высота опоры  
Fig. 1. The curve of wire sag:  $l$  – length of span;  $f$  – sag;  $h_0$  – dimension (distance from the lowest point of the wire to the  $x$ -axis);  $y_1$  – height of the pillar

Напряжение в любой точке провода возникает только за счет растягивающего усилия, направленного по касательной к кривой провисания провода в этих точках, и находится из уравнения [5, 11]

$$\sigma - \frac{\sigma}{\gamma\beta} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma} \frac{1}{\frac{\sigma_m}{\gamma_m} \operatorname{sh} \frac{\gamma_m l}{2\sigma_m}} = \sigma_m - \frac{1}{\beta} - \frac{\alpha}{\beta} (t - t_m), \quad (1)$$

где  $\sigma$ ,  $\sigma_m$  – напряжение и допустимое напряжение в материале провода или троса в одном из известных режимов соответственно (рассматриваются режимы максимальных нагрузок, минимальной температуры и среднегодовых условий);  $\gamma$  – удельная механическая нагрузка от действия собственного веса, собственного веса и гололеда, собственного веса, гололеда и ветра;  $\gamma_m$  – то же, соответствующая известному режиму, приходящаяся на единицу длины и единицу площади поперечного сечения провода;  $\beta$ ,  $\alpha$  – коэффициент упругого удлинения и температурного расширения;  $t$ ,  $t_m$  – температура, характерная для рассчитываемого или известного режима.

После разложения гиперболического синуса в ряд и оставления в ряду разложения двух первых членов формула примет вид

$$\sigma - \frac{\gamma^2 l^2}{24\sigma^2\beta} = \sigma_m - \frac{\gamma_m^2 l^2}{24\sigma_m^2\beta} - \frac{\alpha}{\beta} (t - t_m). \quad (2)$$

Для одного пролета линии уравнение провисания провода в виде цепной линии записывается следующим образом:

$$y = h_0 \operatorname{ch} \frac{x}{h_0}. \quad (3)$$

Если провод закрепить в точке  $A$  (рис. 1), то для обеспечения состояния равновесия в точках  $B$  или  $O'$  необходимо приложить нагрузку, равную тяжению по проводу:

$$T_B = \gamma y_1 F = \sigma_B F; T_{O'} = \gamma h_0 F = \sigma_0 F, \quad (4)$$

где  $\sigma_{O'}$ ,  $\sigma_B$  – напряжение в проводе в точках  $B$  и  $O'$ .

Из (4) видно, что тяжение и напряжение в точке  $B$  больше, чем в точке  $O'$ , так как ордината  $y_1 > h_0$  ( $\sigma_B = \sigma_{O'} + \gamma f$ ).

Оценим значение разности тяжений ( $T_B - T_{O'}$ ) для длинных пролетов в зависимости от стрелы провеса провода или троса. Удельную нагрузку  $\gamma$  примем равной:  $7,788 \cdot 10^{-3}$  даН/(м·мм<sup>2</sup>) – для сталеалюминиевого провода АС 300/204;  $18,56 \cdot 10^{-3}$  даН/(м·мм<sup>2</sup>) – для стального троса ТК 19,0.

Расчеты по формулам (4) показали, что разность тяжений в нижней точке провисания провода или троса и верхних точках их подвеса незначительна и составляет: 0,038–1,380 даН – для проводов; 0,05–2,08 даН – для тросов.

Стрелу провеса провода определим из выражения

$$f = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_{O'}} + \frac{\gamma^3 l^4}{384\sigma_{O'}^3}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{O'} = 25,4$  даН/мм<sup>2</sup> – для АС 300/204 и  $60$  даН/мм<sup>2</sup> – для ТК 19,0.

Выражение (5) получено из (3) в результате разложения  $\operatorname{ch} \frac{x}{h_0}$  в ряд и оставления в ряду разложения первых двух членов. При оставлении в ряду разложения только первого члена стрела провеса определится как

$$f = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_{O'}}. \quad (6)$$

Разница полученных значений стрел провеса, приведенных в табл. 1, определенных по (5) и (6), для провода АС 300/204 не превышает 1,38 %, а для троса ТК 19,0 – 2,54 %. Это указывает на допустимость расчета стрелы провеса провода и троса по упрощенной формуле (6) для габаритных длин пролета.

Таблица 1

**Значения стрел провеса провода и троса с точкой подвеса на одинаковой высоте**  
**The values of the of the sags of wire and cable that have suspension points at the same height**

Длина пролета, м	Стрела провеса провода или троса, м, определенная по формулам					
	для провода			для троса		
	(5)	(6)	(7)	(5)	(6)	(7)
500	6,545	6,635	6,547	5,947	5,895	5,948
600	10,207	10,321	10,211	9,310	9,204	9,313
700	14,815	14,943	14,824	13,688	13,505	13,695
1000	33,870	33,981	33,922	32,720	32,199	32,766
1500	81,791	81,650	82,119	81,918	80,448	82,246
2000	149,546	148,648	150,686	146,077	148,632	153,026
2500	237,408	234,851	240,368	242,600	236,438	245,772

### Расчет стрелы провеса провода или троса в соответствии с теорией цепи равного сопротивления

В [9] для расчета параметров больших переходов воздушных линий электропередачи предложена теория цепи равного сопротивления. Цепью равного сопротивления называется цепь переменной толщины, у которой толщина в каждой точке пропорциональна натяжению и вероятность разрыва во всех ее точках одинакова.

Стрела провеса провода, подвешенного на одинаковой высоте (рис. 1), определяется по формуле [9]

$$f = -\frac{\sigma}{\gamma} \ln \cos \frac{\gamma l}{2\sigma}. \quad (7)$$

Значения стрел провеса, определенные по (7), даны в табл. 1. Приведенные в табл. 1 результаты расчета стрел провеса для провода АС 300/204 и троса ТК 19,0, подвешенных на одинаковой высоте, определенные с использованием теории цепной линии по (5) и (6), дают меньшие (на 2,4 % для провода, на 3,9 % для троса) величины по сравнению со значениями, полученными на основе теории цепи равного сопротивления (7).

Незначительная разность тяжений стрел провеса провода и троса при длинах пролетов до 1500 м обуславливает проведение расчетов стрел провеса по (6), т. е. считается [6, 7], что горизонтальная составляющая тяжения в любой точке провода или троса остается неизменной.

Если точки подвеса провода расположены на неодинаковой высоте (рис. 2), то напряжения в материале провода в точках *B* и *O* будут различны. При значительной разности высот принимают напряжение в высшей точке *B* на 10 % больше напряжения в низшей точке провисания провода *O* [11].

Значения отмеченных на рис. 2 величин определяются по формулам [8, 11]:

$$x_1 = -\frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arctg} \frac{\Delta h}{l}; \quad (8)$$

$$x_0 = l - \frac{l_{\text{в1}}}{2}; \quad (9)$$

$$l_{\text{в1}} = l + \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsh} \frac{\Delta h \gamma}{\gamma \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0}}; \quad (10)$$

$$l_{\text{в2}} = l - \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsh} \frac{\Delta h \gamma}{\gamma \sigma_0 \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0}}. \quad (11)$$

Зависимость между напряжениями в проводе в точках *B* и *O* имеет вид [11]

$$8l^2 \sigma_B \sigma_0 = 8l^2 \sigma_0^2 + \gamma^2 l^4 + 4\gamma^2 l^2 \Delta h \sigma_0 + 4\sigma_0^2 \Delta h^2, \quad (12)$$

где  $\Delta h = 2-10$  м.

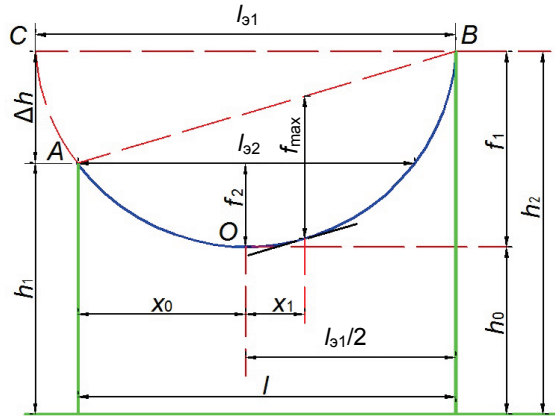


Рис. 2. Провисание провода в пролете при разной высоте точек подвеса:  $l$  – длина пролета;  $l_{31}, l_{32}$  – большой и малый эквивалентные пролеты;  $h_1, h_2$  – высота опоры;  $\Delta h$  – разность высот точек подвеса провода;  $f_1, f_2$  – стрела провеса проводов, соответствующая большому и малому эквивалентным пролетам;  $f_{\max}$  – наибольшая стрела провеса провода;  $x_0$  – расстояние от нижней опоры  $h_1$  до провеса провода, соответствующего малому эквивалентному пролету;  $x_1$  – расстояние от провеса провода, соответствующего малому эквивалентному пролету, до максимального провисания провода в пролете

Fig. 2. The sagging of the wire in the span that have a different height of suspension points:  $l$  – length of span;  $l_{31}, l_{32}$  – large and small equivalent spans;  $h_1, h_2$  – height of the pillar;

$\Delta h$  – difference of the heights of points of suspension of a wire;  $f_1, f_2$  – sags of wires corresponding to the large and small equivalent spans;  $f_{\max}$  – greatest sag of a wire;  $x_0$  – distance from the lower pillar  $h_1$  to the wire sag, corresponding to the small equivalent span;  $x_1$  – distance from the wire sag, corresponding to the small equivalent span to the maximum sagging of the wire in the span

Стрелы провеса провода, соответствующие большому и малому эквивалентным пролетам, можно определить по формулам [8]:

$$f_1 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{l_{31}\gamma}{2\sigma_0} - 1 \right); \quad f_2 = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left( \operatorname{ch} \frac{l_{32}\gamma}{2\sigma_0} - 1 \right). \quad (13)$$

Используя (6), получим:

$$f_1 = \frac{l_{31}^2 \gamma}{8\sigma_0}; \quad f_2 = \frac{l_{32}^2 \gamma}{8\sigma_0}. \quad (14)$$

В соответствии с [9] формулы (14) имеют вид:

$$f_2 = -\frac{\sigma}{\gamma} \ln \cos \frac{\gamma x_0}{\sigma}; \quad f_1 = f_2 + \Delta h. \quad (15)$$

Наибольшая стрела провеса провода  $f_{\max}$  будет в той точке кривой провисания провода, где касательная к нему параллельна прямой  $AB$ , и определяется по выражению

$$f_{\max} = h_2 - h_0 - \frac{\Delta h}{l} (l - x_0 - x_1) + \frac{\sigma}{\gamma} \ln \cos \frac{\gamma x_0}{\sigma}. \quad (16)$$

Результаты расчета по формулам (14)–(16) приведены в табл. 2 для провода марки АС 300/204 и стального троса ТК 19,0, подвешенных на опорах с разностью высот  $\Delta h = 10$  м.

Таблица 2

**Значения стрел провеса провода и троса при неодинаковой высоте точек подвеса**  
The values of the of the sags of wire and cable that have suspension points at different heights

Длина пролета, м	Стрела провеса провода или троса, м, определенная по формулам												
	для провода							для троса					
	(14)		(13)		(15)		(16)	(14)		(13)		(15)	
	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$	$f_{max}$	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$
500	30,7	20,7	30,8	20,8	30,9	20,9	25,6	29,2	19,3	29,4	19,4	29,4	19,4
600	35,8	25,9	36,0	26,0	36,1	26,1	30,9	34,3	24,3	34,4	24,4	34,4	24,5
700	41,0	31,1	41,2	31,2	41,3	31,3	36,1	39,3	29,3	39,4	29,4	39,5	29,5
1000	56,6	46,7	56,8	46,8	57,0	47,0	51,8	54,3	44,4	54,5	44,5	54,7	44,7
1500	82,0	72,1	82,3	72,3	82,6	72,6	77,5	79,5	69,5	79,8	69,8	80,0	72,0
2000	108,0	98,1	108,4	98,4	108,8	98,8	103,7	104,6	94,7	105,0	95,0	105,3	95,3
2500	134,1	124,1	134,6	124,6	135,0	125,0	129,9	129,8	119,9	130,3	120,3	130,7	120,7

Значения стрел провеса провода АС 300/204 и троса ТК 19,0 с разной высотой точек подвеса в пролете, определенные с использованием теории цепной линии (формулы (13), (14)), дают меньшие значения (на 0,7 %) по сравнению со значениями, полученными на основе теории цепи равного сопротивления (формула (15)).

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что напряжение в низших точках провеса провода или троса и в точках их подвеса на опорах различаются незначительно и учет разности отмеченных величин имеет лишь методическое значение.

2. Установлено, что при подвесе на одной и на разной высотах в пролете провода или троса стрелы провеса, определенные с использованием теории цепной линии для переходных пролетов длиной 500 м и более, дают меньшие значения по сравнению с величинами, полученными на основе теории цепи равного сопротивления. Следовательно, при более высоких значениях стрелы провеса труднее обеспечить требуемый габарит до пересекаемых сооружений, водных объектов или земли.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Достижения белорусских энергетиков / ГПО «Белэнерго». Минск: Экономэнерго, 2016. 452 с.
2. 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 приемно-сдаточных испытаний: ТКП 339–2011 (02230). Минск: Минскэнерго, 2011. 596 с.

3. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. Минск: Технопринт, 2004. 720 с.
4. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети: проектирование / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. Минск: Вышэйш. шк., 1988. 308 с.
5. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. 312 с.
6. Бошнякович, А. Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1971. 295 с.
7. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1975. 236 с.
8. Короткевич, М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть / М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2010. 572 с.
9. Горин, В. Я. Новая методика расчета параметров больших переходов воздушных ЛЭП / В. Я. Горин, Н. Н. Давидсон // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Електротехніка і енергетика. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2004. Вып. 79. С. 74–77.
10. 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.
11. Глазунов, А. А. Работа и расчет проводов и тросов / А. А. Глазунов. М.: Госэнергоатомиздат, 1956. 191 с.

Поступила 15.01.2018 Подписана в печать 07.05.2018 Опубликовано онлайн 28.09.2018

#### REFERENCES

1. "Belenergo" SIA (2016) *Achievements of Belarusian Power Engineers*. Minsk, Ekonomenergo. 452 (in Russian).
2. ТКР 339–2011 (02230). *Electrical Installations for Voltage up to 750 kV. Overhead Power Transmission Lines and Current Lines, Distribution Devices and Transformer Substations, Electric Power and Accumulator Installations, Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Rules of the Preparation and Protective Measures of Electrical Safety. Electricity Metering. Norms of Acceptance Tests*: Minsk, Minskenergo, 2011. 596 (in Russian).
3. Pospelov G. E., Fedin V. T., Lychev P. V. (2004) *Electrical Systems and Networks*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 720 (in Russian).
4. Pospelov G. E., Fedin V. T. (1988) *Electrical Systems and Networks: Design*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 308 (in Russian).
5. Kryukov K. P., Novgorodtsev B. P. (1979) *Design and Mechanical Calculation of Power Lines*. Leningrad, Energiya Publ., Leningrad Branch. 312 (in Russian).
6. Boshnyakovich A. D. (1971) *Mechanical Calculation of Wires and Cables of Power Lines*. Leningrad, Energiya Publ., Leningrad Branch. 295 (in Russian).
7. Boshnyakovich A. D. (1975) *Calculation of Wires, Substations and Large Power Lines Transition*. Leningrad, Energiya Publ., Leningrad Branch. 236 (in Russian).
8. Korotkevich M. A. (2010) *Design of Power Lines. Mechanical Section*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 572 (in Russian).
9. Gorin V. Ya., Davidson N. N. (2004) New Method of Calculation of Parameters of Large Transitions of Overhead Power Lines. *Naukovi Pratsi Donets'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: "Elektrotekhnika i Energetika"* [Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series: "Electrical Engineering and Power Engineering"]. Donetsk, Donetsk National Technical University, (79), 74–77 (in Russian).
10. Sergey I. I., Strelyuk M. I. (1999) *Dynamics of Wires of Electrical Installations of Power Systems in Cases of Short Circuits: Theory and Computational Experiment*. Minsk, VUZ-YuNITY Publ. 252 (in Russian).
11. Glazunov A. A. (1956) *Work and Calculation of Wires and Cables*. Moscow, Gosenergoatomizdat Publ. 191 (in Russian).

Received: 15 January 2018 Accepted: 7 May 2018 Published online: 28 September 2018