

3. A n i s h c h e n k o, V. A., & Severin, L. A. (2008) Methods of Choice of Unrestorable (Unrepairable) Reserved Control Systems of Technological Processes. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 2, 5–10 (in Russian).
4. A n i s h c h e n k o, V. A., Ivanova, A. N., & Myslo, E. L. (2012) Choice of Unrestorable Reserved Control Systems for Power Processes. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 5, 35–43 (in Russian).
5. D i l l o n, B., & Singh, Ch. (1984) *Engineering Methods of Providing Systems' Reliability*. Moscow, Mir. 318 p. (in Russian).
6. G u k, Yu. B. (1988) *Analysis of Reliability of Electric Power Plants*. Leningrad, Energoatomizdat. 217 p. (in Russian).
7. G u k, Yu. B. (1990) *Theory of Reliability in Power Engineering*. Leningrad, Energoatomizdat. 208 p. (in Russian).
8. D r u z h i n i n, G. V. (1976) *Theory of Reliability of Radioelectronic Systems in Examples and Problems*. Moscow, Energia. 448 p. (in Russian).
9. G l a s u n o v, L. P., Grabovetsky, V. P., & Shcherbakov, O. V. (1984) *Fundamentals of Reliability Theory of Automatic Control Systems*. Leningrad, Energoatomizdat. 208 p. (in Russian).
10. A n i s h c h e n k o, V. A., Myslo, E. L., & Ivanova, A. N. (2013) Reliability of Dual Engineering System with Built Control Equipment. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 5, 5–10 (in Russian).

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 07.04.2014

УДК 517.9+533.6

## **ПЛЯСКА ПРОВОДОВ ЛЭП – НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПО ЛЯПУНОВУ**

**Докт. техн. наук, проф. ВАНЬКО В. И.,  
канд. физ.-мат. наук, доц. МАРЧЕВСКИЙ И. К.**

*Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана*

E-mail: vvanko@mail.ru

Описано явление потери аэродинамического демпфирования, или аэродинамической неустойчивости профиля в потоке, наблюдаемое в экспериментах и инженерной практике. Применительно к промышленным высоковольтным линиям электропередачи данное явление обычно называют галопированием (пляской) фазных проводов. Показано, что его можно объяснить неустойчивостью по Ляпунову положений равновесия профилей (поперечных сечений) провода. В дополнение к известному условию неустойчивости Глауэрта – ден-Гартога получено удобное для практического применения условие неустойчивости, зависящее только от стационарных аэродинамических коэффициентов профиля – безразмерных коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы, а также от их производных по углу атаки.

Предложен эффективный численно-аналитический метод исследования устойчивости положений равновесия профиля в потоке, разработанный в последние годы на кафедре «Прикладная математика» МГТУ имени Н. Э. Баумана. Данный метод предполагает определение стационарных аэродинамических характеристик профиля путем численного моделирования обтекания профиля под различными углами атаки методом вихревых элементов и последующее применение аналитических условий устойчивости и неустойчивости по Ляпунову положений равновесия. Приведенные результаты решения тестовых задач по исследованию устойчивости ромбического и квадратного профи-

лей, а также характерного профиля обледенелого провода и их сравнение с известными результатами экспериментов в аэродинамических трубах свидетельствуют об адекватности и достаточной точности разработанных методов и алгоритмов. Использование бессеточного лагранжева метода вихревых элементов и реализующее его программное обеспечение позволяют также решать сопряженные задачи аэрогидроупругости и производить прямое численное моделирование движения профиля в потоке. Приведены ссылки на исследования различных авторов в данной области.

**Ключевые слова:** аэродинамический эксперимент, аэродинамическая неустойчивость, условия неустойчивости по Ляпунову, метод вихревых элементов.

Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 19 назв.

## TRANSMISSION LINE-WIRE DANCING (GALLOPING) – LYAPUNOV INSTABILITY

VANKO V. I., MARCHEVSKI I. K.

*Bauman Moscow State Technical University*

This article describes aerodynamic losses of damping, or aerodynamic instability, which we observe in experiments and in engineering practice. As applied to industrial high-voltage lines this phenomenon is usually called galloping (dancing) of phase line wires. This phenomenon can be explained by Lyapunov's instability of equilibrium state of wires profile (cross-section). In addition to known condition of Grauert-den-Hartog's instability there was obtained practical condition of instability, which depends only on stationary aerodynamic profile's factor – dimensionless coefficient of head resistance and lift coefficient, and also on their derivative with respect to the angle of attack.

There was suggested an effective numerical-analytical method of investigation of stability for equilibrium of profile's state in flow, which was developed at the department "Applied mathematics" of Bauman MSTU. This method allows to determine the stationary aerodynamics characteristics of profile by numerical simulation of profile flow under different angles of attack by vortex element method and later on the application of analytical conditions of stability and Lyapunov's instability of equilibrium positions. The obtained results during the investigation of rhombic and square profiles stability, as well as general profile of iced wire, and their comparisons with the known experiments' results in aerodynamic tubes indicate the precision of developed methods and algorithms. The usage of mesh-free Lagrange method of vortex elements and software for their realization allows to solve also dual problems of aeroelastocity and to carry out direct numerical simulation of profile movement in flow. In this article the investigations' results of different authors in this field were taken into account.

**Keywords:** aerodynamic experiment, aerodynamic instability, Lyapunov instability, method of vortex elements.

Fig. 6. Tab. 1. Ref.: 19 titles.

При проведении экспериментов по продувке моделей в аэродинамической трубе наблюдали следующее явление: существует интервал углов атаки (для каждого профиля – свой)  $[\alpha_1, \alpha_2]$ , на котором амплитуда колебаний центра масс профиля резко возрастает, а затем так же резко падает. Это обычно связывают со срывом с профиля сформировавшегося пограничного слоя (не стоит смешивать это явление с «захватом частот») и называют аэродинамической неустойчивостью или потерей аэродинамического демпфирования [1].

Эксперимент, проведенный в лаборатории промышленной аэродинамики ЦАГИ имени Н. Е. Жуковского [1], показан на рис. 1: длинный брус ромбического поперечного сечения (нижнее сечение бруса опиралось на шаровой шарнир, верхнее поддерживалось упругими пружинами) помещен

в аэродинамическую трубу. Изменяли угол атаки и для каждого его значения измеряли максимальную амплитуду колебаний центра масс верхнего сечения. На рис. 1 также представлен график  $\bar{A}_{\max}(\alpha)$  ( $\bar{A}$  – амплитуда колебаний, отнесенная к диагонали  $a$  ромба).

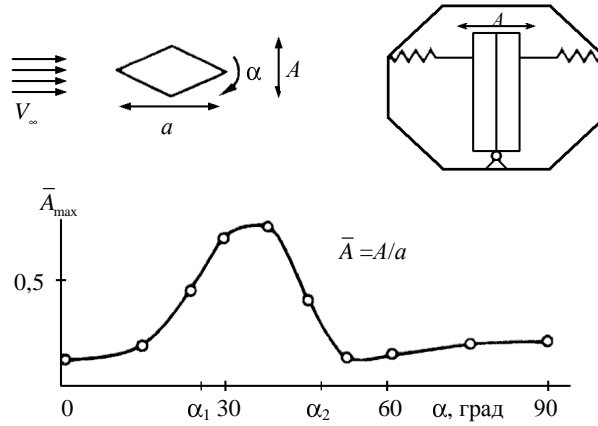


Рис. 1

Обработывая экспериментальный материал, представленный в [2] (изучая крутильные колебания модели биплана вокруг продольной оси при различных углах атаки – углах между направлением потока и осью вращения модели), Глауэрт получил необходимое условие авторотации [3]:

$$G(\alpha) = C'_y + C_x < 0, \quad (1)$$

где  $C_y$ ,  $C_x$  – стационарные аэродинамические коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления; штрихом в тексте статьи обозначаем производную по углу атаки.

Позже условие (1) было получено в [4] при моделировании пляски (галопирования) провода линии электропередачи (ЛЭП) как необходимое условие возникновения колебаний с большой амплитудой перпендикулярно к направлению ветра. Итак, при исследовании автоколебаний с одной степенью свободы – авторотации и галопирования – неравенство (1) является необходимым условием аэродинамической неустойчивости.

В [5] при исследовании пляски провода ЛЭП было получено достаточное условие неустойчивости по Ляпунову положений равновесия профиля в плоскопараллельном движении (три степени свободы)

$$W(\alpha) = C_x(C'_y + C_x) + C_y(C_y - C'_x) < 0. \quad (2)$$

Условие (2) после раскрытия скобок и деления неравенства на  $C_x^2 \neq 0$  удобно представить в терминах аэродинамического качества (АДК)  $K = C_y / C_x$

$$W(\alpha) = K' + K^2 + 1 < 0. \quad (3)$$

То есть для выполнения условия (2) необходимо, чтобы производная АДК по углу атаки была отрицательной

$$K' < 0. \quad (4)$$

Известно, например, что при выполнении условия (4) положение самолета в стационарном полете чревато срывом в штопор [6]. В [7] даны примеры исследования адекватности условий (1) и (2) на материале испытательных профилей в аэродинамической трубе ЦАГИ имени Н. Е. Жуковского: рассматривались плохообтекаемые профили – ромбический, квадратный, прямоугольный, астроидальный. В [8] приведены графики зависимостей  $C_x = C_x(\alpha)$  и  $C_y = C_y(\alpha)$  для крылового (хорошо обтекаемого) профиля с большим значением АДК (рис. 2).

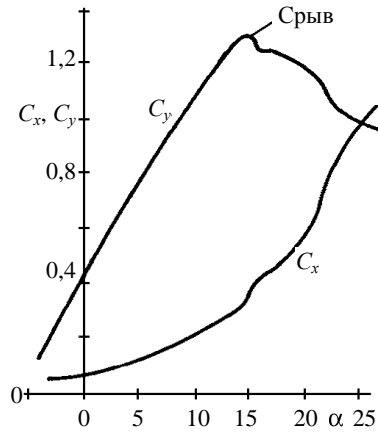


Рис. 2

При  $\alpha \approx 14,75^\circ$  отмечены срыв потока и потеря аэродинамического демпфирования. Результаты обработки кривых  $C_x(\alpha)$  и  $C_y(\alpha)$  по условиям (1) и (2) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обработки зависимостей  $C_x(\alpha)$  и  $C_y(\alpha)$  по условиям (1) и (2)

$\alpha$ , град.	$C_x$	$C_y$	$K = C_y/C_x$	$G(\alpha)$	$W(\alpha)$
0	0,0777	0,4440	5,7141	3,267	28,521
5	0,1332	0,7437	5,8333	3,323	31,812
10	0,2220	1,0545	4,7500	4,050	13,113
12	0,2553	1,1655	4,5652	2,807	15,048
13	0,2775	1,2210	4,4000	3,467	7,197
14	0,3108	1,2765	4,1071	8,849	-31,117
14,75	0,3718	1,2876	3,4632	-4,454	-21,445
15	0,3829	1,2654	3,3048	-2,169	-11,645
...	...	...	...	< 0	< 0
25°	0,9546	0,9546	1,0000	-0,637	-2,178

Определение аэродинамических коэффициентов профиля и их производных, входящих в выражения  $G(\alpha)$  и  $W(\alpha)$ , возможно экспериментальным, а также расчетным путями. На практике можно использовать, например, вихревые методы, позволяющие при сравнительно низких затратах вычислительных ресурсов моделировать обтекание профиля несжимаемым потоком и с достаточной точностью определять нужные характеристики. Метод вихревых элементов (ВЭ) [9–11] особенно эффективен при решении внешних задач обтекания, поскольку на каждом шаге расчета по времени уравнение неразрывности и граничное условие затухания возмущений на бесконечности выполняются автоматически. Выполнение граничного условия на профиле обеспечивается генерацией ВЭ на поверхности обтекаемых профилей, а само течение идеальной либо вязкой среды моделиру-

ется движением сгенерированных ВЭ. Высокая эффективность метода ВЭ и его модификаций при решении задач моделирования обтекания профилей подтверждается результатами тестовых расчетов [10–12].

Описанный выше метод ВЭ положен в основу численно-аналитического метода [12] исследования устойчивости положений равновесия профиля в потоке. При этом последовательно используются численный метод ВЭ и аналитические условия неустойчивости положений равновесия профиля (1) и (2). Алгоритм метода включает в себя три этапа:

- 1) моделирование обтекания профиля методом ВЭ при различных углах атаки и определение стационарных коэффициентов  $C_x$  и  $C_y$ ;
- 2) аппроксимацию зависимостей  $C_x(\alpha)$  и  $C_y(\alpha)$  гладкими кривыми;
- 3) определение при помощи условий (1) и (2) «опасных» интервалов углов атаки.

Для проверки работоспособности численно-аналитического метода и оценки его адекватности и эффективности были проведены тестовые расчеты по исследованию устойчивости положений равновесия профилей в форме ромба и квадрата, для которых известны экспериментальные данные [7]. При исследовании колебаний профиля обледенелого провода решали связанную задачу аэроупругости. Все параметры расчетных схем, а также особенности проведения вычислительных экспериментов и обработки результатов расчетов подробно описаны в [12, 13].

Приведем результаты приложений численно-аналитического метода.

1. *Профиль в форме ромба.* Исследуется устойчивость положений равновесия профиля, имеющего форму ромба с отношением длин диагоналей 1:0,75. Характерные картины, на которых показаны вихревые следы и линии тока для углов атаки профиля  $\alpha = 0$  и  $\alpha = 60^\circ$ , приведены на рис. 3.

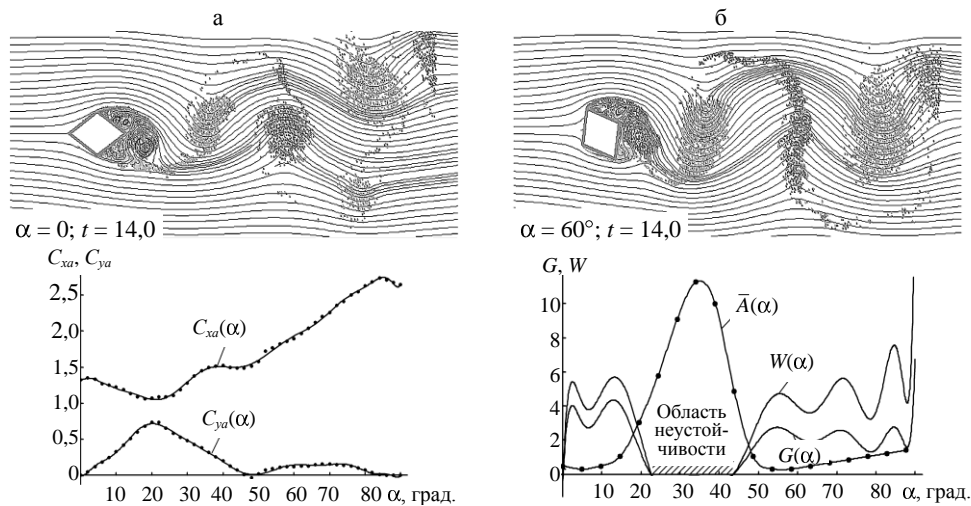


Рис. 3

При определении аэродинамических коэффициентов профиля в каждом расчете выполняли 5000 временных шагов, течение к этому моменту устанавливалось, и стационарные значения коэффициентов получали путем осреднения по последним 2500 шагам. Найденные значения отмечены на графике рис. 3. За точками, гладкие зависимости, показанные сплошными линиями, являются результатом аппроксимации полиномами Чебышева.

На рис. 3б сплошными линиями показаны зависимости  $G(\alpha)$  и  $W(\alpha)$ , построенные по приведенным ранее формулам (1) и (2). В эксперименте по продувке упруго закрепленного профиля в аэродинамической трубе измеряли амплитуды колебаний профиля поперек потока. Полученные экспериментально значения безразмерных амплитуд колебаний при различных углах атаки показаны на рис. 3б точками.

Видно, что найденный с использованием численно-аналитического метода диапазон углов атаки  $23^\circ < \alpha < 43^\circ$ , в котором обе функции  $G(\alpha)$  и  $W(\alpha)$  принимают отрицательные значения, хорошо согласуется с определенной в эксперименте областью углов, соответствующих возбуждению колебаний профиля с большой амплитудой (рис. 1).

2. *Квадратный профиль.* Аналогичное исследование было проведено для квадратного профиля. Картины обтекания профиля для углов атаки  $\alpha = 0$  и  $\alpha = 20^\circ$  приведены на рис. 4.

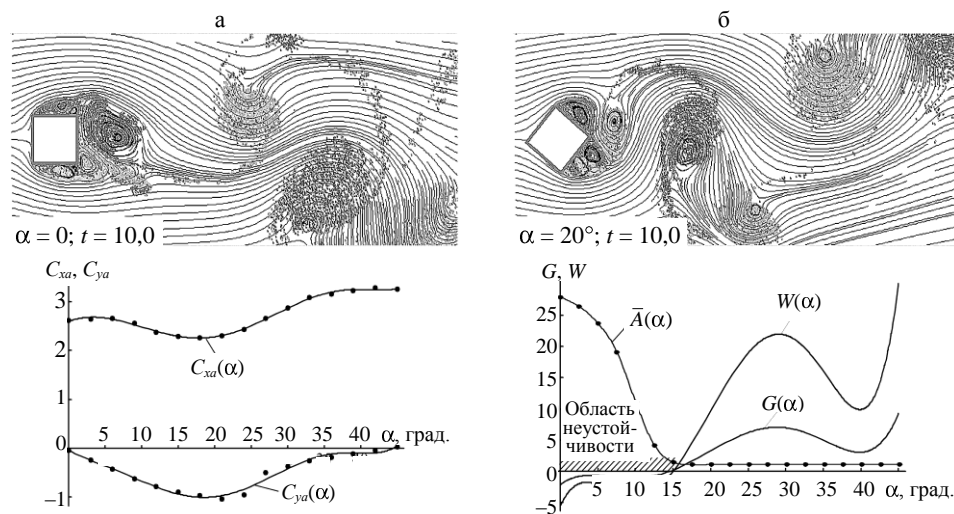


Рис. 4

На рис. 4а внизу показаны вычисленные значения аэродинамических коэффициентов и их аппроксимация гладкими кривыми, на рис. 4б внизу приведены графики функций  $G(\alpha)$  и  $W(\alpha)$ , наложенные на полученную в аэродинамическом эксперименте зависимость амплитуды колебаний от угла атаки.

Хорошее согласие диапазона углов атаки  $0 < \alpha < 15^\circ$ , в котором  $G(\alpha) < 0$  и  $W(\alpha) < 0$ , с областью углов, соответствующих неустойчивым положениям профиля в потоке, говорит об эффективности и адекватности построенного численно-аналитического метода.

3. *Колебания профиля обледенелого провода.* В литературе отмечается, что для проводов воздушных ЛЭП в условиях обледенения (особенно) характерно явление пляски, т. е. колебаний поперек ветрового потока воздуха с большой амплитудой [4]. Покажем, что упомянутые «большие» колебания возникают вследствие «попадания» угла атаки профиля в интервал  $[\alpha_1, \alpha_2]$ , для которого выполняются условия неустойчивости по Ляпунову.

Приводим результаты численного эксперимента на основе разработанного метода ВЭ (решали связанную задачу аэроупругости).

Характерная форма наледи, образовавшейся на круглом проводе, приведена на рис. 5, а также показана картина обтекания при нулевом угле атаки, соответствующем положению равновесия провода при скорости ветра, равной нулю [14]. В этом положении ( $\alpha = 0^\circ$ ) равновесие профиля неустойчиво в силу выполнения условий (1) и (2), что видно из рис. 5а, на котором также представлены значения стационарных аэродинамических коэффициентов  $C_x$  и  $C_y$ . Зависимости  $G(\alpha)$  и  $W(\alpha)$  (рис. 5б) показывают, что в интервале  $[\alpha_1, \alpha_2] = [-6^\circ, 9^\circ]$  выполняются условия неустойчивости по Ляпунову.

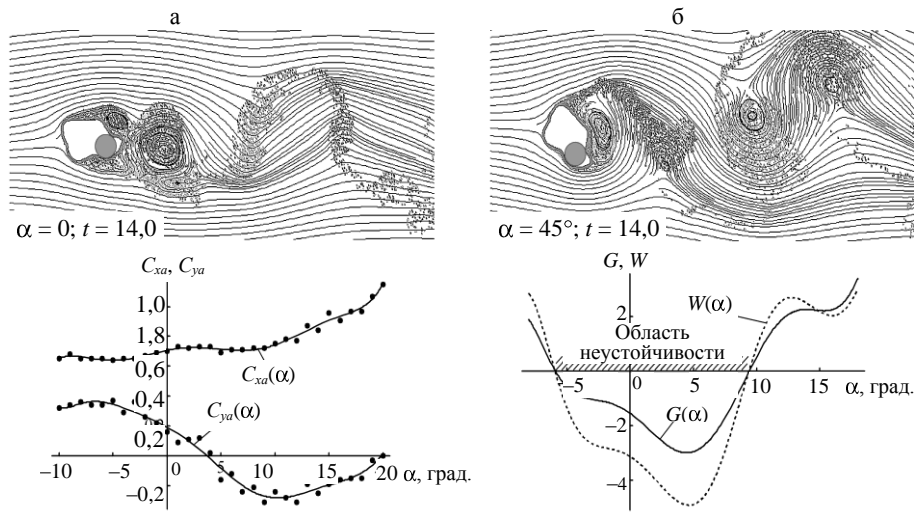


Рис. 5

При решении задачи в момент времени  $t = 0$  профиль занимает положение  $\alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]$ , т. е. оно неустойчиво. При  $t > 0$  под действием ветровых нагрузок и наложенных на профиль упругих связей (упругие пружины удерживают профиль от горизонтальных и вертикальных перемещений, а спиральная пружина создает сопротивление крутильным колебаниям вокруг центра масс профиля) профиль совершает сначала горизонтальное перемещение, затем начинаются нарастающие по амплитуде движения поперек потока воздуха. Угол атаки при этом изменяется, и пока  $\alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]$ , колебания происходят с большой амплитудой, что характерно для пляски провода.

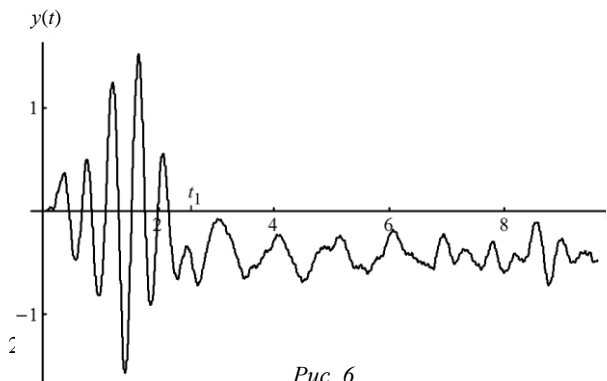


Рис. 6

Изменения угла атаки приводят к выходу из «опасного» интервала; амплитуда колебаний существенно понижается, и при  $t > t_1$  ее значения соответствуют вибрации в силу срыва вихрей Кармана (рис. 6).

Профиль занимает устойчивое положение.

## ВЫВОДЫ

1. Методами теории устойчивости по Ляпунову получены достаточные условия неустойчивости положений равновесия, зависящие только от стационарных аэродинамических коэффициентов профиля и их производных по углу атаки. Результаты анализа построенных математических моделей колебаний проводов линий электропередачи и их сравнение с экспериментальными данными показывают, что галопирование (пляску) проводов следует рассматривать как проявление неустойчивости по Ляпунову их положений равновесия.

2. На промышленных линиях электропередачи галопирующий провод, как правило, до состояния устойчивых колебаний «не доживает» вследствие обрыва самого провода либо повреждения гирлянд изоляторов [15]. В [16] разработана методика расчета аэроупругих колебаний провода линии электропередачи, в которой выполняется прямое численное моделирование нестационарного обтекания сечений провода. Такой подход не требует предварительного определения стационарных аэродинамических коэффициентов профиля (как это делается в работах минской школы [17, 18]) и позволяет рассчитывать переходные режимы колебаний при существенно нестационарных аэродинамических нагрузках, например при порыве ветра. На конкретном примере показано, что при постоянном ветре учет нестационарного характера аэродинамических нагрузок приводит к снижению амплитуды пляски на 10–15 %.

3. В [19] предпринята попытка оценки аэродинамической неустойчивости расщепленной фазы обледенелых проводов линии электропередачи «при условии введения минимума упрощающих предположений». При этом принимается изначально линейная система уравнений движения, а аэродинамический напор вычисляется по скорости ветра. С такими «упрощающими предположениями» авторы согласиться не могут.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ф е д я е в с к и й, К. К. Гидроаэродинамика отрывного обтекания тел / К. К. Федяевский, Л. Х. Блюмина. – М.: Машиностроение, 1977. – 198 с.
2. R e l f, E. H. The Auto-Rotation of Stalled Aerofoils and its Relation to the Spinning Speed of Aeroplanes / E. H. Relf, T. Lavender // Reports & Memoranda / Great Britain Advisory Committee for Aeronautics. – 1918. – No 549. – 9 p.
3. G l a u e r t, H. The Rotation of an Aerofoil About a Fixed Axis / H. Glauert // Reports & Memoranda / Great Britain Advisory Committee for Aeronautics. – 1919. – No 595. – 8 p.
4. D e n - H a r t o g, J. P. Transmission Line's Vibrations Due to Sleet / J. P. Den-Hartog // Transactions AIEE. – 1932. – Vol. 51. – P. 1074–1076.
5. В а н ь к о, В. И. Математическая модель пляски провода ЛЭП / В. И. Ванько // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1991. – № 11. – С. 36–42.
6. П ы ш н о в, В. С. Основные этапы развития самолета / В. С. Пышнов. – М.: Машиностроение, 1984. – 84 с.
7. В а н ь к о, В. И. Об условиях аэродинамической неустойчивости положений равновесия профилей / В. И. Ванько, Е. В. Соловьева // Прикладная механика и техническая физика. – 1996. – Т. 37, № 5. – С. 29–34.
8. Ч ж е н, П. Отрывные течения: в 2 т. / П. Чжен. – М.: Мир, 1973. – Т. 2. – 280 с.



9. C o t t e t, G. H. *Vortex Methods: Theory and Practice* / G. H. Cottet, P. Koumoutsakos. – Cambridge: University Press, 2008. – 328 p.

10. А н д р о н о в, П. Р. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок / П. Р. Андронов, С. В. Гувернюк, Г. Я. Дынникова. – М.: Изд-во МГУ имени М. В. Ломоносова, 2006. – 184 с.

11. Д ы н н и к о в а, Г. Я. Вихревые методы исследования нестационарных течений вязкой несжимаемой жидкости: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Г. Я. Дынникова. – М., 2011. – 269 с.

12. М а р ч е в с к и й, И. К. Математическое моделирование обтекания профиля и исследование его устойчивости в потоке по Ляпунову: дис. ... канд. физ.-мат. наук / И. К. Марчевский. – М., 2009. – 119 с.

13. В а н ь к о, В. И. Численно-аналитический метод исследования устойчивости положений равновесия профиля в потоке / В. И. Ванько, И. К. Марчевский, Г. А. Щеглов // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2011. – Спец. выпуск «Прикладная математика». – С. 3–10.

14. Б у ч и н с к и й, В. Е. Атлас обледенения проводов / В. Е. Бучинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 114 с.

15. К о л е б а н и я проводов воздушных линий под воздействием ветра: учеб.-метод. пособие / под ред. А. А. Виноградова. – М.: Электросетьстройпроект, 1985. – 195 с.

16. И в а н о в а, О. А. Математическое моделирование аэроупругих колебаний провода линии электропередачи: дис. ... канд. физ.-мат. наук / О. А. Иванова. – М., 2013. – 142 с.

17. С т р е л ю к, М. И. Численный метод расчета пляски проводов воздушных линий сверхвысокого напряжения / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, А. Г. Вотьяков // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1991. – № 6. – С. 8–12.

18. С е р г е й, И. И. Численное моделирование эксплуатационных статических и динамических режимов проводов ВЛ и кабелей / И. И. Сергей, А. А. Виноградов // Электрические станции. – 1998. – № 1. – С. 41–49.

19. П у с т ы л ь н и к о в, Л. Д. Аэродинамически неустойчивые колебания проводов воздушных линий электропередачи с гололедными отложениями / Л. Д. Пустыльников, В. А. Шкапцов // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1991. – № 2. – С. 103–109.

#### REFERENCES

1. F e d y a e v s k i, K. K., & Blyumina, L. Kh. (1977) *Hydrodynamics of Separated Flow Past a Body*. Moscow, Mashinostroenie. 198 p. (in Russian).

2. R e l f, E. H., & Lavender, T. (1918) The Auto-Rotation of Stalled Aerofoils and its Relation to the Spinning Speed of Aeroplanes. *Reports & Memoranda. Great Britain Advisory Committee for Aeronautics*, 549, 9 p.

3. G l a u e r t, H. (1919) The Rotation of an Aerofoil About a Fixed Axis. *Reports & Memoranda. Great Britain Advisory Committee for Aeronautics*, 595, 8 p.

4. D e n - H a r t o g, J. P. (1932) Transmission Line's Vibrations Due to Sleet. *Transactions AIEE*, 51, 1074–1076.

5. V a n k o, V. I., (1991) Mathematical Model of Transmission Wire-Lines Dancing. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 11, 36–42 (in Russian).

6. P i s h n o v, V. S. (1984) *The Main Stages of Air-Planes Development*. Moscow, Mashinostroenie. 84 p. (in Russian).

7. V a n k o, V. I., & Solovyeva, E. V. (1996) About Aerodynamic Instability of Profiles' Equilibrium. *Prikladnaia Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika* [Applied Mechanics and Engineering Physics], 37 (5), 29–34 (in Russian).

8. C h z e n, P. (1973) *Separated Flow*. Vol. 2. Moscow, Mir. 280 p. (in Russian).

9. C o t t e t, G. H., & Koumoutsakos, P. (2008) *Vortex Methods: Theory and Practice*. Cambridge, University Press. 328 p.

10. А н д р о н о в, П. Р., Гувернюк, С. В., & Дынникова, Г. Я. (2006) *Vortex Methods of Transient Hydrodynamic Load Calculation*. Moscow, Publications of Lomonosov Moscow State University. 184 p. (in Russian).

11. Д ы н н и к о в а, Г. Я. (2011) *Vikhrevye Metody Issledovaniia Nestatsionarnykh Techenii Viazkoi Neszhimaemoi Zhidkosti Diss. Dokt. Fiz.-Mat. Nauk* [Vortex Methods of Investigation for Nonstationary Flow of Non-Perfect Liquid. Dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences]. Moscow. 269 p. (in Russian).

12. M a r c h e v s k y, I. K. (2009) *Matematicheskoe Modelirovanie Obtekaniiia Profilia i Issledovanie Ego Ustoichivosti v Potoke po Liapunovu. Dis. Kand. Fiz.-Mat. Nauk* [Mathematical Modeling of Profile Flow And Investigation of its Stability in Flow According to Lyapunov Method. Dissertation of Ph.D. of Physical and Mathematical Sciences]. Moscow. 119 p. (in Russian).
13. V a n k o, V. I., Marchevsky, I. K., & Shcheglov, G. A. (2011) Numerical-Analytical Method of Investigation for Stability of Profile's Equilibrium in Flow. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. N. E. Baumana. Ser. Estestvennye Nauki* [Vestnik of Bauman Moscow State Technical University. Natural Sciences], Special edition "Applied Mathematics", 3–10 (in Russian).
14. B u c h i n s k y, V. E. (1966) *Atlas of Ice-Coved Wires*. Leningrad, Gidrometeoizdat. 114 p. (in Russian).
15. V i n o g r a d o v, A. A. (1985) *Vibration of Overhead Wires Under Wind Influence Air*. Moscow, Electrocetstroyproekt. 195 p. (in Russian).
16. I v a n o v a, O. A. (2013) *Matematicheskoe Modelirovanie Aerouprugikh Kolebanii Provoda Linii Elektroperedachi. Dis. Kand. Fiz.-Mat. Nauk* [Mathematical Simulation of Aeroelastic Vibrations of Transmission Wire-Lines. Dissertation of Ph.D. of Physical and Mathematical Sciences]. Moscow. 142 p. (in Russian).
17. S t r e l u k, M. I., Sergey, I. I., & Votyakov, A. G. (1991) Numerical Calculation Method of Air-Lines Dancing Under Over-High Voltage. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 6, 8–12 (in Russian).
18. S e r g e y, I. I., & Vinogradov, A. A. (1998) Numerical Modeling of Operational Statistic and Dynamic Aerial-Wires and Cables Regimes. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Stations], 1, 41–49 (in Russian).
19. P u s t i l n i k o v, L. D., & Shkaptsov, V. A. (1991) Aerodynamic Transient Vibrations of Transmission Overhead Wire-Lines with Ice Coverings. *Izvestiia Akademii Nauk SSSR. Energetika i Transport* [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Energy and Transport], 2, 103–109 (in Russian).

Представлена кафедрой  
прикладной математики

Поступила 03.03.2014

УДК 621.019

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ПАРКА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ**

**Докт. техн. наук, проф. ФАРХАДЗАДЕ Э. М.,  
канд. техн. наук, доц. МУРАДАЛИЕВ А. З., канд. техн. наук РАФИЕВА Т. К.,  
асп. АБДУЛЛАЕВА С. А.**

*Азербайджанский научно-исследовательский  
и проектно-изыскательский институт энергетики*

E-mail: fem1939@rambler.ru

Выключатели относятся к перечню оборудования энергосистем, надежность которых оказывает существенное влияние на надежность электроустановок. В частности, выключатели определяют структурную надежность схем распределительных устройств электростанций и сетевых подстанций. Отказ в отключении выключателем тока короткого замыкания с последующим отказом устройства резервирования отказов выключателей или защиты дальнего резервирования нередко приводит к системной аварии.

В условиях систематического увеличения эксплуатационных затрат на техническое обслуживание и ремонт масляных и воздушных выключателей проблема повышения их