

УДК 621.315/316.351.064

РАСЧЕТ СИЛ СЖАТИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ РАСПОРОК РАСЩЕПЛЕННЫХ ФАЗ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Докт. техн. наук, проф. СЕРГЕЙ И. И., асп. ПОТАЧИЦ Я. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: power.st@mail.ru

CALCULATION OF AERIAL CABLE SPACER COMPRESSION FORCES IN BUNDLED PHASES DURING SHORT CIRCUIT FAULT

SERGEY I. I., POTACHITS Ya. V.

Belarusian National Technical University

Излагается приближенный метод расчета параметров электродинамической стойкости гибкой ошиновки с расщепленными фазами. Приводится сопоставление результатов приближенного расчета с компьютерными расчетами по программе FAZA. Дается оценка допустимых сил сжатия распорок проектируемых современных типовых распределительных устройств 330 и 500 кВ. Предлагается алгоритм определения параметров динамики расщепленной фазы с учетом влияния упруго-вязких характеристик демпфирующих распорок.

Ключевые слова: динамика токоведущих конструкций, электродинамическая стойкость, максимальные тяжения, силы сжатия, математическое моделирование, расщепленные фазы, дистанционная распорка.

Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

The paper presents an approximate method for calculation of electrodynamic resistance parameters of a flexible bus-bar with bundled phases. Comparison of the approximate calculation results with the computer calculations using a FAZA software tool has been given in the paper. An evaluation of permissible aerial cable spacer compression forces for designed modern standard distribution substations of 330 and 550 kV has been provided in the paper. The paper proposes an algorithm for determination of dynamics parameters in a bundled phase with due account of influence pertaining to viscoelastic characteristics of damping spacers.

Keywords: dynamics of current-carrying structure, electrodynamic resistance, maximum tension, compression forces, mathematical simulation, bundled phases, расщепленные фазы, aerial cable spacer.

Fig. 3. Tab. 2. Ref.: 8 titles.

В открытых распределительных устройствах (ОРУ) высокого и сверх-высокого напряжения широко применяется гибкая ошиновка с расщепленными фазами. Это позволяет ограничить коронирование проводов и увеличить их пропускную способность. Особенностью поведения расщепленных фаз при коротком замыкании (КЗ) является слипание составляющих фазу

проводов на большей части пролета, вызванное большими токами КЗ. Развитие современных энергосистем сопровождается ростом токов КЗ. На ряде действующих электростанций и подстанций в России и Беларуси они перешагнули рубеж в 40 кА (действующее значение) на стороне 110–330 кВ. При разработке типовых конструкций ОРУ 330 кВ в проектных организациях Российской Федерации в качестве расчетного уже принимается ток КЗ величиной 63 кА. Ожидается рост токов КЗ и в Республике Беларусь в связи со строительством АЭС мощностью 2300 МВт, выдача мощности которой будет производиться на напряжении 330 кВ [1].

При токах КЗ более 40 кА механические усилия и смещения проводов могут оказывать решающее влияние на конструктивное выполнение гибкой ошиновки с расщепленными фазами. В связи с этим возникла необходимость в исследовании динамики расщепленной фазы при КЗ. Указанные исследования в международном формате проводились в рамках СИГРЭ и МЭК по двум направлениям: экспериментальные в опытных пролетах и теоретические. Их результаты обобщены в публикациях рабочей группы В2 «Воздушные линии» СИГРЭ и проекте международного стандарта [2].

Ключевым допущением при оценке динамики расщепленных фаз является ее представление одиночным эквивалентным проводом [3]. Указанная модель позволяет определить размах колебаний расщепленных фаз при междупазных КЗ, а также второй и третий максимумы тяжения. Оценка первого максимума тяжения производится для «замороженной» фазы в момент максимального стягивания проводов в пучке. Достоверность этого статического метода подтверждена экспериментально.

При больших токах КЗ следует учитывать движение проводов расщепленных фаз, которые оказывают динамическое воздействие на распорки. Приложенные к распоркам силы раскладываются на две составляющие. Одна из них вызывает перемещение распорки как твердого тела, другая направлена на ее деформацию. В настоящее время указанная проблема стала актуальной для проектных организаций, разрабатывающих типовые проекты гибкой ошиновки с расщепленными проводами ОРУ 330 и 500 кВ. Важным конструктивным параметром расщепленной фазы является расстояние между распорками (длина подпролета). Его величина в значительной степени влияет на силы сжатия распорки при КЗ.

В БНТУ для математического описания динамики расщепленных проводов используются уравнения движения гибкой упругой нити [3]. Они справедливы для участков проводов между распорками, на которые воздействуют при КЗ только распределенные электродинамические усилия (ЭДУ). Из-за фиксации проводов в зажимах распорок при КЗ на провода в этих точках воздействуют также сосредоточенные силы, величины которых могут быть определены лишь с учетом упругих и инерционных характеристик распорок. При многофазных КЗ из-за разницы в расстояниях между составляющими различных фаз траектории движения проводов становятся несимметричными. Это ведет к повороту распорок и закручиванию фазы. Математическое описание динамики расщепленных фаз на основе принятой модели включает в себя уравнения поступательных перемещений и закручивания проводов и распорок, которые решаются совместно [3].

Жесткая распорка как неизменяемая система, с точки зрения теоретической механики, является абсолютно твердым телом. По определению, абсолютно твердое тело не может подвергаться никаким деформациям и представляет собой идеальный образ, который тем ближе подходит к реальной распорке, чем меньше последняя способна деформироваться под действием сил, приложенных от проводов. Подавляющее большинство распорок, установленных еще в энергосистемах бывшего СССР, можно отнести к распоркам жесткого типа [3].

С учетом сказанного в статье проведены исследования с использованием расчетной модели фазы в виде пучка гибких упругих нитей, которые в заданных точках пролета соединяются между собой жесткими дистанционными распорками. Такая модель учитывает геометрические и физико-механические характеристики расщепленных фаз в целом пролете. В момент максимального стягивания проводов в пучке под действием внутрифазных ЭДУ происходит резкое увеличение тяжения фаз. Указанный пик тяжения был назван первым максимумом [3].

Рассматриваемый численный метод расчета параметров электродинамической стойкости расщепленной фазы пригоден для оценки электродинамической стойкости расщепленных фаз при любом взаимном расположении составных проводников для различных, в том числе и неравномерно установленных, распорок [4]. Однако расчет по вышеуказанному методу трудоемок и требует высокой квалификации пользователя. Поэтому для инженерных расчетов был модифицирован упрощенный метод расчета, основанный на рассмотрении расщепленной фазы как статической системы, к которой прикладываются максимальные электродинамические усилия при КЗ [5].

В статье рассматривается расчет сил сжатия, действующих на распорку, для фазы, состоящей из двух проводов. Расчетные формулы выводятся для положения равновесия провода. На основании условия упругой деформации растяжения прилегающих к распоркам участков (рис. 1) провода по закону Гука получена следующая формула для определения $H_{\max}$ [5]:

$$H_{\max} = H_0 + \frac{EA}{l} \left[\frac{s(1 - \cos \beta_{\max})}{\sin \beta_{\max}} - \frac{q^2 l^3}{24H_0^2} \right], \quad (1)$$

где $H_{\max}$ – максимальное тяжение проводов при их схлестывании; H_0 – начальное тяжение провода; s – шаг расщепления; l – длина подпролета, м; E – модуль упругости, Н/мм²; A – поперечное сечение провода, мм².

Расчет силы сжатия распорки производили по очевидному выражению

$$P_{\max} = 2H_{\max} \operatorname{tg} \beta_{\max}, \quad (2)$$

где $P_{\max}$ – максимальная сила сжатия, действующая на распорку, Н.

При допущении, что в момент максимального стягивания проводов в фазе имеет место равновесие приложенных к ним сил и моментов этих сил, получено следующее уравнение:

$$\left[H_0 + \frac{EA}{l} \left[\frac{s(1 - \cos \beta_{\max})}{\sin \beta_{\max}} - \frac{q^2 l^3}{24 H_0^2} \right] \right] \operatorname{tg} \beta_{\max} -$$

$$-\frac{i^2 (\cos \beta_{\max})^2}{10 \sin \beta_{\max}} \ln \frac{[K + s - d \cos \beta_{\max}][K + S \cos 2\beta_{\max} - d]}{sd (2 \sin 2\beta_{\max} + 1 - \cos 2\beta_{\max})^2} = 0, \quad (3)$$

где $K = \sqrt{d^2 + s^2 - 2ds \cos 2\beta_{\max}}$; d – удвоенный диаметр провода, м.

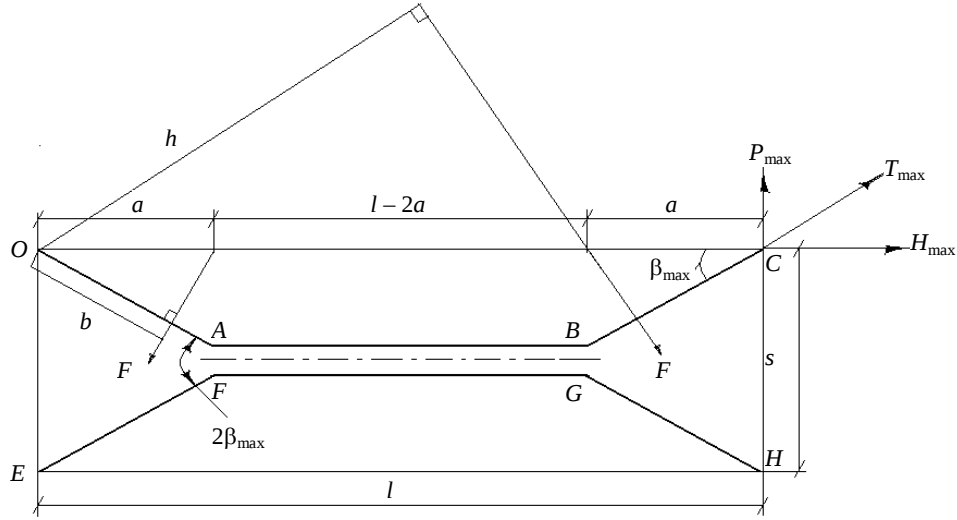


Рис. 1. К определению суммарного момента при предельном стягивании проводов расщепленной фазы

Трансцендентное алгебраическое уравнение с одним неизвестным $\beta_{\max}$ представляет собой (3). В [5] определение угла производится без решения (3) путем построения расчетных кривых, обобщающих расчеты по компьютерной программе, в зависимости от сочетания нескольких параметров: ток КЗ, шаг расщепления и удельный вес провода на единицу длины $\beta_{\max} = f\left(\frac{I}{\sqrt{sq}}\right)$, что является частным случаем поставленной задачи.

Угол $\beta_{\max}$ определяли из уравнения (3), которое решали методом половинного деления [6], сводящим процесс нахождения угла $\beta_{\max}$ к выполнению конечного числа итераций и дающим результат в виде числового значения с погрешностью, приемлемой для решаемой задачи. Данный подход основан на последовательном сужении интервала, содержащего единственный корень (3) до того времени, пока не будет достигнута заданная точность ε . Предварительно необходимо определить область локализации корня данного уравнения. Из анализа опытных данных установлено, что корень (3) находится на отрезке $[0; \pi/4]$. Разобьем отрезок $[0; \pi/4]$ пополам. Определим новое приближение корня $\beta_{\max}$ в середине отрезка $[0; \pi/4]$: $\beta_{\max} = \frac{[0; \pi/4]}{2}$. Найдем значение, которое примет (3) в точках 0 и $\beta_{\max}$. Если

произведение полученных чисел меньше нуля, то корень (3) находится на отрезке $[0; \pi/8]$, если больше нуля, то на отрезке $[\pi/8; \pi/4]$. Область с корнем вновь делим пополам. Алгоритм выполняется до тех пор, пока значение $\beta_{\max}$ не будет найдено с необходимой точностью (рис. 2). При изменении конструктивных параметров расщепленных фаз потребуются корректировка угла $\beta_{\max}$, что не представляет трудностей для проведения расчетов.

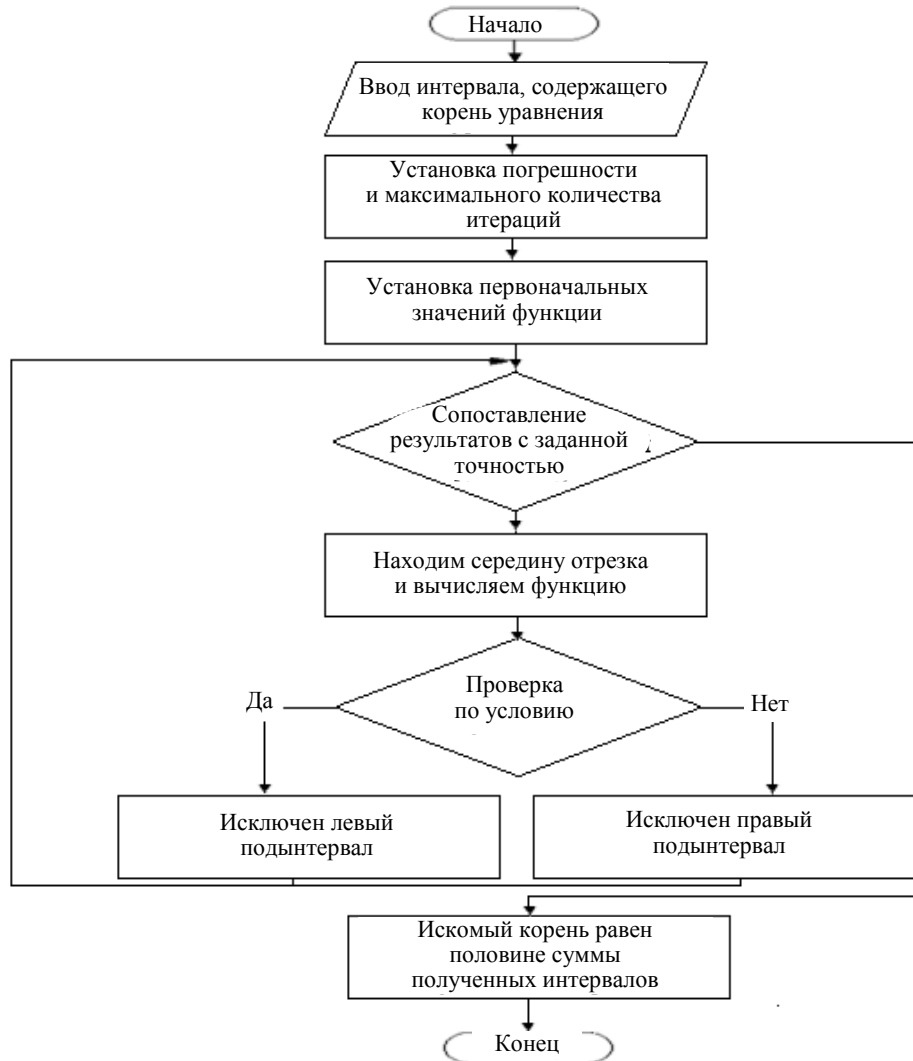


Рис. 2. Алгоритм определения $\beta_{\max}$

Разработанный алгоритм был реализован в компьютерной программе. После нахождения $\beta_{\max}$ выполняли расчет $H_{\max}$, $T_{\max}$ и $P_{\max}$. Оценка достоверности расчета $H_{\max}$ и $P_{\max}$ была выполнена при анализе параметров электродинамической стойкости гибкой ошиновки с расщепленными фазами при токах КЗ от 20 до 63 кА. Сопоставление результатов расчета, полученных по разработанному приближенному алгоритму и в компьютерной программе FAZA, с опытными данными приводится в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение результатов расчета $T_{1\max}$ по предложенному алгоритму
и программе FAZA с опытными данными**

$I_{\text{кз}}$, кА	Марка провода	$T_{1\max}$, кН, опыт	$T_{1\max}$, кН, FAZA	$T_{1\max}$, кН, метод	Погрешность %	
					$\Delta_{\text{метод}}$	Δ_{FAZA}
22,5	2×ASTER570	63,0	65,0	62,1	1,42	3,14
41,0	2×ASTER570	66,4	62,7	61,3	7,68	5,52
59,8	2×ASTER570	69,1	71,6	67,7	2,01	3,64
60,2	2×ASTER570	75,4	81,8	73,8	2,12	8,53
60,2	2×PETUNIA612	81,8	105,6	79,4	2,93	29,1
60,2	2×PETUNIA612	81,8	85,0	80,3	1,83	3,87
56,9	2×PETUNIA612	78,2	81,9	77,7	1,28	4,71

Разработанный метод использован для расчета параметров электродинамической стойкости расщепленных фаз гибкой ошиновки проектируемых типовых открытых распределительных устройств напряжением 330–500 кВ в Российской Федерации. В результате этого расчета определялись силы сжатия дистанционных распорок. При сравнении результатов находили силы сжатия распорок по формуле Манузо, широко используемой в проектной практике. Результаты этого расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение результатов расчета сил сжатия распорок $P_{\max \text{ расч}}$

$I_{\text{по}}^{(3)}$, кА	Марка провода	$P_{\max \text{ расч}}$, Н, FAZA	Тип распорки	$P_{\max \text{ расч}}$, Н, метод	$l_{\text{доп}}$, м	$P_{\max}$, Н (по Манузо)
20	2×АС 300/39	1920	РГ-2-400	1400	9,830	2574
20	2×АС 400/22	1800	РГ-2-400	1760	9,830	2635
20	2×АС 500/27	1600	РГ-2-400	1680	9,830	2659
20	2×ПА 500	1720	РГ-2-400	1650	9,830	2929
40	2×АС 300/39	1920	РГ-2-400	1850	1,300	3022
40	2×АС 400/22	1760	РГ-2-400	1890	1,300	3076
40	2×АС 500/27	2100	РГ-2-400	1950	1,300	3100
40	2×ПА 500	2120	РГ-2-400	2250	1,600	3466
63	2×АС 300/39	2200	РГ-2-400	2340	0,700	3490
63	2×АС 400/22	2350	РГ-2-400	2420	0,700	3657
63	2×АС 500/27	2150	РГ-2-400	2500	0,700	3759
63	2×ПА 500	2520	РГ-2-400	2670	0,756	4654

Как видно из табл. 1, 2, приближенный метод расчета сил сжатия распорок и максимальных тяжений, действующих на дистанционную распорку, для фазы, состоящей из двух проводов, дает хорошие результаты, которые подтверждаются численными расчетами по компьютерной программе FAZA. При токах КЗ 40–60 кА электродинамическая стойкость расщепленных фаз обеспечивается только при использовании демпфирующих распорок с повышенной механической прочностью. Следует отметить, что в компьютерной программе FAZA и в приближенном методе не учитывали подвижность лучей демпфирующей распорки относительно рамы, что давало погрешность в результатах расчета сил сжатия распорки и макси-

мальных тяжений. Для оценки величины этой погрешности необходимо усовершенствовать компьютерную программу FAZA и учесть в расчетах особенности конструкции демпфирующей распорки. Демпфирующая распорка (рис. 3) выполняется в виде корпуса 1, подвижных лучей 2, которые с одного конца заканчиваются плашками-зажимами 3, а с другого – закреплены в демпферных узлах 4. Они состоят из эластомерных дисков, стянутых с определенным усилием болтом с гайкой. Эластомерные диски изготовлены из токопроводящей резины с высоким содержанием углерода [7].

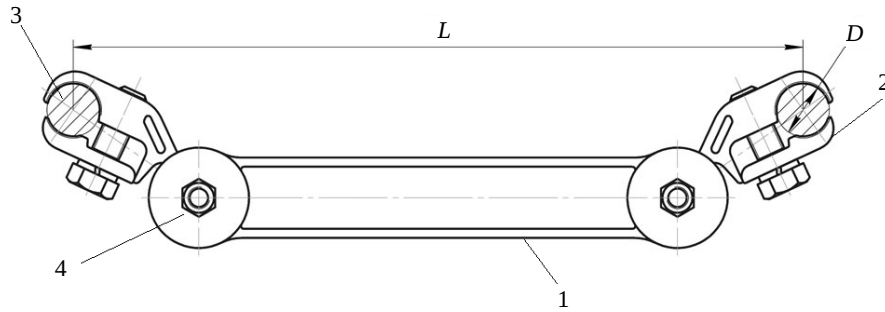


Рис. 3. Демпфирующая распорка типа РД

Наличие в конструкции распорки-гасителя демпферного узла с эластомерными дисками, способными к энергопоглощению, не позволяет представлять ее одним абсолютно твердым телом. С учетом этого лучи распорки при математическом моделировании могут быть представлены абсолютно твердым телом, совершающим только вращательное движение вокруг точки упруго-вязкого шарнирного опирания на раме. Твердое тело рамы производит сложные вращательные и поступательные перемещения в пространстве [8].

Вращение j -го луча распорки вокруг точки его упруго-вязкого шарнирного опирания в плоскости, перпендикулярной пролету, приближенно можно описать следующим уравнением [8]:

$$J \frac{d^2 a_j}{dt^2} + f \frac{d(a_j - a_b)}{dt} + c(a_j - a_b) = M_j, \quad (4)$$

где J – момент инерции луча относительно оси x ; a_j – угол поворота j -го луча в упруго-вязком шарнире относительно рамы; c , f – угловая упругая и вязкостная жесткости узла демпфирования; a_b – динамический угол поворота рамы.

На основе предложенного алгоритма разработан модифицированный вариант компьютерной программы FAZA, учитывающий влияние подвижности лучей распорок.

ВЫВОД

Разработан приближенный метод расчета максимальных тяжений и сил сжатия распорок в расщепленной фазе, который базируется на решении уравнения относительно угла $\beta_{\max}$ методом половинного деления. Выполнена оценка достоверности расчета максимального тяжения и сил сжатия

распорок при коротком замыкании с использованием компьютерной программы FAZA. Определены параметры электродинамической стойкости расщепленных фаз проектируемых типовых открытых распределительных устройств напряжениями 330 и 500 кВ. Предложен алгоритм определения параметров динамики с учетом влияния упруго-вязких характеристик демпфирующих распорок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Официальный сайт Министерства энергетики Республики Беларусь. – Режим доступа: http://www.minenergo.gov.by/ru/at_en/r_aes. – Дата доступа: 25.01.2014.
2. C I G R E Study Committee 23. Working group 23 – 11 ESCC Task Force. – Paris: CIGRE Central Office, 1996.
3. С е р г е й, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. – М.: ВУЗ-ЮНИТИ, 2001. – 151 с.
4. С т р е л ю к, М. И. Расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки открытых распределительных устройств высокого напряжения / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей // Электричество. – 1984. – № 1. – С. 10–14.
5. С е р г е й, И. И. Упрощенный расчет максимальных тяжений расщепленных проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, А. П. Андрукевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 6. – С. 18–23.
6. Д е м и д о в и ч, Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М.: Наука, 1968. – 664 с.
7. Д и с т а н ц и о н н а я распорка-гаситель колебаний: а. с. 1651335 СССР, МКИ 5Н02Н3/16 / А. А. Виноградов, А. Ф. Голубев, Я. А. Кловский, С. Э. Шиков, Е. И. Виноградова, И. И. Сергей; МО СКТБ по изоляторам и арматуре ВПО «Союзэлектросетьизоляция». – № 435 3987/07; заявл. 31.12.1987; опубл. 23.05.1991 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 19. – С. 207.
8. D y n a m i c Loads on Spacer Damper at Short – Circuit / M. I. Streluk [et al.] // Short – Circuit Currents in Power Systems: Proceedings of the 7th International Symp. 10–12 Sept. 1996, Technical University of Lodz. – Warsaw, 1996. – № 2.7. – P. 2.7.1–2.7.5.

REFERENCES

1. *N a t i o n a l Legal Internet Portal of the Republic of Belarus. Official site of Ministry of Energy of the Republic of Belarus.* Available at: http://www.minenergo.gov.by/ru/at_en/r_aes. (accessed 25 January 2014).
2. *C I G R E Study Committee 23. Working group 23 – 11 ESCC Task Force.* Paris: CIGRE Central Office, 1996.
3. S e r g e y, I. I., & Streluk, M. I. (2001) *Dynamics of Electrical Installation Wires in Electric Power Systems During Short Circuit Faults: Theory and Calculative Experiment.* Moscow: VUZ–UNITI.
4. S t r e l i u k, M. I., & Sergey, I. I. (1984) Calculation of Electrodynamic Resistance of Flexible Bus-Bar in Outdoor Switch-Gears of High Voltage. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1, 10–14.
5. S e r g e y, I. I., & Andrukevich, A. P. (2008) Simplified Calculation of Maximum Tensions of Split Conductors at Short Circuit. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika. [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering]*, 6, 18–23.
6. D e m i d o v i c h, B. P., & Maron, I. A. (1968) *Fundamental of Numerical Mathematics.* Moscow: Nauka.
7. V i n o g r a d o v, A. A., Golubev, A. F., Klovskii, Ia. A., Shikov, S. E., Vinogradova, E. I., & Sergei, I. I. (1991) *Dstantsionnaia Rasporok – Gasitel' Kolebanii [Spacer-Damper].* Certificate of authorship no. 1651335 USSR. *Otkrytiia. Izobreteniiia [Discoveries. Inventions]*, (19), 207.
8. S t r e l i u k, M. I., Sergei, I. I., Bladyko, Iu. V., & Vinogradov, A. A. (1996) Dynamic Loads on Spacer Damper at Short – Circuit. *Short – Circuit Currents in Power Systems. Proceedings of the 7th International Symp. 10–12 Sept. 1996.* Technical University of Lodz. Warsaw, (2.7), 2.7.1–2.7.5.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 14.02.2014