

ПОНОМАРЕНКО Е. Г., ПОТАЧИЦ Я. В.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На сегодняшний день проверка электрических аппаратов электроустановок на механическую прочность производится лишь с учетом статического действия проводов при коротком замыкании (КЗ). В действительности же на провода при КЗ действуют кратковременные динамические усилия, в дальнейшем передающиеся на аппараты, порталы и опорные изоляторы, в которых в этом случае возникают опасные механические напряжения, которые могут приводить как к их деформации, так и полному разрушению. На основании выше-сказанного можно сделать вывод, что для достоверного определения динамических нагрузок на основные конструктивные элементы открытых распределительных устройств (ОРУ) необходима постановка динамической задачи, которая бы предполагала рассмотрение проводов и аппаратов как единой колебательной системы при КЗ. Известны случаи, когда конструктивные элементы электроустановок, имеющие большой запас прочности на статическую нагрузку, разрушались под действием сравнительно небольших периодически действующих сил [1].

Ключевые слова: энергетика, гибкие проводники, опорные конструкции, коммутационные аппараты, свободные колебания, динамические усилия

Введение

При динамическом расчете основные конструктивные элементы ОРУ представляются упругим консольным стержнем с равномерно распределенной массой и постоянной жесткостью по длине [2]. Поскольку такие электрические аппараты, как опорные изоляторы, колонковые выключатели и измерительные трансформаторы, при установке жестко закрепляются на раме, то правомерно считать, что один конец аппарата (стержня) имеет глухую заделку, а на второй – прикладываются динамические усилия от проводов (рисунок 1), в результате чего стержень испытывает действие изгибающих сил.

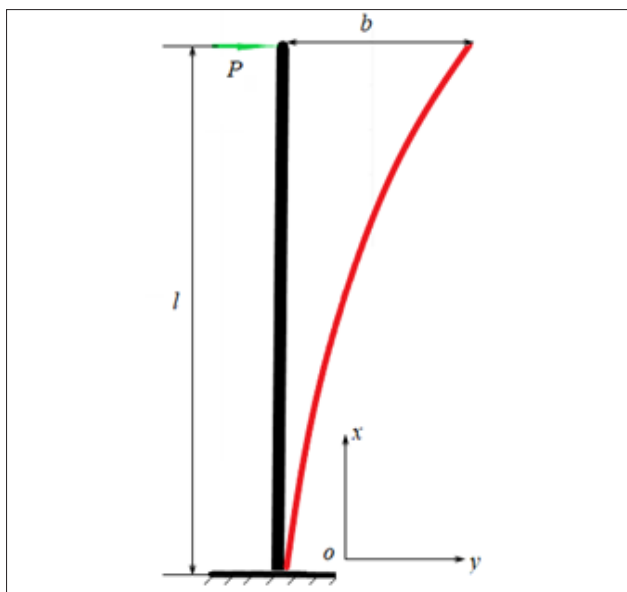


Рисунок 1. Консольный стержень под воздействием динамической силы P

Следует отметить, что для выбранной математической модели узлы стержня совершают колебания лишь по линейным степеням свободы, другими словами, во внимание принимаются только поперечные колебания. Крутильными колебаниями также пренебрегаем, поскольку стержень в своем основании имеет жесткую заделку [2].

Основная часть

Если элемент стержня dx на расстоянии x от начала координат в момент времени t имел отклонение y , то действующая на элемент сила, согласно второму закону Ньютона, равна:

$$f = -mdx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где m – масса элемента dx стержня, кг. Знак «–» показывает, что сила f направлена в сторону, противоположную прогибу. С другой стороны, возникающую при прогибе силу f можно определить по следующему выражению [3]:

$$f = EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}, \quad (2)$$

где EJ – изгибная жесткость стержня, Н·м².

Приравняв уравнения (1) и (2), получим дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее колебание стержня:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

Уравнение (3) описывает гармонические колебания периода $2\pi/\omega$. Решение этого уравнения общеизвестно и записывается в виде:

$$y = X(x) \cdot \cos \omega t. \quad (4)$$

Подставляя уравнение (4) в (3), получим обыкновенное дифференциальное уравнение относительно $X(x)$:

$$EJ \frac{d^4 X}{dx^4} - m\omega^2 X = 0, \quad (5)$$

Пусть $\sqrt[4]{\frac{m\omega^2}{EJ}} = \alpha$, тогда уравнение (5) примет вид:

$$\frac{d^4 X}{dx^4} - \alpha^4 X = 0. \quad (6)$$

Общее решение этого уравнения записывается в виде:

$$X = C_1 \operatorname{ch} \alpha x + C_2 \operatorname{sh} \alpha x + C_3 \cos \alpha x + C_4 \sin \alpha x, \quad (7)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования.

Периоды колебаний зависят от граничных условий, которые определяются способом закрепления концов стержня.

Для жестко закрепленного в начале координат конца стержня прогиб (отклонение) и изгибающий момент равны нулю: при $x = 0, X = 0$ и $d^2 X / dx^2 = 0$, тогда в уравнении (7) $C_1 = 0$ и $C_3 = 0$, и оно примет вид:

$$X = C_2 \operatorname{sh} \alpha x + C_4 \sin \alpha x, \quad (8)$$

Для другого конца стержня при $x = l$ в начальный момент времени, когда сила P отклонила стержень на величину b , из (8) получим:

$$b = C_2 \operatorname{sh} \alpha l + C_4 \sin \alpha l. \quad (9)$$

Так как прогиб стержня $dX/dx = 0$, при $x = l$, то:

$$\alpha^2 C_2 \operatorname{sh} \alpha l - \alpha^2 C_4 \sin \alpha l = 0. \quad (10)$$

Решая уравнения (8) и (9) совместно, получим:

$$2C_4 \sin \alpha l = b \quad \text{или} \quad \sin \alpha l = \frac{b}{2C_4}. \quad (11)$$

Поскольку $\sin \alpha l \leq 1$, то при $x = l$ рассмотрим максимальное отклонение, т.е. примем $\sin \alpha l = 1$ и $\alpha l = \frac{\pi}{2} + \pi n$, где n – целое число ($n = 1, 2, 3, \dots$), так как

$\alpha = \sqrt[4]{\frac{m\omega^2}{EJ}}$, то $\omega = \frac{\frac{\pi}{2} + \pi n}{b^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ}{m}}$. При $n = 0$ имеем основную гармонику, соответствующую низшей частоте, при $n = 1, 2, 3, \dots$ получаем гармоники высших частот.

Данное выражение позволяет получить спектр собственных частот колебаний консольного стержня.

Изгиб консольного стержня для любого значения получен в [4] и имеет вид:

$$y = \frac{P}{2EJ} \left(lx^2 - \frac{x^3}{3} \right), \quad (12)$$

для $x = l$:

$$y = b = \frac{Pl^3}{3EJ}, \quad (13)$$

где P – сила, приложенная к концу стержня, Н.

Основной вклад в величину силы P вносит сила Ампера, величину которой на единицу длины провода можно определить следующим образом [5]:

$$P = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{R}, \quad (14)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн / м;

I_1, I_2 – сила тока в проводах, А;

R – расстояние между проводами, м.

Сила Ампера приводит к колебанию проводов, которые в свою очередь выступают в роли вынуждающей силы для основных конструктивных элементов ОРУ (консольного стержня).

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний электрических аппаратов в этом случае, согласно [6], примет вид:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\beta \frac{dy}{dt} + \omega^2 y = \frac{P_0}{m_1} \sin \Theta t, \quad (15)$$

где β – коэффициент затухания колебаний аппаратов;

ω – собственная частота колебаний стержня, рад/с;

Θ – частота вынужденных колебаний, рад/с;

m_1 – масса единицы длины провода, кг;

P_0 – амплитудное значение возбуждающей силы, Н.

y – отклонение провода от первоначального положения, м.

Решение уравнения (15) аналогично решению (8) и имеет вид:

$$y = C \sin(\Theta t + \varphi_1), \quad (16)$$

где $C = \frac{P_0}{m_1 \sqrt{(\Theta^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \Theta^2}}$;

$$\varphi_1 = \arctg \frac{2\beta\omega}{\Theta^2 - \omega^2}.$$

Учитывая, что через некоторое время после начала колебаний собственные колебания прекращаются и $\frac{P_0}{m_1} = \omega^2 y_{\text{ст}}$, решение уравнения (15) принимает вид:

$$y = \frac{\omega^2 y_{\text{ст}}}{\sqrt{(\Theta^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \Theta^2}} \cdot \sin(\Theta t + \varphi_1), \quad (17)$$

где $y_{\text{ст}}$ – отклонение конструктивных элементов при статическом нагружении;

$$\frac{\omega^2 y_{\text{ст}}}{\sqrt{(\Theta^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \Theta^2}} = y_{\text{дин}}^{\text{max}} - \text{максимальное отклонение аппаратов от положения равновесия при вынужденных колебаниях.}$$

Для дальнейшего расчета введем новую величину, называемую динамическим коэффициентом:

$$\mu = \frac{y_{\text{дин}}^{\text{max}}}{y_{\text{ст}}} \frac{\omega^2}{\sqrt{(\Theta^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \Theta^2}}. \quad (18)$$

При резонансе $\Theta = \omega$, значит $\mu = \omega / 2\alpha = 1 / \gamma$, где $\gamma = 2\alpha / \omega$. Наибольшего значения коэффициент μ достигнет при $\Theta^2 = \omega^2 - 2\alpha^2$, следовательно:

$$\mu_{\text{max}} = \frac{\omega^2}{2\alpha\sqrt{\Theta^2 - \omega^2}} = \frac{1}{\gamma\sqrt{1 - \frac{\gamma^2}{4}}}. \quad (19)$$

Если построить графики $\mu(\Theta/\omega)$, то они будут иметь вид кривых, представленных на рисунке 2 [6].

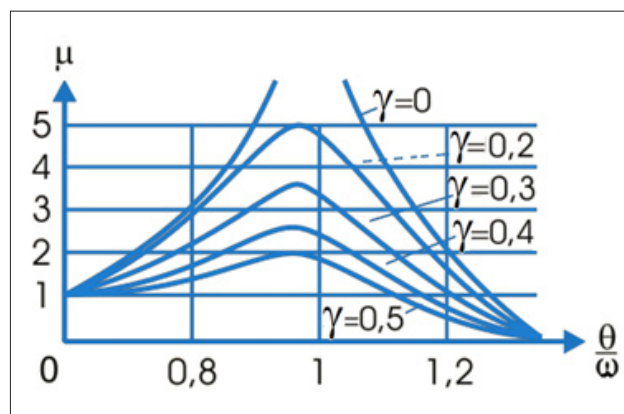


Рисунок 2. Зависимость динамического коэффициента от частот вынужденных и собственных колебаний стержня

Очевидно, что область значений, в которой выполняется условие, $0,8 \leq \Theta/\omega \leq 1,2$, является резонансно-опасной, амплитуда колебаний в этой области резко возрастает и ее необходимо избегать, подбирая соответствующим образом, жесткость и геометрические размеры конструктивных элементов ОРУ.

С помощью компьютерной программы FLEBUS 2.0, разработанной на кафедре «Электрические станции» в [7] были получены характерные осциллограммы динамических усилий, действующих на опорный изолятор, в результате моделирования двухфазного КЗ величиной 30 кА в ячейке типового ОРУ 110 кВ (рисунок 3).

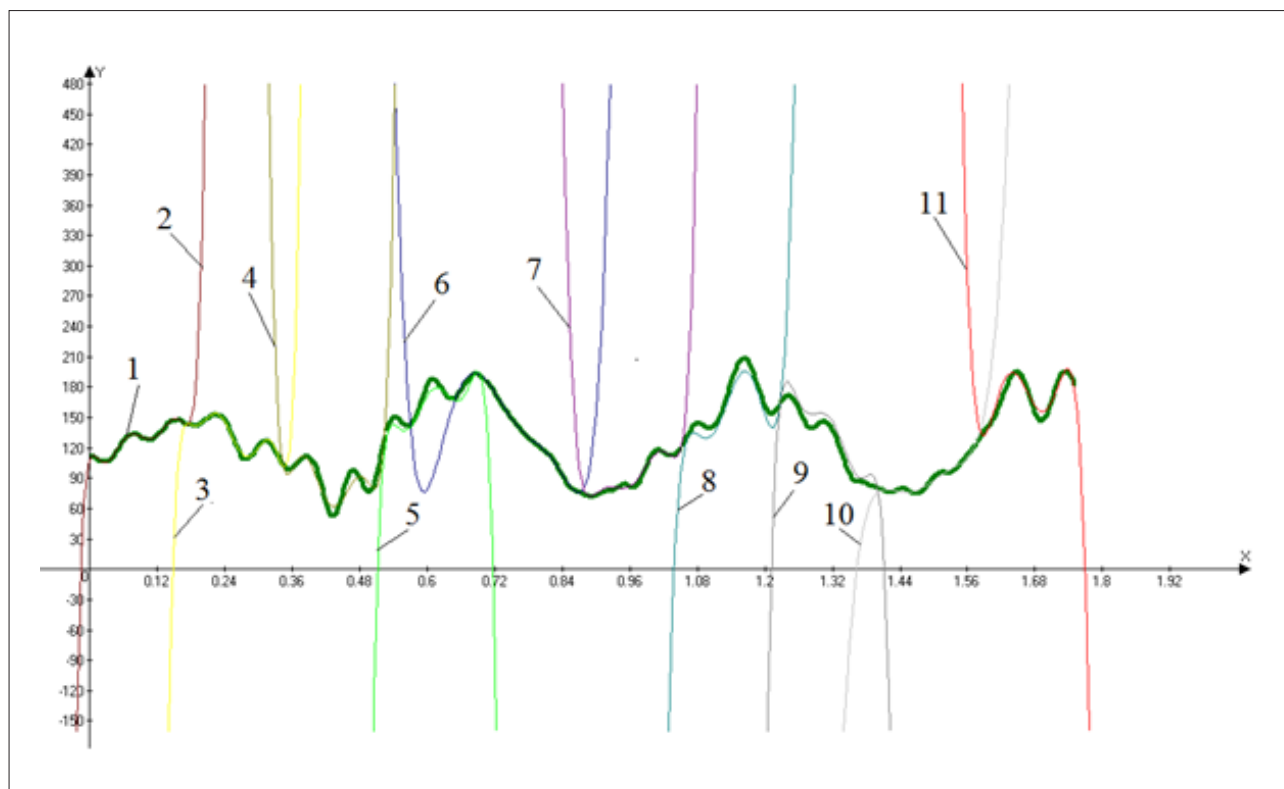


Рисунок 3. График динамических тяжений фазы В

Как видно из рисунка 3, затухание колебаний практически отсутствует, т.е. $\alpha \rightarrow 0$, следовательно, из (18) имеем:

$$\mu = \frac{y_{\text{дин}}^{\max}}{y_{\text{ст}}} = \frac{1}{\left(\frac{\Theta}{\omega}\right)^2 - 1}. \quad (20)$$

Для дальнейшего расчета сведем значения собственных и вынужденных частот колебаний опорного изолятора, полученных в [7] в общую таблицу 1.

Таблица 1. Частоты собственных и вынужденных колебаний опорного изолятора

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

Для опорного изолятора ИОС-110-600 одиннадцатая гармоника собственных колебаний совпадает с третьей гармоникой вынужденных колебаний тогда динамический коэффициент будет равен:

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

Динамическое воздействие на опорный изолятор будет складываться из суммы статического нагружения $G_{\text{ст}}$, связанного, с нелинейностью колебания изолятора и вибрационного нагружения частоты Θ , приведенного к статической силе посредством коэффициента динамичности μP_0 :

$$G_{\text{дин}} = G_{\text{ст}} + \mu P_0, \quad (21)$$

где P_0 – амплитуда колебаний резонансной частоты Θ .

Стоит отметить, что значения статического $G_{\text{ст}}$ и вибрационного нагружения P_0 – это не что иное, как амплитуды соответствующих членов ряда Фурье на резонансных гармониках полученных в [2].

С учетом сказанного, динамическое воздействие на опорный изолятор по (21) будет равно:

$$\begin{aligned} G_{\text{дин}} &= G_{\text{ст}} + \mu P_0 = 89,9 + 17,446 \cdot 27,0 = \\ &= 89,9 + 470,88 = 560,78 \text{ даН} \end{aligned}$$

Для анализа полученных результатов представим их в виде таблицы 2.

Таблица 2. Сравнение расчетных и паспортных данных изолятора

Тип аппарата	Номинальное напряжение, кВ	Минимальная разрушающая нагрузка на изгиб, даН	Расчетное значение динамического воздействия, даН
ИОС	110	600	560

Если предположить, что опорный изолятор марки ИОС находится в эксплуатации, то, наверняка, из-за усталостных микрповреждений [8, 9] его прочность будет несколько меньше паспортной, а, следовательно, вероятно его разрушение. Следовательно, расчет основных конструктивных элементов ОРУ на динамическое воздействие по приведенной методике необходимо проводить в обязательном порядке.

Данная методика будет актуальной для проектных организаций в связи с ростом токов КЗ в энергосистеме Республики Беларусь.

Выводы

1. Разработана методика расчета электродинамической стойкости конструктивных элементов распределительных устройств, в котором гибкие проводники вместе с аппаратами рассматриваются как единая колебательная система при КЗ.

2. Предложенная методика позволяет проводить вычислительный эксперимент по оценке влияния механических и геометрических параметров конструктивных элементов РУ на электродинамическую стойкость.

3. Применение данной методики позволяет разрабатывать рекомендации по повышению механической прочности электрических аппаратов при увеличении уровней токов КЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования / Т. Г. Галиева, Д. А. Иванов, М. Ф. Садыков, А. В. Голенищев–Кутузов // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 80–87. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-80-87.
2. Потачиц, Я. В. Совершенствование методов расчета электродинамической стойкости конструкций токоведущих систем с гибкими проводниками : автореферат диссертации ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Потачиц Ярослав Владимирович ; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2023. 28 с. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/126943>.

3. Пономарев, К. К. Составление и решение дифференциальных уравнений инженерно-технических задач / К. К. Пономарев. Москва : Гос. учеб.-педагог. изд-во, 1962. 183 с.
4. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления : в 2 т. / Н. С. Пискунов. Изд. стереотипное. Москва : Интеграл-Пресс, 2005. Т. 1.
5. Малышев, Л. Г. Избранные главы курса физики. Электромагнетизм / Малышев Л. Г., Повзнер А. А. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 169 с.
6. Шакирзянов, Р. А. Динамика и устойчивость сооружений / Р. А. Шакирзянов, Ф. Р. Шакирзянов. 2-е перераб. изд. Казань : Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2015. 120 с.
7. Потачиц, Я. В. Исследование возникновения резонанса при воздействии динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок / Я. В. Потачиц // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 3. С. 228-238. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-3-228-238.
8. A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling / M. Borghei, M. Ghassemi, J. M. Rodríguez-Serna, R. Albarracín-Sánchez // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36, № 4. P. 2570-2581. DOI: 10.1109/tpwr.2020.2991589.
9. Зарипова, А. Д. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции / А. Д. Зарипова, Д. К. Зарипов, А. Е. Усачев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, №. 5-6. С 51-57. DOI: 10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57.

REFERENCES

1. Galieva T.G., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Golenishchev–Kutuzov A.V. Laboratory stand for development of method and system for continuous non-contact non-destructive testing of technical condition of insulation equipment. Omsk Scientific Bulletin. 2021;(179):80–87. (In Russian). <http://dx.doi.org/10.25206/1813-8225-2021-179-80-87>.
2. Potachits Y.V. Improving methods for calculating electrodynamic stability of structures of current-carrying systems with flexible conductors. Abstract of the thesis ... PhD of Engineering Sciences. 05.14.02. Minsk: Belarusian National Technical University; 2023. 28 p. (In Russian). Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/126943>
3. Ponomarev K.K. Compilation and solution of differential equations of engineering and technical problems. Moscow: State Educational and Pedagogical Publishing House; 1962. 183 p. (In Russian).
4. Piskunov N.S. Differential and integral calculus. In 2 vol. Moscow: Integral–Press; 2005(1) 544 p. (In Russian).
5. Malyshev L.G., Povzner A.A. Selected chapters of the physics course. Electromagnetism. Ekaterinburg: Publishing House of Ural University; 2014. 169 p. (In Russian).
6. Shakirzyanov R.A., Shakirzyanov F.R. Dynamics and stability of structures. 2nd edition. Kazan: Publishing House of Kazan State University of Architecture and Engineering; 2015. 120 p. (In Russian).
7. Potachits Y.V. A Study of the Occurrence of Resonance under the Influence of Dynamic Forces on the Structural Elements of Electrical Installations. Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. 2021;64(3):228-238. (In Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-228-238>
8. Borghei M., Ghassemi M., Rodriguez-Serna J.M., Albarracin-Sanchez R. A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling. IEEE Transactions on Power Delivery. 2021;36(4):2570–2581. <http://dx.doi.org/10.1109/tpwr.2020.2991589>
9. Zaripova A.D., Zaripov D.K., Usachev A.E. Criteria for equipment defects for thermal power substation control system. Power engineering: research, equipment, technology. 2017;19(5-6):51-57. (In Russian). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>

PONOMARENKO E. G., POTACHITS Y. V.

METHODOLOGY FOR CALCULATING DYNAMIC FORCES ON STRUCTURAL ELEMENTS OF ELECTRICAL INSTALLATIONS

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. To date, the mechanical strength testing of electrical apparatus in electrical installations has only been carried out taking into account the static action of the conductors in the event of a short circuit (short-circuit). In reality, short-term dynamic forces act on the conductors during short-circuit faults, which are further transmitted to the apparatuses, gantries and supporting insulators, in which case dangerous mechanical stresses arise, which can lead to their deformation or complete destruction. Based on the above, we can conclude that for a reliable determination of dynamic loads on the main structural elements of open switchgear (OSD) requires the formulation of a dynamic problem, which would involve the consideration of wires and apparatus as a single oscillating system at short-circuit. There are known cases when structural elements of electrical installations, having a large safety margin for static load, were destroyed under the action of relatively small periodically acting forces.

Keywords: power engineering, air-lines, supporting frameworks, split phase, torsional stability, dancing

**Пономаренко Евгений Геннадьевич**

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь. Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические станции», декан Энергетического факультета Белорусского национального технического университета. Проводит исследование в области электродинамической стойкости электроустановок.

E. G. Ponomarenko

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Plants, and Dean of the Faculty of Power Engineering at the Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of electrodynamic stability of electrical installations.

E-mail: ponomarenkoeg@bntu.by

**Потачиц Ярослав Владимирович**

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции», декан Спортивно-технического факультета Белорусского национального технического университета. Проводит исследование в области электродинамической стойкости электроустановок.

Y. V. Potachits

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Power Plants, and Dean of the Sports and Technical Faculty of the Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of electrodynamic stability of electrical installations.

E-mail: potachitsyaroslav@bntu.by