

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-228-238>

УДК 621.316.37.064.1

Исследование возникновения резонанса при воздействии динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок

Я. В. Потачиц¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рост уровней токов короткого замыкания в энергосистеме Республики Беларусь требует исследования параметров электродинамической стойкости основных конструктивных элементов электроустановок с гибкими проводниками. В режиме короткого замыкания по проводникам электроустановок протекают токи, в сотни раз превышающие токи рабочего режима. При взаимодействии магнитных полей, образованных этими токами, возникают значительные электромагнитные усилия, оказывающие разрушающее воздействие как на сами токоведущие части, так и на конструктивные элементы электроустановок: опорные изоляторы, коммутационные аппараты, измерительную аппаратуру. Движение проводов в режиме короткого замыкания приводит к появлению в них существенных динамических нагрузок, которые, в свою очередь, передаются на порталы, опорные изоляторы и электрические аппараты. Актуальной проблемой является возникновение в основных конструктивных элементах недопустимых механических усилий, способных вызвать их разрушение. Так, анализ физико-механических параметров и геометрических размеров гибкой ошиновки распределительных устройств показывает, что нарушение условия электродинамической стойкости по тяжению маловероятно в силу высокой механической прочности применяемых сталеалюминевых проводов большого сечения. Вместе с тем ограничивающие пролет порталы, опорные изоляторы и другие электрические аппараты имеют значительно меньшие допустимые изгибающие нагрузки. При воздействии динамических усилий проводники изгибаются и передают нагрузку на конструктивные элементы, которые обладают определенной упругостью. Таким образом, достоверное определение динамических нагрузок с учетом действующих на опорные конструкции токоведущих частей возможно лишь при постановке динамической задачи. В статье излагаются методы математического моделирования и вычислительного эксперимента для анализа параметров электродинамической стойкости основных конструктивных элементов, которые определяются с помощью коэффициентов, зависящих от собственных частот колебаний и характера изменения динамических усилий во времени. Для решения поставленных задач составлены математические модели, сформулированы краевые задачи расчета электродинамической стойкости конструктивных элементов с учетом вероятного совпадения частот вынужденных и собственных колебаний конструктивных элементов.

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

Для цитирования: Потачиц, Я. В. Исследование возникновения резонанса при воздействии динамических усилий на конструктивные элементы электроустановок / Я. В. Потачиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 228–238. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-228-238>

Адрес для переписки

Потачиц Ярослав Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
PotachitsYaroslav@bntu.by

Address for correspondence

Potachits Yaroslav V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
PotachitsYaroslav@bntu.by

A Study of the Occurrence of Resonance under the Influence of Dynamic Forces on the Structural Elements of Electrical Installations

Y. V. Potachits¹⁾

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

Abstract. The increase in the levels of short-circuit currents in the power system of the Republic of Belarus requires the study of the parameters of the electrodynamic stability of the main structural elements of electrical installations with flexible conductors. In case of a short circuit in the network, currents tenfold exceeding the rated one hundreds of times can flow through the current-carrying part of the device. When the magnetic fields formed by these currents interact, significant electromagnetic forces arise, which have a destructive effect both on the current-carrying parts themselves and on the structural elements of electrical installations, viz. support insulators, switching devices, measuring equipment. The movement of the wires in a short-circuit mode leads to the appearance of significant dynamic loads in them, which, in turn, are transmitted to the portals, support insulators and electrical devices. A topical problem is the occurrence of unacceptable mechanical forces in the main structural elements that can cause their destruction. Thus, the analysis of the physical and mechanical parameters and geometric dimensions of the flexible busbar of switchgear shows that a violation of the condition of electrodynamic resistance to tension is unlikely due to the high mechanical strength of the large-section steel-aluminum wires used. At the same time, span-limiting portals, support insulators and other electrical devices have significantly lower permissible bending loads. When exposed to dynamic forces, the conductors bend and transfer the load to the structural elements which have certain elasticity. Thus, a reliable determination of dynamic loads, taking into account the current-carrying parts acting on the supporting structures, is possible only if a dynamic task is set. The article describes the methods of mathematical modeling and computational experiment for analyzing the parameters of the electrodynamic stability of the main structural elements which are determined using coefficients that depend on the natural frequencies of oscillations and the nature of changes in dynamic forces over time. To solve these problems, mathematical models are compiled and boundary value problems are formulated for calculating the electrodynamic stability of structural elements, taking into account the possible coincidence of the frequencies of natural and forced oscillations of structural elements taking into account the probable coincidence of the frequencies of forced and natural vibrations of structural elements.

Keywords: flexible conductors, supporting structures, switching devices, free oscillations, forced oscillations, dynamic forces

For citation: Potachits Y. V. (2021) A Study of the Occurrence of Resonance under the Influence of Dynamic Forces on the Structural Elements of Electrical Installations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 228–238. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-228-238> (in Russian)

Введение

Динамические усилия при коротком замыкании (КЗ) опасны для опорных конструкций и аппаратов распределительных устройств из-за их недостаточной механической прочности. Например, в соответствии с типовыми проектными материалами института «Энергосетьпроект», допустимые изгибающие нагрузки от гибких проводников 110 кВ на электрические аппараты не должны превышать 100–200 даН. Условие механической прочности для гибких проводников открытых распределительных устройств (ОРУ) записывается в следующем виде [1]:

$$P_{\max i} \leq P_{\text{доп}i}, \quad i = x, y, z, \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальная расчетная нагрузка на аппараты и изоляторы, даН; $P_{\text{доп}}$ – допустимая изгибающая нагрузка аппаратов и изоляторов, даН.

Максимальные тяжения при КЗ являются импульсными ударными нагрузками [2], результат действия которых на опорные конструкции и электрические аппараты может быть установлен лишь с учетом влияния их инерционных и упругих характеристик, что следует учитывать при проверке механической прочности.

Основная часть

Провода вместе с конструктивными элементами ОРУ образуют единую колебательную систему (рис. 1), поэтому уравнения движения токоведущих частей и аппаратов ОРУ должны решаться совместно [2]. При математической постановке задачи применяется принцип связей механики, т. е. действие проводников на электрические аппараты заменяется реакциями связей. По отношению к изоляторам провода являются внешними силами. Упругая податливость опорных изоляторов обусловлена собственной податливостью, деформациями несущих конструкций, подвижностью болтовых соединений, наличием эластичных прокладок под фланцами и др. [3].

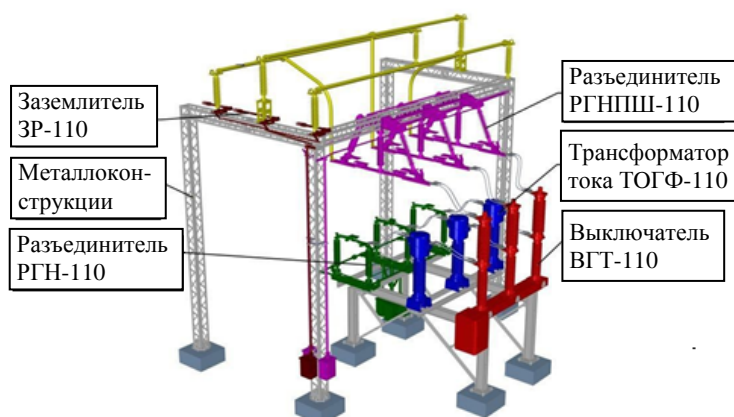


Рис. 1. Компактный модуль для открытого распределительного устройства 110–220 кВ

Fig. 1. Compact module for the 110–220 kV switchgear

Гибкие проводники представляются гибкой упругой нитью, динамика которой при КЗ описывается уравнением движения в векторно-параметрической форме [1]

$$T \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial S} \frac{\partial \bar{R}}{\partial S} + \bar{f} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где T – динамическое тяжение провода, Н; \bar{R} – мгновенное значение радиус-вектора, описывающего пространственное расположение провода, м; \bar{f} – вектор удельного электродинамического усилия, действующего на единицу длины провода, Н/м; ρ – масса единицы длины провода, кг/м.

Стержневые опорные изоляторы, применяемые в ОРУ 110 кВ и выше, представляются консольными стержнями с распределенной массой и постоянной жесткостью по высоте изолятора. При этом с одного конца изолятор жестко защемлен, а с другого подвергается действию динамических усилий, обусловленных тяжениями в проводах (рис. 2, где H – высота изолятора; h_1 – высота верхнего фланца; h_2 – то же нижнего фланца; D – наибольший диаметр изоляционной части). Если не учитывать соединительные фланцы, можно считать, что упругие стержни имеют равномерно распределенную массу [4].

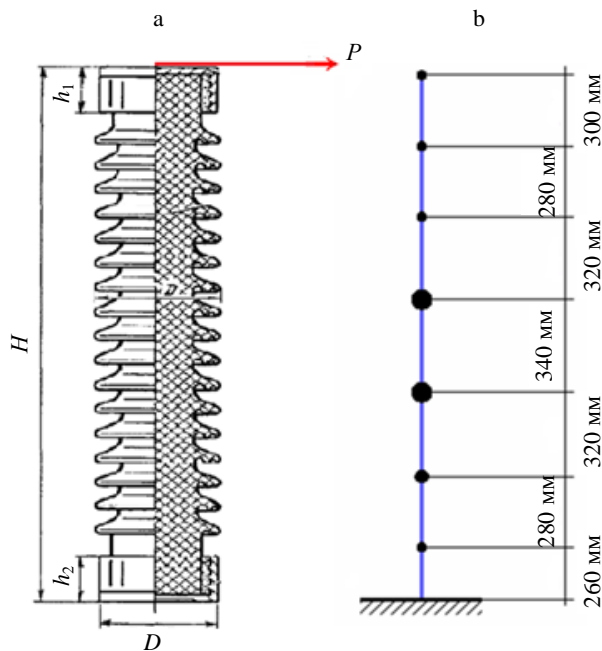


Рис. 2. Модель изолятора марки ИОС-110-600:
а – конструктивное исполнение; б – расчетная схема

Fig. 2. A model of an ISC-110-600 insulator:
a – constructive version; b – calculation scheme

В общем случае на опорные изоляторы действуют силы, равные [1]

$$\bar{P}_i = \sum_{i=1}^n \bar{T}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где \bar{T}_i – векторы тяжения в точках крепления провода к изоляторам.

При воздействии динамических сил опорный изолятор испытывает вынужденные изгибающие колебания. Деление на отрезки по высоте изолятора обусловлено необходимостью определить характерные сечения, в которых будут наблюдаться наибольшие величины перерезывающих сил и моментов (рис. 3).

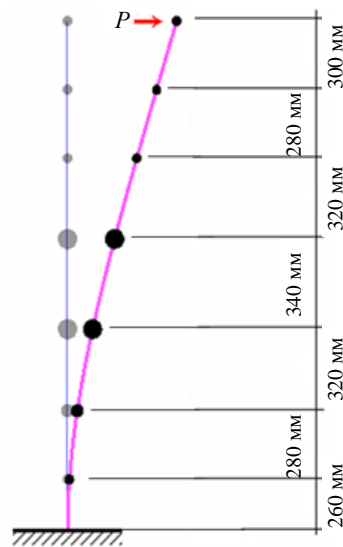


Рис. 3. Воздействие динамической силы на опорный изолятор

Fig. 3. Impact of the dynamic force on the support insulator

Вынужденными продольными колебаниями, вызванными составляющими динамической силы вдоль изолятора, пренебрегаем, так как упругая податливость изоляторов в этом направлении незначительна [5]. Для выбранной расчетной модели вынужденные поперечные колебания опорных изоляторов без учета затухания, влияния инерции вращения и поперечной силы представляются в виде ряда [4]

$$R_i = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} X_j, \quad i = x, y; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где n – количество учитываемых частот собственных колебаний изолятора; φ_{ij} – функции времени; X_j – нормальные функции, соответствующие условиям закрепления на концах колеблющегося стержня.

Для принятой расчетной модели опорного изолятора в виде консоли нормальные функции имеют вид [3]

$$X_j = \operatorname{ch} k_j z' - \cos k_j z' - \alpha_i (\operatorname{sh} k_j z' - \sin k_j z'), \quad (5)$$

где k_j – параметры собственных частот колебаний опорного изолятора, определяются как

$$k_j = \operatorname{ch} k_j l \cos k_j l = -1; \quad (6)$$

l – длина изолятора; z' – текущая координата по длине изолятора, $z' = l - z$; α_i – коэффициенты, рассчитываемые по значениям корней частотного уравнения из выражения

$$\alpha_i = \frac{\cos k_j l + \operatorname{ch} k_j l}{\sin k_j l + \operatorname{sh} k_j l}. \quad (7)$$

Функции времени φ_{ij} определяются из уравнения [3]

$$\frac{d^2 \varphi_{ij}}{dt^2} + \omega_j^2 \varphi_{ij} = \frac{2P_i}{ml} (-1)^{j+1}, \quad i = x, y, \quad (8)$$

где ω_j – угловые частоты последовательных форм колебаний, определяемые как

$$\omega_j^2 = \frac{EJ}{m} k_j^4; \quad (9)$$

EJ – изгибная жесткость опорного изолятора; m – масса единицы длины изолятора, рад/с².

Математическая модель динамики опорного изолятора представлена в общем виде и актуальна вне зависимости от изменений динамических усилий. Она проверена по аналитическому решению задачи, полученному для синусоидальной силы [4]. Для определения перерезывающих сил и моментов с погрешностью, не превышающей 3 %, следует учитывать минимум 11 гармоник ряда (4) [6].

В ходе выполнения исследования в качестве примера произведен расчет собственной частоты колебаний опорного изолятора марки ИОС-110-600, паспортные данные которого приведены в табл. 1. Параметры изолятора приняты в соответствии с конструктивными чертежами.

Таблица 1

Параметры опорного изолятора марки ИОС-110-600
Parameters of the reference insulator of the brand IOS-110-600

Тип изолятора	Номинальное напряжение, кВ	Минимальная разрушающая нагрузка на изгиб, даН	Масса, кг	Высота изолятора H , мм	Наибольший диаметр изоляционной части D , мм	Высота фланца, мм	
						верхнего h_1	нижнего h_2
ИОС-110-600	110	600	71	2100	225	94	94

Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР [7], позволяющего определить не только численные значения гармоник собственных колебаний, но и их форму. Значения частот собственных колебаний для опорного изолятора марки ИОС-110-600 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Частоты собственных колебаний изолятора марки ИОС-110-600
Natural oscillation frequencies of the insulator of the brand IOS-110-60

Номер гармоники	Частота, рад/с	Частота, Гц	Период, с
1	0,137039	0,0218104	45,8497000
2	0,690178	0,109845	9,1037200
3	2,013330	0,320432	3,1207900
4	4,147060	0,660025	1,5151000
5	5,841330	0,929676	1,0756400
6	9,523090	1,515650	0,6597850
7	11,794900	1,877210	0,5327050
8	14,288500	2,274080	0,4397380
9	27,195900	4,328370	0,2310340
10	41,146500	6,548670	0,1527030
11	53,914200	8,580720	0,1165400
12	73,649500	11,721700	0,0853120
13	89,879000	14,304700	0,0699071
14	108,185000	17,218100	0,0580783

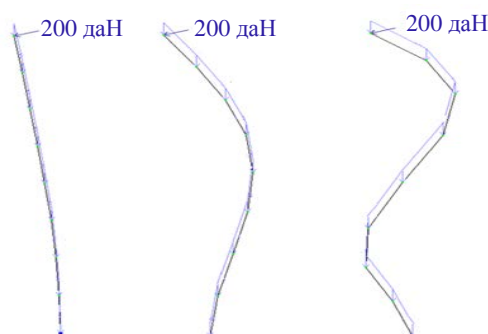


Рис. 4. Первые три собственные формы колебаний изолятора

Fig. 4. The first three natural waveforms of the insulator

Экспериментально доказано, что упругая система с распределенными параметрами и малым демпфированием при гармоническом возбуждении испытывает резонансные колебания на некоторых явно выраженных характерных частотах [8]. Каждой такой резонансной или собственной частоте соответствует собственная или нормальная форма распределения амплитуд колебаний изолятора. Первые три собственные формы колебаний изолятора (рис. 4) и связанные с ними частоты определяются геометрической формой и размерами самого изолятора, не зависят от внешних нагрузок и являются весьма важными динамическими характеристиками распределения его инерционных и жесткостных свойств [6].

Собственные колебания возникают в изолированной системе вследствие внешнего воздействия, вызывающего у точек системы начальные отклонения от положения равновесия [9]. После удаления внешнего воздействия движение системы происходит благодаря наличию внутренних упругих сил, восстанавливающих равновесие [4].

Согласно [2], при совпадении частот собственных колебаний конструктивных элементов ОРУ с частотой воздействующего динамического тяжения возможно двукратное увеличение перерезывающих сил и моментов по сравнению с амплитудой приложенного тяжения. Следовательно, для анализа электродинамической стойкости необходимо провести частотный анализ вынужденных колебаний. В качестве их возбудителя в данном случае выступают подвижные элементы конструкции – токоведущие части открытого распределительного устройства. С помощью разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ компьютерной программы FLEBUS 2.0 получены характерный осциллограммы динамических усилий в результате моделирования двухфазного КЗ величиной 30 кА в ячейке типового ОРУ 110 кВ (рис. 5).

На рис. 5 цифрой 1 обозначены кривые тяжения фазы В, С. Остальные кривые являются результатом частичной интерполяции и на определенных промежутках приблизительно описывают начальный график.

Особый интерес представляет кривая 5 (рис. 5), так как именно она на промежутке 0,53–0,70 с совпадает с характерным максимумом тяжения, принятым в качестве расчетного усилия на изолятор. Согласно графикам, величина этого усилия составляет 200 даН.

С помощью программы Advanced Grapher [10] методом регрессивного анализа получена функция, описывающая кривую 5 динамических усилий:

$$f(x) = (7,36 \cdot 10^8)x^6 + (2,71 \cdot 10^9)x^5 - (4,12 \cdot 10^9)x^4 + (3,34 \cdot 10^9)x^3 - (1,51 \cdot 10^9)x^2 + (3,71 \cdot 10^8)x - (3,72 \cdot 10^7). \quad (10)$$

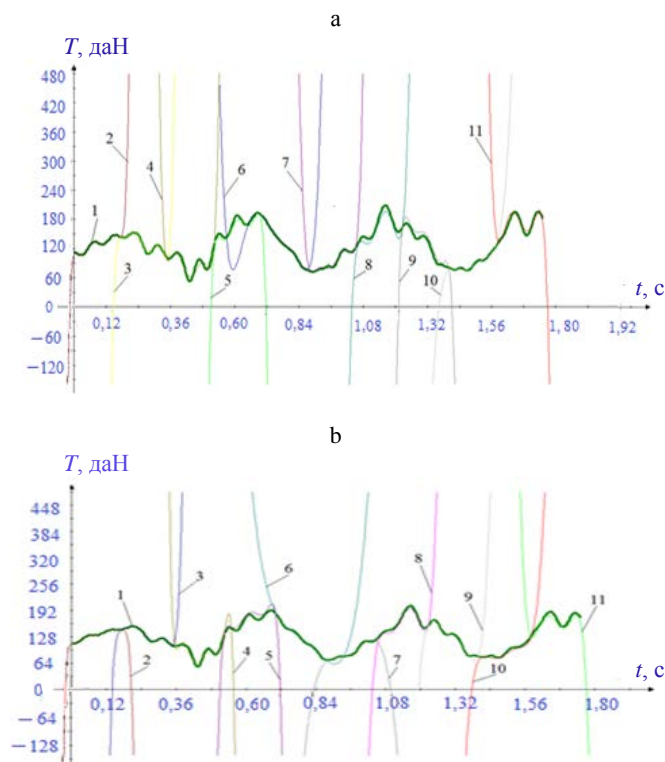


Рис. 5. Графики динамических тяжений: а – фазы В; б – фазы С

Fig. 5. Graph of the dynamic tensions: a – phase B; b – phase C

Для частотного анализа данной функции разложим ее в ряд Фурье [11]:

$$f(x) = \frac{a_0}{T} + \sum a_n \cos\left(\frac{\pi n x}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{\pi n x}{T}\right);$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) dx;$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) \cos\left(\frac{\pi n x}{T}\right) dx;$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) \sin\left(\frac{\pi n x}{T}\right) dx,$$
(11)

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – количество учитываемых гармоник.

При $T = 0,17$; $a_0 = \frac{1}{0,17} \int_{0,53}^{0,7} f(x) dx = 7678283,65$ получим:

$$a_n = \left\{ 1,4286\pi^5 n^5 \left[12403311,2(-1)^n - 180810000 \right] + \right.$$

$$\left. + 1,4286\pi^3 n^3 \left[21551376,0(-1)^n + 4811604000 \right] - \right.$$
(12)

$$-1,4286\pi n \left[5522914656,0(-1)^n + 38118276000 \right] / (\pi^7 n^7);$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(x) \sin\left(\frac{\pi n x}{T}\right) dx = 0.$$

Окончательно ряд для первых одиннадцати членов имеет вид

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos 18,47x + a_2 \cos 36,94x + a_3 \cos 55,41x + a_4 \cos 73,88x + \\ + a_5 \cos 92,35x + a_6 \cos 110,82x + a_7 \cos 129,29x + a_8 \cos 147,76x + \quad (13) \\ + a_9 \cos 166,23x + a_{10} \cos 184,71x + a_{11} \cos 203,17x \dots + a_n \cos\left(\frac{\pi n x}{T}\right).$$

Значения частот вынужденных колебаний представлены в табл. 3

Таблица 3

Частоты вынужденных колебаний
Frequencies of forced oscillations

Номер гармоники	Частота, рад/с	Частота, Гц	Период, с
1	18,47	2,9411	0,3401
2	36,94	5,8821	0,1701
3	55,41	8,8232	0,1133
4	73,88	11,7643	0,0850
5	92,35	14,7054	0,0680
6	110,82	17,6464	0,0566
7	129,29	20,5875	0,0485
8	147,76	23,5286	0,0425
9	166,23	26,4697	0,0377
10	184,71	29,4124	0,0339
11	203,17	32,3519	0,0309

Из данных из табл. 2, 3 видно, что некоторые частоты гармоник вынужденных колебаний близки к значениям собственных частот колебаний опорного изолятора, т. е. рассматриваемая система потенциально может войти в резонанс, следовательно величины перерезывающих сил и моментов будут больше допустимых, что может привести к возникновению опасных механических напряжений в материале корпуса изолятора и его разрушению.

Подводя итог, можно заключить, что при выполнении динамического расчета надлежит обязательно определять частоты свободных колебаний и проводить их сравнение с частотами вынуждающих сил [12]. Рекомендуется, чтобы частота свободных колебаний была больше частоты вынужденных колебаний. В большинстве случаев нельзя добиться изменения частот вынужденных колебаний, следовательно, необходимо изменять частоты свободных колебаний. Как показал вычислительный эксперимент, на величину частот собственных колебаний конструктивных элементов можно

влиять путем изменения их механических и геометрических параметров [13]. Например, частота собственных колебаний опорного изолятора возрастает при увеличении жесткости материала корпуса или уменьшении высоты изолятора.

ВЫВОДЫ

1. Разработан численный метод расчета электродинамической стойкости конструктивных элементов распределительных устройств, в котором гибкие проводники вместе с опорными конструкциями рассматриваются как единая колебательная система при коротком замыкании. Достоверность расчетов подтверждена сравнением их результатов с опытными данными. Выполнен частотный анализ собственных и вынужденных колебаний конструктивных элементов распределительных устройств.

2. Поставлен вычислительный эксперимент по оценке влияния механических и геометрических параметров конструктивных элементов на параметры электродинамической стойкости. Подтверждена возможность наступления резонанса при совпадении частот вынужденных и собственных колебаний.

3. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании электроустановок с гибкими проводами. Предложены рекомендации по увеличению частоты собственных колебаний конструктивных элементов распределительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., перераб. и доп. М., 2007. 512 с.
2. Сергей, И. И. Динамика гибких проводов электроустановок энергосистем: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей. Минск, 2002. 324 л.
3. Долин, А. П. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой / А. П. Долин, Г. Ф. Шонгин. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
4. Писаренко, Г. С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материала / Г. С. Писаренко. Киев: Наукова думка, 1970. 379 с.
5. Строительная механика / А. А. Поляков, Ф. Г. Лялина, Р. Г. Игнатов; под общ. ред. А. А. Полякова. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 424 с.
6. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. М.: Наука, 1976. 607 с.
7. Программный комплекс ЛИРА-САПР-2013 / под ред. А. С. Городецкого. К.; М.: Электрон. изд., 2013. 376 с.
8. Сергей, И. И. Оценка эффективности устройства ограничения тяжёлых проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Я. В. Потачиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 309–319. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319>.
9. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учетом конструктивных элементов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.

10. Евстегнеева, А. С. Использование компьютерной программы Advanced Grapher как средство реализации принципа наглядности в процессе обучения математике / А. С. Евстегнеева // Молодой ученый. 2018. № 2. С. 108–112.
11. Романова, Л. Д. Интегральные преобразования / Л. Д. Романова, Т. А. Шаркунова, Т. В. Елисеева. Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. 80 с.
12. 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.
13. Совершенствование методов расчета электродинамической стойкости электроустановок с гибкими проводниками с учетом влияния конструктивных элементов: отчет о НИР (заключит.) / БНТУ; рук. Е. Г. Пономаренко; исполн.: П. И. Климович, А. Г. Баран, Я. В. Потачиц, А. А. Васильева, Е. К. Башаркевич, В. В. Журкевич. № ГР 20191009. Минск, 2020. 70 с.

Поступила 02.02.2021 Подписана в печать 06.04.2021 Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. *Rules for the Installation of Electrical Equipment*. 7th ed. Moscow, 2007 (in Russian).
2. Sergei I. I. (2002) *Dynamics of Flexible Wires of Electrical Installations of Power Systems: Theory and Computational Experiment*. Minsk. 324 (in Russian).
3. Dolin A. P., Shongin G. F. (1988) *Open Switchgear with Rigid Busbar*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 192 (in Russian).
4. Pisarenko G. S. (1970) *Vibrations of Mechanical Systems Taking into Account the Imperfect Elasticity of the Material*. Kiev, Naukova dumka Publ. 379 (in Russian).
5. Polyakov A. A., Lyalina F. G., Ignatov R. G. (2014) *Construction Mechanics*. Ekaterinburg, Ural Federal University. 424 (in Russian).
6. Belyaev N. M. (1976) *Resistance of Materials*. Moscow, Nauka Publ. 607 (in Russian).
7. Gorodetskii D. A., Barabash M. S., Vodop'yanov R. Yu., Titok V. P., Artamonova A. E. (2013) *LIRA-CAD-2013 Software Package*. Kiev; Moscow, Elektronnoe izdanie Publ. 376 (in Russian).
8. Sergey I. I., Panamarenka E. G., Potachits Ya. V. (2017) Evaluation of the Efficiency of the Device for Limiting Tension of the Wire in a Short Circuit. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 309–319. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319> (in Russian).
9. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when a Concentrated Load is Being Replaced with a Distributed One Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234> (in Russian).
10. Evstegneeva A. S. (2018) Using the Advanced Grapher Computer Program as a Means of Implementing the Principle of Visibility in the Process of Teaching Mathematics. *Molodoi Uchenyi [Young Scientist]*, (2), 108–112 (in Russian).
11. Romanova L. D., Sharkunova T. A., Eliseeva T. V. (2015) *Integral Transformations*. Penza, Penza State University Publ. 80 (in Russian).
12. Sergei I. I., Strelyuk M. I. (1999) *Dynamics of Wires of Electrical Installations of Power Systems under Short Circuits: Theory and Computational Experiment*. Minsk, VUZ-YUNITI Publ. 252 (in Russian).
13. Panamarenka E. G., Klimkovich P. I., Baran A. G., Potachits Ya. V., Vasil'eva A. A., Basharkevich E. K., Zhurkevich V. V. (2020) *Improvement of Methods for Calculating the Electrodynamical Stability of Electrical Installations with Flexible Conductors Taking into Account the Influence of Structural Elements: Research Project Report (Final)*. Number of State Registration GR 20191009. Minsk, BNTU. 70 (in Russian).

Received: 2 February 2021

Accepted: 6 April 2021

Published online: 31 May 2021