УДК 517.928 : 519.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

© 2026 А.С. Кирсанова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 30.04.2026

В условиях глобального энергетического перехода малые ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения, в частности ротор Дарье, представляют особый интерес для городской инфраструктуры благодаря низкому уровню шума и нечувствительности к направлению ветра. Настоящее исследование посвящено исследованию математической модели малой ветроэнергетической установки Дарье, которая задается как трехтемповая система дифференциальных уравнений. Целью работы является изучение влияния нелинейной характеристики внешней нагрузки на возникновение критических режимов работы генератора. В основе исследования лежит трехтемповая система сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений. В отличие от предшествующих работ, где внешнее сопротивление рассматривалось как линейная функция, в данной статье оно рассматривается как квадратичная функция. Момент аэродинамических сил задан кусочно-линейной функцией. Наличие малых параметров позволяет применить аппарат теории релаксационных колебаний и теории траекторий-уток. Ключевым результатом является построение медленной кривой системы, определение ее устойчивых участков и точек срыва. Показано, что при изменении бифуркационного параметра α положение равновесия смещается вдоль медленной кривой. При переходе через критическое значение происходит бифуркация Андронова-Хопфа. В работе подробно описан сценарий трансформации колебаний: от траектории-утки «без головы» к траектории-утке «с головой» и далее к релаксационному циклу. Данный резкий переход, известный как уточный взрыв, происходит при чрезвычайно малом изменении управляющего параметра, что свидетельствует о высокой чувствительности модели. С физической точки зрения, возникновение релаксационных колебаний соответствует неблагоприятным режимам работы, создающим повышенные нагрузки на систему. В работе делается вывод, что даже при усложнении характера внешнего сопротивления в системе сохраняются все качественные особенности динамики, включая уточный взрыв. Проведенный анализ позволяет глубже понять границы устойчивости ветроэнергетических установок и может быть использован при проектировании систем управления, предотвращающих возникновение опасных колебательных режимов.

Ключевые слова: Математическое моделирование; динамические модели; ветрогенератор; траектории-утки; релаксационные колебания; сингулярные возмущения; инвариантные многообразия.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-4-188-194
EDN: JFAPYQ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания, шифр проекта FSSS-2026-0009.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение энергии ветра началось еще в древние времена, но интерес к ней резко возрос только в середине 20 века. В современном мире ветроэнергетика выступает как важнейший столп перехода к возобновляемым источникам энергии. Использование чистой энергии важно для мира, так как решает важные климатические проблемы, которые касаются каждого человека на Земле, такие как глобальное потепление, загрязнение атмосферы, выбросы углекислого газа и других вредных веществ, которые являются причиной парникового эффекта и кислотных дождей.

Наиболее распространенный тип ветрогенератора – это ветрогенератор с горизонтальной осью вращения (рис. 1a), но помимо него существуют ветрогенераторы с вертикальной осью вращения (рис. 1a). Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения в основном используют в городах, располагая на крышах зданий (рис. 1b). В статье рассматривается математическая модель малой ветроэнергетической установки Дарье. Данная установка была изобретена Жоржем Жаном Мари Дарье в 1931 году. Конструкция представляет собой вертикально ориентированный вал с прикрепленными к нему изогнутыми лопастями или аэродинамическими профилями, образующими форму, похожую на венчик для взбивания яиц (рис. 1c). Основное преимущество ветрогенераторов

Кирсанова Алена Сергеевна, аспирант. E-mail: askirsanova99@gmail.com

Дарье – это их способность к самозапуску даже при низкой скорости ветра и устойчивость к переменным направлениям ветра. Также у данной установки есть еще один важный плюс, они намного менее шумные, чем классические ветрогенераторы. Данные особенности делают их привлекательными для установки в городских условиях или на морских платформах, где пространство ограничено и условия ветра изменчивы.

Работы [1-2] освещают исследование ветроэнергетической установки с различными структурными решениями. В ходе изучения было отмечено, что механизм антипараллелограмма и ветродвигатель колебательного типа демонстрируют высокую степень устойчивости и динамических характеристик при работе в условиях переменной силы ветра. Кроме того, в статьях [3-5] рассмотрена электромеханическая система, моделирующая стационарные режимы генератора с использованием ветротурбинных двигателей, с применением качественных методов теоретической механики. В исследовании, описанном в [6], проанализировано уравнение стационарных режимов при различных значениях внешнего сопротивления в динамической модели ветрогенератора. В работе [7] был выполнен анализ критических режимов, используя метод траекторий-уток для кусочно-линейной аппроксимации аэродинамического момента. В [8-9] рассмотрена трехтемповая дифференциальная система и исследовано уравнение стационарных режимов при значении внешнего сопротивления динамической модели, заданного простейшим уравнением. Найдены условия, при которых в системе наблюдаются релаксационные колебания. Также, в статьях [10-11] рассмотрены различные аспекты конструктивной теории малых ветроэлектростанций.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается математическая модель малого ветрогенератора Дарье, которая представляет собой трехтемповую дифференциальную систему [3, 5, 7-9]:

$$\begin{cases} J\dot{\Omega} = M(\Omega) - kI, \\ L\dot{I} = k\Omega - (R + r)I, \\ \dot{R} = \varepsilon F(\Omega, I, R), \end{cases} \tag{1}$$

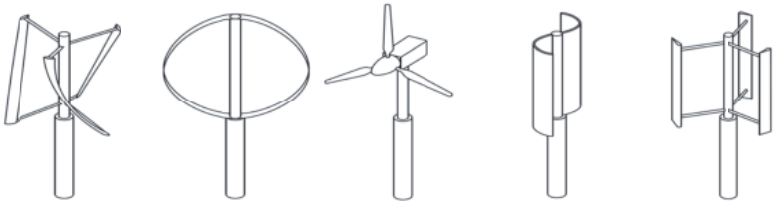
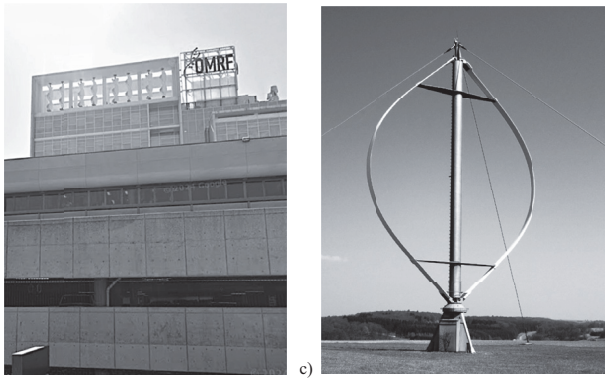


Рис. 1. a) Типы ветроустановок

где Ω – коэффициент быстроходности, I – сила тока в обмотке якоря, R – внешнее сопротивление, M – относительный момент аэродинамических сил, J – момент инерции турбины, L – индуктивность якоря. Остальные константы: k – коэффициент электромеханического взаимодействия, r – малое внутреннее сопротивление якоря. Величины L и ε рассматриваются, как малые параметры. Это означает, что в данной системе переменная I является самой быстрой, R самой медленной из трех переменных. Точка здесь означает производную по времени t.



b) c)

Рис. 1. b) Фонд медицинских исследований Оклахомы; c) Ветроэнергетическая установка Дарье

Непрерывная функция $M(\Omega)$ задается с помощью кусочно-линейной аппроксимации по промежуткам [7,8]:

$$M(\Omega)=\begin{cases}0{,}02906976745\Omega+0{,}12, & \text{где } \Omega\in[0;0{,}86];\\ -0{,}0638297872\Omega+0{,}199893617, & \text{где } \Omega\in[0{,}86;1{,}8];\\ 0{,}6431818180-1{,}0727272725, & \text{где } \Omega\in[1{,}8;4];\\ -0{,}28556034485\Omega+2{,}6422413795, & \text{где } \Omega\in[4;8{,}64].\end{cases} \quad (2)$$

2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Медленная кривая

Перейдем от трехтемповой системы дифференциальных уравнений к двухтемповой [7-9]. Система (1) является сингулярно возмущенной и имеет двумерное инвариантное многообразие, движение по которому, можно описать следующей системой дифференциальных уравнений [7-9, 12-13], при $k=0{,}5,\ r=0{,}1,\ J=1$:

$$\begin{cases} J\dot{\Omega}=M(\Omega)-\frac{k^2\Omega}{R+r},\\ \dot{R}=\varepsilon F(\Omega,I,R).\end{cases} \quad (3)$$

Так как функция $F(\Omega,I,R)$ умножается на малый параметр ε, то система (3) является быстро-медленной. Следовательно, можно использовать аппарат теории релаксационных колебаний [14] и теории траекторий-уток (см., например [15 -18]) для анализа полученной системы уравнений.

При $k=0{,}5,\ r=0{,}1$, медленная кривая системы (3) описывается:

$$M(\Omega)-\frac{k^2\Omega}{R+r}=0\,. \quad (4)$$

Уравнение медленной кривой в явной форме получаем, выразив *R* из (4):

$$R=R(\Omega)=\frac{k^2\Omega}{M(\Omega)}-r. \quad (5)$$

На рис. 4 представлен график полученной медленной кривой, заданной уравнением (5), где устойчивыми частями медленной кривой являются:

$$\Omega\in[0;0{,}86];[0{,}86;1{,}8];[4;8{,}64],$$

а неустойчивой частью

$$\Omega\in[1{,}8;4].$$

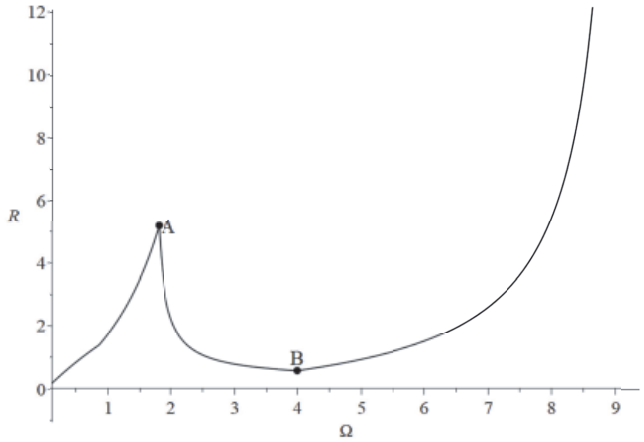


Рис. 2. Медленная кривая (5)

Точки *A* (1,8; 5,194117653) и *B* (4; 0,5666666669) — это точки срыва медленной кривой (5) и также точки ее экстремумов. Помимо этого, в точках *A* и *B* медленная кривая сменяет устойчивость.

2.2. Циклы утки, релаксационный цикл

Зададим функцию $F(\Omega,I,R)=-0{,}6\ \Omega^2+\alpha\Omega+4$ с управляющим параметром α. Подставим эту функцию в систему уравнений (3) и получим:

$$\begin{cases} J\dot{\Omega}=M(\Omega)-\frac{k^2\Omega}{R+r},\\ \dot{R}=\varepsilon(-0{,}6\ \Omega^2+\alpha\Omega+4).\end{cases} \quad (6)$$

На каждом участке положения равновесия системы (6) находятся из системы уравнений, где относительный момент аэродинамических сил $M(\Omega)$ задается уравнением (2) и $k = 0{,}5,\ r = 0{,}1, J = 1$

$$\begin{cases} M(\Omega) - \frac{k^2\Omega}{R+r} = 0, \\ \varepsilon(-0{,}6\ \Omega^2 + \alpha\Omega + 4) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

В данном случае рассматривается более сложное поведение внешнего сопротивления. В работах [7, 8] внешнее сопротивление рассматривалось как линейная функция. В настоящем исследовании внешнее сопротивление рассматривается уже как квадратичная функция, вследствие чего, положения равновесия нельзя выразить явным образом в зависимости от параметра α.

При изменении значения параметра α особая точка смещается по медленной кривой. Система является асимптотически устойчивой, если положение равновесия находится на устойчивой части кривой $\alpha>\alpha_{cr}$ (рис. 3a). При изменении α особая точка сливается с экстремумом B (4; 0,5666666669) (точкой срыва), теряет устойчивость и превращается в неустойчивую, что является бифуркацией Андронова-Хопфа (рис. 3b). При дальнейшем изменении значения α, особая точка смещается за точку срыва на неустойчивую часть медленной кривой, оставаясь в малой окрестности точки срыва. Размер цикла начинает расти (рис. 3b). На рис. 3b представлена траектория-утка без головы. При критическом значении параметра α цикл становится траекторией-уткой, а далее происходит уточный взрыв [17]. То есть, особая точка продолжает смещение по неустойчивому участку медленной кривой от точки срыва, далее резко происходит изменение формы и размера траектории-утки, пока она не превратиться в релаксационный цикл. На рис. 4 показан получившийся релаксационный цикл, где движение происходит следующим образом: сначала вдоль одного устойчивого участка медленной кривой, до точки срыва, далее происходит срыв и движение в ε-окрестности другого устойчивого участка, следует вдоль него до второй точки срыва, после которого возвращается на исходный устойчивый участок кривой.

Следует отметить, что данная математическая модель (6) является исключительно высокочувствительной по отношению к изменению параметра α в окрестности критических значений. Это видно в значение управляющего параметра α при трансформации траектории-утки: от траектории «без головы» к траектории-утке «с головой» (рис. 3b, 3c) [15 -18]. Данные изменения управляющего параметра α происходят в пятом знаке после запятой. Таким образом, резкий скачок от предельного цикла малой амплитуды к релаксационному циклу происходит моментально при незначительном изменении параметра α (рис. 3-4).

Из данного случая можно сделать вывод, что даже при более сложном поведении сопротивления в математической модели ветрогенератора будет наблюдаться уточный взрыв. Следует заметить, что сопротивление более простым языком является поведением подключения пользователей к сети.

Если рассматривать ситуацию с физической точки зрения, то, когда положение равновесия является асимптотически устойчивым, она является предпочтительной, поскольку соответствует стационарному режиму работы системы. Случай, когда положение равновесия находится на неустойчивом участке и возникает релаксационный цикл, представляется опасным с физической точки зрения, так как в системе возникают колебания с достаточно большой амплитудой (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была исследована математическая модель малой ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, известной как ветрогенератор Дарье и исследовано влияние нелинейной характеристики внешнего сопротивления на условия возникновения критических явлений. При аппроксимации аэродинамического момента с помощью кусочно-линейной функции и внешним сопротивлением, заданным квадратичной функцией найдены условия возникновения неблагоприятных режимов работы ветроустановок, которые моделируются циклами утками и релаксационными циклами.

Автор глубоко признателен профессору Кобрину А.И. (МЭИ) за постановку задачи и ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Климина, Л.А.* О динамике ветроэнергетической установки с рабочим элементом на основе механизма антипараллелограмма / Л.А. Климина, М.З. Досаев, Ю.Д. Селюцкий // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – № 8. – С. 536-540.
2. *Андронов, П.Р.* Моделирование ветродвигателя колебательного типа / П.Р. Андронов, М.З. Досаев, Г.Я. Дынникова, Ю.Д. Селюцкий, С.Д. Стрекалов // Проблема машиностроения и надёжности машин. – 2009. – № 4. – С. 86-91.
3. *Досаев, М.З.* Качественный анализ стационарных режимов малых ветровых электростанций / М.З. Досаев, Ч.Х. Линь, В.Л. Лю, В.А. Самсонов, Ю.Д. Селюцкий // Прикладная математика и механика. – 2009. – Т. 73. – № 3. – С. 368-374.
4. *Досаев, М.З.* О динамике малой ветроэлекростанции / М.З. Досаев, В.А. Самсонов, Ю.Д. Селюцкий // Доклады академии наук. – 2007. – Т. 416. – № 1. – С. 50-53.

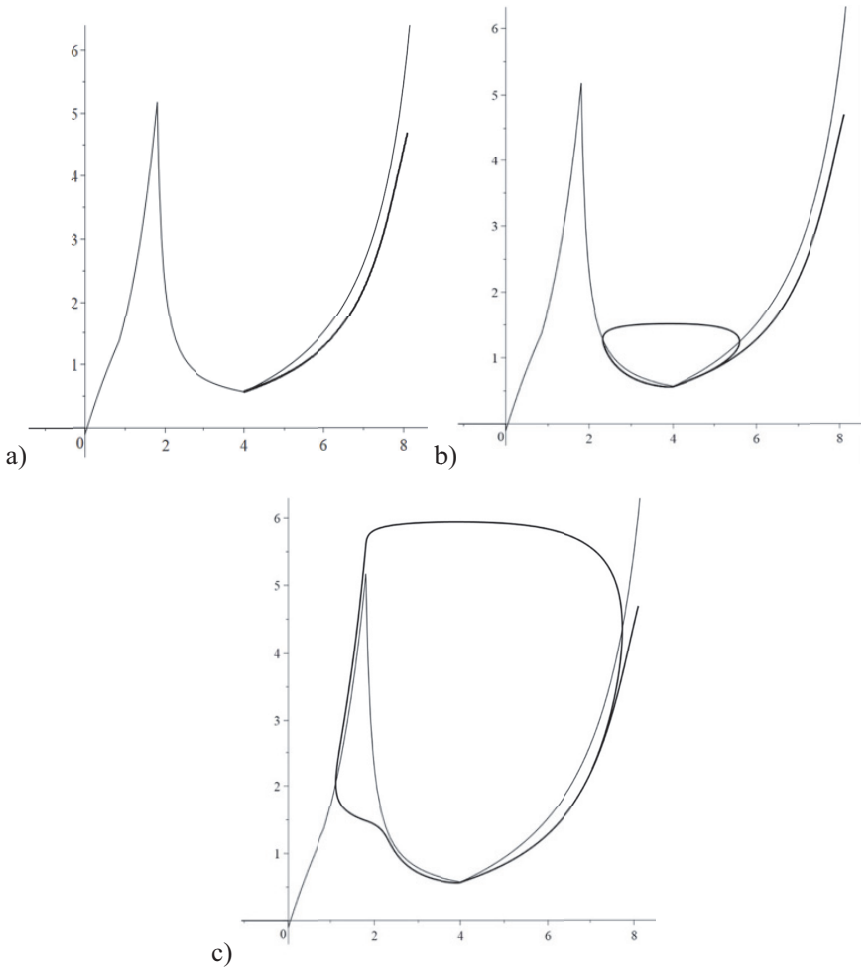


Рис. 3. Тонкой линией на графике изображена медленная кривая, жирной линией – траектория системы.
При коэффициентах ε = 0,01; k = 0,5; r = 0,1; J = 1; a) α = 1,4; b) α = 1,32716; c) α = 1,32715; начальная точка: Ω(0) = 8,1, R(0) = 4,7

5. *Досаев М.З., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д., Лю В.Л., Линь Ч.Х.* Бифуркации режима функционирования малых ветроэлектростанций и оптимизации их характеристик / М.З. Досаев, В.А. Самсонов, Ю.Д. Селюцкий, В.Л. Лю, Ч.Х. Линь // Механика твердого тела. – 2009. – № 2. – С. 59-66.
6. *Кирсанова, А.С.* Бифуркации стационарных режимов в модели ветроэнергетической установки / А.С. Кирсанова // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. – 2021. – Т. 27. – № 4. – С. 92-98.
7. *Kirsanova A.S.* Critical Phenomena in the Darrieus Wind Turbine Model // 2023 16th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, Russian Federation, IEEE. 2023. P. 1-4.
8. *Кирсанова А.С.* Релаксационные колебания в модели ветроэнергетической установки Дарье / А.С. Кирсанова // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. – 2024. – Т. 30. – № 1. – С. 31-39.
9. *Kirsanova A., Sobolev V.* Pade approximants of canards and critical regimes of Darrieus wind turbine model // Mathematics in Engineering. 2025. V. 7. № 3. P. 194-207.
10. *Кобрин, А.И.* Конструктивная теория МВЭУ. Часть I (главы I-II). / А.И. Кобрин, М.З. Досаев, Б.Я. Локшин [и др]. – М.: Изд-во Московского Университета, 2007. – 76 с.
11. *Кобрин, А.И.*Конструктивная теория МВЭУ. Часть II (глава III). / А.И. Кобрин, М.З. Досаев, Б.Я. Локшин [и др]. М.: Изд-во Московского Университета, – 2007. – 88 с.
12. *Воропаева, Н.В.* Геометрическая декомпозиция сингулярно возмущенных систем / Н.В. Воропаева, В.А. Соболев. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2009. – 256 с.
13. *Курина, Г.А.* Сингулярно возмущенные задачи с разнотемповыми быстрыми переменными / Г.А. Курина, М.А. Калашникова // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 11. – С. 3-61.
14. *Мищенко, Е.Ф.* Дифференциальные уравнения с малым параметром и релаксационные колебания / Е.Ф. Мищенко, Н.Х. Розов. – М.: Наука, 1976. – 248 с.
15. *Боровских, А.В.* Циклы-утки в уравнении типа Ван-дер-Поля с кусочно-линейной характеристикой / А.В. Боровских // Современные методы теории краевых задач: материалы международной конференции: Воронежская весенняя математическая школа «Понтрягинские чтения — XXVIII» (3–9 мая 2017 г.). – Воронежский государственный университет: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; Математический институт им. В.А. Стеклова РАН; Российский университет дружбы народов. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2017. – С. 203-204.

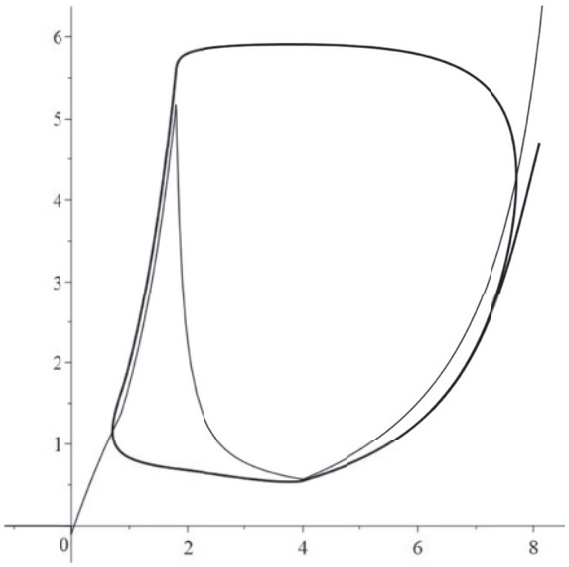


Рис. 4. Тонкой линией на графике изображена медленная кривая, жирной линией – траектория системы.
При коэффициентах ε = 0,01; k = 0,5; r = 0,1; J = 1; α = 1,2; начальная точка: Ω(0) = 8,1, R(0) = 4,7

16. *Щепакина, Е.А.* Условия безопасности воспламенения горючей жидкости в пористом изоляционном материале / Е.А. Щепакина // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – Т.5. – № 3. – С. 162-169.
17. *Shchepakina E., Korotkova O.* Condition for canard explosion in a semiconductor op tical amplifier // Journal of the Optical Society of America B. 2011. V. 28. № 8. P. 1988-1993.
18. *Shchepakina E.* Calculation of Maximum Safe Temperature of Fuel's Heating in a Porous Medium // Procedia Engineering. 2017. V. 201. P. 468-477.

INFLUENCE OF NONLINEAR CHARACTERISTICS OF EXTERNAL RESISTANCE ON THE DYNAMICS OF WIND TURBINES

© 2026 A.S. Kirsanova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

In the context of the global energy transition, small wind power plants with a vertical axis of rotation, in particular the Darrieus rotor, are of particular interest to urban infrastructure due to their low noise levels and insensitivity to wind direction. The present study is devoted to the study of the mathematical model of the small Darrieus wind power plant, which is defined as a three-step system of differential equations. The aim of the work is to study the influence of the nonlinear characteristics of the external load on the occurrence of critical operating modes of the generator. The research is based on a three-step system of singularly perturbed differential equations. Unlike previous works, where the external resistance was considered as a linear function, in this article it is considered as a quadratic function. The moment of aerodynamic forces is given by a piecewise linear function. The presence of small parameters makes it possible to apply the apparatus of the theory of relaxation oscillations and the theory of canards. The key result is the construction of a slow curve of the system, the definition of its stable sections and points of failure. It is shown that when the bifurcation parameter α changes, the equilibrium position shifts along the slow curve. When passing through the critical value, the Andronov-Hopf bifurcation occurs. The paper describes in detail the scenario of oscillation transformation: from «headless» canards to «headless» canards and further to the relaxation cycle. This abrupt transition, known as a weft explosion, occurs with an extremely small change in the control parameter, which indicates the high sensitivity of the model. From a physical point of view, the occurrence of relaxation oscillations corresponds to unfavorable operating conditions that create increased stress on the system. The paper concludes that even with the increasing complexity of the nature of the external resistance in the system, all the qualitative features of the dynamics, including the weft explosion, are preserved. The analysis provides a deeper understanding of the limits of stability of wind power plants and can be used in the design of control systems that prevent the occurrence of dangerous oscillatory modes.
Keywords: Math modeling, dynamic models, wind turbine, canards, relaxation fluctuations, singular disturbances, invariant manifolds.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-4-188-194
EDN: JFAPYQ

REFERENCES

1. *Klimina, L.A.* O dinamike vetroenergeticheskoj ustanovki s rabochim elementom na osnove mekhanizma antiparallelogramma / L.A. Klimina, M.Z. Dosaev, Yu.D. Selyuckij // Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. – 2016. – T. 17. – № 8. – S. 536-540.
2. *Andronov, P.R.* Modelirovanie vetrodvigatelya kolebatel'nogo tipa / P.R. Andronov, M.Z. Dosaev, G.Ya. Dynnikova, Yu.D. Selyuckij, S.D. Strekalov // Problema mashinostroeniya i nadyozhnosti mashin. – 2009. – № 4. – S. 86-91.
3. *Dosaev, M.Z.* Kachestvennyj analiz stacionarnyh rezhimov malyh vetrovyh elektrostancij / M.Z. Dosaev, Ch.H. Lin', V.L. Lyu, V.A. Samsonov, Yu.D. Selyuckij // Prikladnaya matematika i mekhanika. – 2009. – T. 73. – № 3. – S. 368-374.
4. *Dosaev, M.Z.* O dinamike maloj vetroelekrostancii / M.Z. Dosaev, V.A. Samsonov, Yu.D. Selyuckij // Doklady akademii nauk. – 2007. – T. 416. – № 1. – S. 50-53.
5. *Dosaev M.Z.* Bifurkacii rezhima funkcionirovaniya malyh vetroelektrostancij i optimizacii ih harakteristik / M.Z. Dosaev, V.A. Samsonov, Yu.D. Selyuckij, V.L. Lyu, Ch.H. Lin' // Mekhanika tverdogo tela. – 2009. – № 2. – S. 59-66.
6. *Kirsanova, A.S.* Bifurkacii stacionarnyh rezhimov v modeli vetroenergeticheskoj ustanovki / A.S. Kirsanova // Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya. – 2021. – T. 27. – № 4. – C. 92-98.
7. *Kirsanova A.S.* Critical Phenomena in the Darrieus Wind Turbine Model // 2023 16th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, Russian Federation, IEEE. 2023. P. 1-4.
8. *Kirsanova A.S.* Relaksacionnye kolebaniya v modeli vetroenergeticheskoj ustanovki Dar'e / A.S. Kirsanova // Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya. – 2024. – T. 30. – № 1. – S. 31-39.
9. *Kirsanova A., Sobolev V.* Pade approximants of canards and critical regimes of Darrieus wind turbine model // Mathematics in Engineering. 2025. V. 7. № 3. P. 194-207.
10. *Kobrin, A.I.* Konstruktivnaya teoriya MVEU. Chast' I (glavy I-II). / A.I. Kobrin, M.Z. Dosaev, B.Ya. Lokshin [i dr]. – M.: Izd-vo Moskovskogo Universiteta, 2007. – 76 s.
11. *Kobrin, A.I.*Konstruktivnaya teoriya MVEU. Chast' II (glava III). / A.I. Kobrin, M.Z. Dosaev, B.Ya. Lokshin [i dr]. M.: Izd-vo Moskovskogo Universiteta, – 2007. – 88 s.
12. *Voropaeva, N.V.* Geometricheskaya dekompoziciya singulyarno vozmushchennyh sistem / N.V. Voropaeva, V.A. Sobolev. – M.: FIZMALIT, 2009. – 256 s.
13. *Kurina, G.A.* Singulyarno vozmushchennye zadachi s raznotempovymi bystrymi peremennymi / G.A. Kurina, M.A. Kalashnikova // Avtomatika i telemekhanika. – 2022. – № 11. – S. 3-61.
14. *Mishchenko, E.F.* Differencial'nye uravneniya s malym parametrom i relaksacionnye kolebaniya / E.F. Mishchenko, N.H. Rozov. – M.: Nauka, 1976. – 248 s.
15. *Borovskih, A.V.* Cikly-utki v uravnenii tipa Van-der-Polya s kusochno-linejnoj harakteristikoj / A.V. Borovskih // Sovremennye metody teorii kraevyh zadach: materialy mezhdunarodnoj konferencii: Voronezhskaya vesennyaya matematicheskaya shkola «Pontryaginskie chteniya — XXVIII» (3–9 maya 2017 g.). – Voronezhskij gosudarstvennyj universitet: Moskovskij gosudarstvennyj universitet im. M.V. Lomonosova; Matematicheskij institut im. V.A. Steklova RAN; Rossijskij universitet druzhby narodov. – Voronezh: Izdatel'skij dom VGU, 2017. – S. 203-204.
16. *Shchepakina, E.A.* Usloviya bezopasnosti vosplameneniya goryuchej zhidkosti v poristom izolyacionnom materiale / E.A. Shchepakina // Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki. – 2002. – T.5. – № 3. – S. 162-169.
17. *Shchepakina E., Korotkova O.* Condition for canard explosion in a semiconductor op tical amplifier // Journal of the Optical Society of America B. 2011. V. 28. № 8. P. 1988-1993.
18. *Shchepakina E.* Calculation of Maximum Safe Temperature of Fuel's Heating in a Porous Medium // Procedia Engineering. 2017. V. 201. P. 468-477.

Alena Kirsanova, Postgraduate Student. E-mail: askirsanova99@gmail.com