



УДК 621.548

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.29](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.29)

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА С МАГНИТНОЙ ПРУЖИНОЙ ДЛЯ БЕЗЛОПАСТНЫХ ВЕТРОУСТАНОВОК

Е.М. Антонова\*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
\*e-mail: elizabetha25@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрен принцип работы безлопастного ветрогенератора. Проведен сравнительный анализ пьезоэлектрического и линейного электромагнитного генераторов; обоснован выбор линейного электромагнитного генератора. Приведены ключевые математические модели, характеризующие механику работы установки. В ходе выполнения работы исследован механизм адаптации установки к скорости ветра, основанный на использовании магнитной пружины, и расширение диапазона скоростей ветра, при котором возможна генерация электроэнергии.

**Ключевые слова:** энергетика, электроэнергетика, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), ветрогенератор, ветроэнергетические установки (ВЭУ), безлопастные ветрогенераторы, автономные системы, линейный генератор, магнитная пружина.

UDC 621.548

## STUDY OF A LINEAR ELECTROMAGNETIC GENERATOR WITH A MAGNETIC SPRING FOR BLADELESS WIND TURBINES

E.M. Antonova\*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnikeskaya Street, 29  
\* e-mail: elizabetha25@yandex.ru

**Abstract.** The article examines the operating principle of a bladeless wind generator. A comparative analysis of piezoelectric and linear electromagnetic generators is carried out; the choice of a linear electromagnetic generator is justified. Key mathematical models characterizing the mechanics of the device operation are presented. The study investigates a mechanism for adapting the device to wind speed based on the use of a magnetic spring, as well as the expansion of the wind speed range within which electricity generation is possible.

**Key words:** energy, electric power industry, renewable energy sources (RES), wind generator, wind power plants (WPP), bladeless wind generators, autonomous systems, linear generator, magnetic spring.

### Введение

Ветроэнергетика – это одно из наиболее популярных направлений развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) из-за относительной простоты конструкции и доступности ресурса – воздушных потоков. Говоря о ветряных электростанциях, подразумевают классические вертикальные трехлопастные ветроустановки (ВЭУ). Такие установки способны обеспечивать электроснабжение как в промышленных масштабах, так и использоваться для покрытия малого потребления электроэнергии [1].

Вместе с тем существует класс задач, в которых применение лопастных ВЭУ сопряжено со значительными техническими и экономическими трудностями. Необходимость периодического обслуживания механической части, шум, вибрации и низкая эффективность в условиях турбулентных и слабых ветров делают их неоптимальным



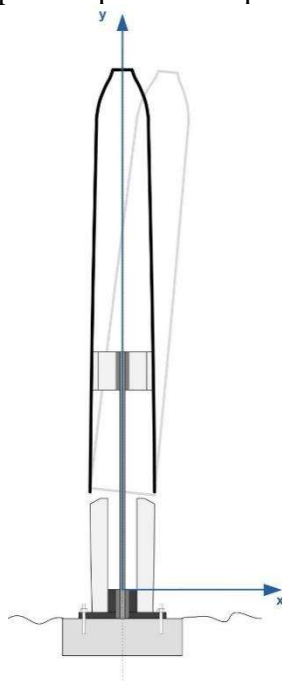
решением для автономных систем, расположенных вдали от населённых пунктов и транспортной инфраструктуры.

Функционирование удаленных объектов инфраструктуры таких как датчики на метеорологических станциях, нефтяных и газовых магистралях, системы мониторинга мостов и других на открытой местности невозможно без обеспечения автономного и бесперебойного электроснабжения. Для этого требуется надежный источник питания небольшой мощности, способный работать без вмешательства человека. Подведение линий электропередач в таких случаях экономически нецелесообразно и оптимальным вариантом может стать использование возобновляемых источников энергии. Однако генерация классических ВЭУ избыточно для такого класса устройств, а обслуживание механизмов затруднено или физически и технически невозможно. Решением данной проблемы может стать разработка иного вида ветроустановок, а именно безлопастных ветрогенераторов.

Наиболее известным представителем безлопастных ветрогенераторов являются образцы, разработанные компанией Vortex Bladeless. В них преобразование механической энергии воздушных масс в электрическую происходит за счет резонансных колебаний мачты при ее попадании в турбулентный поток [2]. Ключевым элементом установки, как и в любой другой ВЭУ, является генератор. Именно от его параметров и конфигурации зависят эффективность всей установки и граничные условия.

### **Методы и материалы**

Конструктивно безлопастной ветрогенератор представляет собой вертикальную цилиндрическую мачту, верхний конец которой совершает колебания под действием аэродинамической силы, возникающей при «сходе вихрей». Нижний конец мачты жестко закреплен. Генератор такой ВЭУ может быть расположен внутри мачты. Схематичное устройство безлопастного генератора изображено на рисунке 1.



*Рис.1. Схематичное устройство безлопастного генератора по технологии Vortex Bladeless*  
*Fig. 1. Schematic diagram of a bladeless generator using Vortex Bladeless technology.*

Воздушный поток, обтекая мачту, образует вихревую дорожку Кармана [3], представляющую собой систему последовательных вихрей. Это порождает переменную поперечную аэродинамическую силу, под действием которой мачта начинает совершать колебательные движения. В момент совпадения частоты вихрей и собственных колебаний мачты, амплитуда колебаний резко увеличивается, то есть возникает резонанс:

$$f_v = f_n, \quad (1)$$



где  $f_v$  – это частота вихрей, а  $f_n$  – частота собственных колебаний мачты.

В режиме установившегося резонанса сила приближенно считается гармонической. Так как систему можно считать одномассовой с одним числом свобод, частоту колебаний мачты можно вычислить [4]:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент жесткости,  $m_{eff}$  – эффективная масса.

Частоту вихрей возможно найти из определения числа Струхала [5]:

$$St = \frac{L}{Tv} \Rightarrow \frac{1}{T} = f = St \cdot \frac{v}{L}, \quad (3)$$

где  $L$  – характерный линейный размер (в данном случае  $L=D$ , где  $D$  – диаметр мачты),  $T$  – период колебаний,  $v$  – скорость воздушных масс.

Преобразование механических колебаний в данном случае возможно с использованием пьезоэлектрического и линейного генератора. Работа пьезоэлектрического генератора основана на пьезоэффекте в керамических или полимерных материалах. Под действием деформации в них возникает разность потенциалов, которая увеличивается, если деформация имеет циклический характер, и может достигать сотен вольт [6]. Ток в таком генераторе очень мал, и как следствие, выходной мощности достаточно только для питания микроэлектроники. Конструкция таких устройств проста, однако пьезокерамика является очень хрупким материалом, который быстро накапливает усталость [7], а эффективность резко падает при отклонении скорости ветра от скорости возникновения резонанса. Это значительно усложняет работу генератора в реальных условиях, где скорость ветра непостоянна и имеет непредсказуемый характер.

Линейный электромагнитный генератор представляет собой систему из постоянных магнитов и нескольких катушек. При колебании мачты магниты, закрепленные на подвижной части, перемещаются относительно неподвижных катушек, тем самым создавая переменное магнитное поле. По закону электромагнитной индукции в катушках будет возникать электродвижущая сила [8]:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

где  $d\Phi$  — изменение магнитного потока через виток катушки, а  $dt$  – время, за которое происходит изменение.

Напряжение таких генераторов мало, но из-за малого сопротивления катушек ток на выходе может достигать 25 А [9]. Однако наиболее часто выбирают конфигурацию, при которой ток составляет сотые доли ампера, обеспечивая мощность, достаточную для питания датчиков. В сравнении с пьезоэлектрическими, линейные генераторы более устойчивы к низким температурам, а в некоторых случаях даже имеют большую эффективность [10], т.к. свойства ферромагнитных материалов не зависят от температуры окружающей среды. Пьезокерамика же становится более хрупкой, и риск выхода из строя такого генератора значительно повышается. Кроме того, линейные генераторы имеют большее распространение и являются более технологически зрелой технологией с налаженным производством.

Также немаловажным преимуществом линейных генераторов является возможность регулирования силы торможения колебания мачты, через изменение подключённой нагрузки. Иными словами, диапазон скоростей ветра, при которых возможна генерация электрической энергии, значительно больше в сравнении с пьезоэлектрическим генератором. Этого можно добиться при использовании магнитной пружины – неподвижно закрепленных магнитов, той же полярности, что и ближайший подвижный магнит.



### Результаты

Анализ полученной системы уравнений позволяет выявить принципиальный механизм пассивной адаптации безопасной ВЭУ к изменению скорости ветра. В конструкции с линейным электромагнитным генератором и магнитной пружиной эффективная жёсткость системы представляет собой сумму постоянной механической и переменной магнитной составляющих:

$$k(z) = k_m + k_{mg}(z) \quad (5)$$

где  $k$  – общий коэффициент жесткости системы,  $k_m$  – коэффициент жесткости мачты,  $k_{mg}$  – коэффициент жесткости магнитной пружины,  $z$  – величина зазора между магнитами.

Тогда, подставив выражение (5) в (2) получим частоту колебаний мачты:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_m + k_{mg}(z)}{m}} \quad (6)$$

При такой системе возможно получить диапазон скоростей ветра, при котором возможна генерация:

$$\frac{f_n^{\min} D}{St} \leq v \leq \frac{f_n^{\max} D}{St} \quad (7)$$

Минимальная частота наблюдается при малой скорости ветра. Магнит, выполняющий роль пружины находится на значительном расстоянии от подвижных магнитов. Следовательно  $k_{mg} \rightarrow 0$ . При усилении ветра расстояние между магнитами уменьшается за счет увеличения амплитуды колебаний мачты. Коэффициент жесткости магнитной пружины увеличивается и частота колебаний мачты также увеличивается, аналогично частоте воздушных вихрей.

Важно отметить, что из-за нелинейности зависимости  $k_{mg}(z)$  точное аналитическое выражение для расширенного диапазона требует экспериментального уточнения, однако физический принцип работы обосновывается строго из уравнений динамики.

### Обсуждение

Проведённый анализ показывает, что введение в конструкцию безопасной ВЭУ линейного электромагнитного генератора с магнитной пружиной позволяет решить одну из ключевых проблем вихревых ветроустановок — узкий диапазон скоростей ветра, в котором поддерживается резонанс. Главный результат состоит в том, что адаптация к изменяющимся условиям обеспечивается пассивно, за счёт нелинейной зависимости сил магнитного отталкивания от расстояния, без каких-либо управляющих сигналов и дополнительных источников питания.

Полученные результаты позволяют наметить направления дальнейших исследований. Экспериментальная верификация эффекта пассивной самонастройки на лабораторном прототипе даст возможность уточнить зависимости  $k_{mg}(z)$  и определить достижимый на практике коэффициент расширения рабочего диапазона скоростей.

### Заключение

Прямое сравнение традиционных ВЭУ и безопасных по установленной мощности или коэффициента использованной мощности (КИУМ) некорректно в виду различных сфер и целей применения. Если промышленные ветрогенераторы стремятся к увеличению абсолютной мощности, то безопасные ВЭУ стремятся к совершенно иным условиям применения. Они необходимы для работы при маленькой, непостоянной скорости ветра и условиях турбулентности в воздушных потоках. Таким образом данные виды ветрогенераторов являются не конкурентами между собой, а решением задач разного класса.

### Литература

1. Безруких, П. П. Ветроэнергетика : справочное и методическое пособие / П. П. Безруких. — Москва : Энергия, 2010. — 315 с.
2. Vortex Bladeless, S.L. Electrical power generator for producing oscillating movement of a structure and converting oscillating movement into electrical energy. — ES2374233B1. — 2012



3. Meirovitch, L. Analytical Methods in Vibrations / L. Meirovitch. — New York : Macmillan, 1967. — 576 p.
4. Слѣзкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. — М.: ГИТТЛ, 1955. — С. 107. — 520 с.
5. Arroyo, E. Comparison of electromagnetic and piezoelectric vibration energy harvesters: Model and experiments / E. Arroyo, A. Badel, F. Formosa, Y. Wu // Sensors and Actuators A: Physical. — 2012. — Vol. 183. — P. 148–156.
6. Phan, T. N. Performance of An Electromagnetic Energy Harvester with Linear and Nonlinear Springs under Real Vibrations / T. N. Phan, S. Bader, B. Oelmann // Sensors. — 2020. — Vol. 20, № 19. — P. 5456.
7. Вольдек, А. И. Электрические машины : учебник для вузов / А. И. Вольдек. — 3-е изд., перераб. — Ленинград : Энергия, 1978. — 832 с.
8. Nor K. M., Arof H., Wijono. Design of a 5 kW tubular permanent magnet linear generator // 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). — 2004. — Vol. 2. — P. 528–532.
9. Qu C. Modeling and analysis of a variable stiffness nonlinear permanent magnetic spring / C. Qu, Y. Pei, Q.-Y. Xin, M.-Y. Luo, L. Xu, D. Wang // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. — 2023. — Vol. 237. — P. 3324–3339.
10. Кузнецов, А.А. Материалы электротехники: свойства и применение / А.А. Кузнецов. — М.: МЭИ, 2005. — 312 с.