

## О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ В ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

*Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин, Г.В. Буданов,  
С.В. Козлов, А.А. Мирошниченко*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Представлено исследование преимуществ и недостатков магнитной левитации ротора ветроэнергетической установки. В мировом научном сообществе представлено много исследований об использовании магнитной левитации роторов ветроэнергетических установок. Однако наблюдаются не только преимущества, но и некоторые отрицательные стороны «магнитного подшипника» в ветроэнергетических установках, что приводит к вопросу о целесообразности применения данного технического решения. Авторами выявлены основания повышенного внимания к магнитной левитации ветроколеса и проанализированы основные подходы к проектированию. Работа включает в себя расчет магнитной опоры и оценку стоимости вертикально-осевой ветроэнергетической установки с магнитным подшипником ротора. Результаты исследования показали, что экономическая эффективность этого подхода крайне низка и не оправдана для использования в коммерческих продуктах.

*Ключевые слова: магнитная левитация, ветроэнергетическая установка, подшипник.*

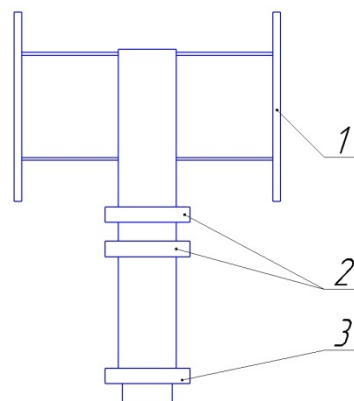
### Введение

Популярность возобновляемых источников энергии растет с каждым годом. Кризис в нехватке органического топлива привел к снижению экономической эффективности потребления традиционных видов ископаемого топлива, что создало предпосылки для дальнейшего ускоренного развития альтернативной энергетики [1, 2].

Одной из основных современных тенденций в энергетике является ветроэнергетика, выделившаяся в отдельные отрасли промышленности в нескольких странах, занимающая лидирующие позиции в своем энергетическом балансе и конкурирующая с традиционной энергетической генерацией. Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения (ВОВЭУ) распространены не так, как ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения (ГОВЭУ), однако они имеют следующие преимущества: у них ниже стоимость, они имеют более простой (с точки зрения производства) аэродинамический профиль лопасти, меньшие по стоимости монтажа (установки) и обслуживанию [3]. Также для ВОВЭУ не имеет значения направление потока ветра, они не генерируют шумы и инфразвук. Эти особенности позволяют размещать их вблизи жилых домов, офисов и инфраструктурных объектов. Кроме того, срок службы таких установок значительно больше, чем у ГОВЭУ, так как опорные подшипники не испытывают знакопеременных нагрузок, а работают все время в равномерно нагруженном режиме. Срок их эксплуатации может достигать

35 лет [4]. В настоящее время как в научном сообществе, так и в инженерном возникают различные споры о целесообразности использования магнитных подшипников в ветроэнергетических установках для минимизации потерь на трение. Кроме того, данный элемент (опорный подшипник ротора ВЭУ) является одним из наиболее уязвимых компонентов механической конструкции. Чтобы более четко представить себе значение проблемы, можно упомянуть тот факт, что в первой половине 2014 года отделение ветроэнергетики Siemens Corporation потеряло более 48 миллионов евро из-за отказов подшипников [5].

Схематичное изображение расположения подшипниковых узлов на ВОВЭУ представлено на рис. 1.



**Рис. 1. Конструкция крепления вала ВОВЭУ:**  
1 – лопасти; 2 – радиальные подшипники;  
3 – опорные подшипники

## Альтернативные источники энергии

Подшипники должны иметь высокую надежность и низкий коэффициент трения, что особенно важно для ветроустановок малой мощности. Эти два параметра являются взаимоисключающими. Повышая механическую эффективность системы, разработчики стараются минимизировать размеры подшипников, что приводит к ускоренному износу. Дисбаланс, возникающий после монтажа, статическая и динамическая нагрузки при различных погодных условиях также способствуют более быстрому износу подшипников. Согласно статистике, до 80–90 % отказов в работе ветряных турбин связаны с подшипниками [6]. При сильном ветре изношенный подшипник или подшипник низкого качества может вызывать вибрации и/или шум и, наконец, перегрев или повреждение ветродвигателя. Замена подшипника требует, как правило, полной разборки ветроэнергетической установки.

В последнее время появилось много работ, связанных с заменой подшипников скольжения в ВОБЭУ на магнитные подшипники [7–10]. Несколько китайских заводов изготавливают готовые генераторы для ветроэнергетических установок с так называемыми магнитными подшипниками. Эти турбины известны как MagLev (магнитная левитация). Американская компания Maglev Wind Turbine Technologies в 2007 году объявила о разработке ветроэнергетической установки на магнитной подушке мощностью 1 МВт [11].

В соответствии с [7, 8] использование магнитных подшипников значительно снижает коэффициенты трения в системе, тем самым позволяет генерировать выработку электроэнергии при меньших скоростях ветра и увеличивает значение использования энергии ветра во время работы ВЭУ. Также это помогает уменьшить шум и вибрации, передаваемые на бетонное основание. Надежность системы повышается, поскольку нет механического контакта и износа. Таким образом, эксплуатационные расходы меньше. Использование редкоземельных магнитов Nd-Fe-B или Sm-Co является наиболее подходящим вариантом [12].

Поскольку интерес к MagLev высок, мы решили изучить данную тему со всех сторон. Прежде всего следует изучить техническую сторону

вопроса, чтобы определить, приемлемо ли вообще использовать такой тип подшипников в ветроэнергетических установках. И второй не менее важный вопрос – стоит ли его использовать с экономической точки зрения. Если мы говорим о проектах, где деньги не имеют значения, то можно использовать любой вид MagLev. Однако если экономическая часть проекта является важным параметром, то для четкого понимания возможности ее коммерциализации следует учитывать все преимущества и недостатки.

### Типы магнитов и конструкции подшипников

В зависимости от типа источника магнитного поля магнитный подшипник можно разделить на три класса.

1. Активный. Магнитное поле создается искусственно, находясь под контролем электроники. Положение и жесткость поддержки можно контролировать, но требуется постоянное электроснабжение.

2. Пассивный. Поле генерируется постоянными магнитами. Конструкция проста и надежна. Однако прочность такого типа подшипников низкая.

3. Гибридный. Магнитная сила создается как постоянными, так и электрическими магнитами.

Одним из следствий теоремы Ирншоу является невозможность построения сбалансированной конфигурации магнитных тел в статическом магнитном поле [13]. Поэтому необходимо ограничить как минимум одну степень свободы, для которой мог бы использоваться механический или гибридный магнитный подшипник.

Существуют такие устройства, как супермаховики (для аккумуляции энергии), которые имеют в своем составе левитирующие элементы. Они вращаются без какого-либо механического контакта. Их масса поддерживается в «парящем» состоянии за счет магнитного поля мощных постоянных магнитов и постоянно меняющегося магнитного поля корректирующих электромагнитов в зависимости от положения маховика [14]. Однако без постоянного энергопотребления система не работает. Мощность системы управления положением для 100-килограммового маховика

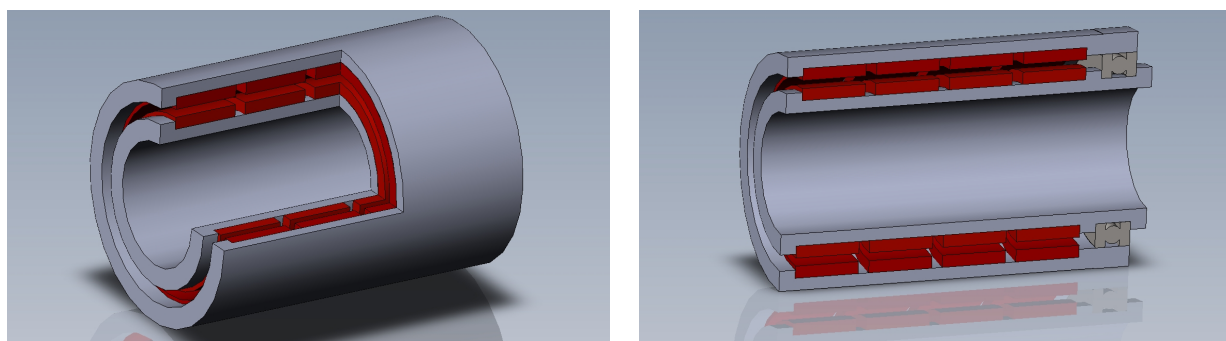


Рис. 2. Конструкция радиального подшипника

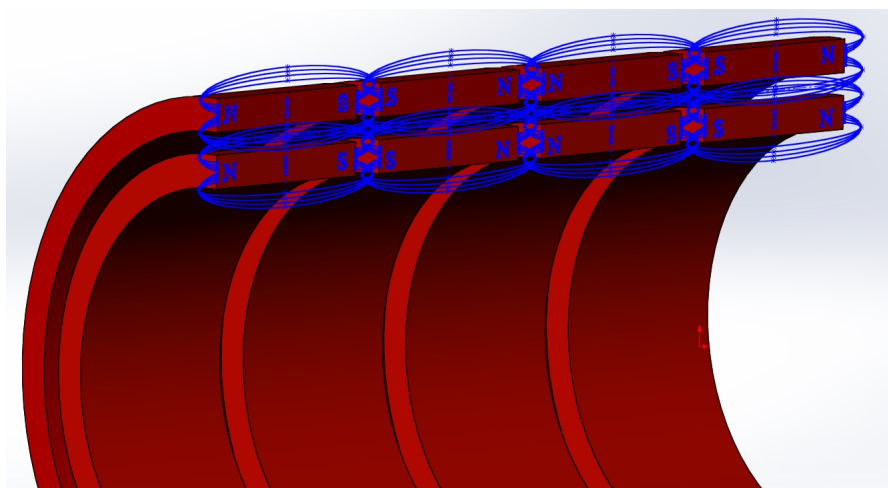


Рис. 3. Направление магнитных полей

составляет 600 Вт, что бесполезно и даже убыточно для малой ВЭУ [15].

Использование радиальных магнитных подшипников для ВОЭУ нецелесообразно из-за их низкой жесткости и сложности производства. Рис. 2 и 3 иллюстрируют конструкцию радиального магнитного подшипника, выполненного из осевых намагниченных кольцевых магнитов заднего типа. Использование нескольких маленьких магнитов более эффективно, чем меньшего количества больших по размеру магнитов [16]. Расположение внутренних и внешних дорожек качения нестабильно из-за притягивающих и отталкивающих сил, стремящихся двигаться по одной линии. Таким образом, по меньшей мере, один опорный механический подшипник должен быть размещен на одной стороне узла. Этот факт ставит перед разработчиками таких магнитных подшипников вопрос

о полном отсутствии механического контакта и износа деталей.

Опорный подшипник является одним из важных и в то же время уязвимых компонентов ветряных турбин. Он поддерживает вес ротора и генератора. Замена его на два одинаково направленных друг к другу кольцевых аксиально намагниченных магнита позволит не только избежать механического контакта, трения и износа, но и снизить начальный крутящий момент для старта ВЭУ на 20 % в соответствии с экспериментами, описанными в [11]. Однако в эксперименте было отмечено увеличение вибраций на 7 %.

На рис. 4 показана конструкция генератора на магнитной опоре. В дополнение к этому пара радиальных подшипников должна использоваться для удержания сборки в устойчивом положении. Это оставляет только две степени свободы для

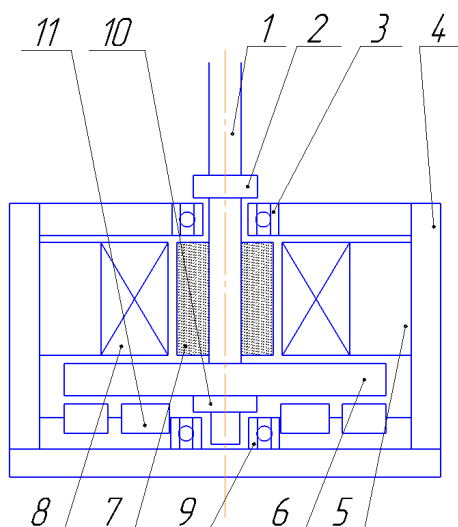


Рис. 4. Конструкция генератора с магнитным опорным подшипником: 1 – вал ротора, 2 и 10 – защитные стопорные кольца, 3 и 9 – радиальные подшипники, 4 – внешний корпус, 5 – генератор, 6 – поддержка магнитного подшипника, 7 – ротор генератора, 8 – статор генератора, 11 – статор опоры магнитного подшипника

## Альтернативные источники энергии

ротора – вращение вокруг своей оси и вертикальное смещение. Эти подшипники не имеют большой нагрузки, и их не следует заменять в течение всего срока службы ВЭУ.

Чтобы обеспечить требуемое отталкивающее усилие, необходимо выбрать пару магнитов с осевым намагниченным кольцом из Ne. Наиболее точный расчет размера магнита можно выполнить с помощью анализа методом конечных элементов с использованием (1) и рис. 5 или специального калькулятора на веб-сайте компании по производству магнитов [17].

$$B = \frac{Br}{2}(Y_0 - Y_i), \quad (1)$$

$$Y_0 = \sqrt{\frac{d+l}{(d+l)^2 + r_0^2}} - \sqrt{\frac{d}{d^2 + r_0^2}},$$

$$Y_i = \sqrt{\frac{d+l}{(d+l)^2 + r_i^2}} - \sqrt{\frac{d}{d^2 + r_i^2}}.$$

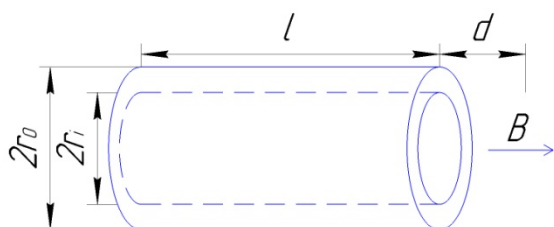


Рис. 5. Кольцевой магнит с намагниченной осью

Размер магнита можно определить, зная вес левитирующего узла, определенный зазор и диаметр вала. Например, для поддержки ротора ВОВЭУ мощностью 3 кВт 2-уровневой конструкции H-Darrieus (вес ротора 250 кг) достаточно использовать 2 кольцевых аксиально-намагниченных магнита N38 (диаметр 110 мм, толщина 70 мм,

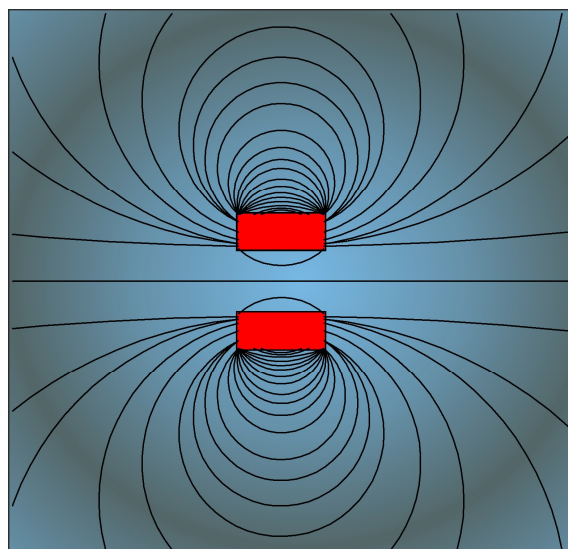


Рис. 6. Результаты расчета силы отталкивания и магнитного поля

диаметр отверстия 50 мм). С уменьшением зазора между магнитами усиливается сила отталкивания, что позволяет сгладить погрешности расчета.

Однако такая конструкция имеет ряд технических недостатков, приводящих к сложности и удорожанию.

1. Рис. 6 и 7 показывают, что магнитные поля серьезно деформированы и имеют тенденцию восстанавливать свою структуру из-за отталкивания магнитов, не обязательно вдоль вертикальной оси. Даже когда нет вращения, нижний радиальный подшипник будет иметь нагрузку в зависимости от степени смещения магнитов. Замена статора на магниты меньшего размера, один из которых должен работать на притяжение, может решить проблему, но это усложнит конструкцию, особенно процедуру сборки. При этом подшипник должен иметь некоторый магнитный запас, что приводит к незначительному увеличению коэффициента трения и стоимости.

2. Радиальные подшипники приносят еще одну проблему. Ротор находится в состоянии пружинной нагрузки относительно генератора в сборе, как показано на рис. 4. Его вертикальное смещение может быть вызвано дисбалансом из-за различных факторов (прилипший снег, порывы ветра или естественная деградация магнитов). Чтобы избежать случая, когда радиальный подшипник станет работать как опора, должна быть степень свободы для вертикального перемещения в несколько миллиметров относительно вала или корпуса. Это движение в свою очередь может вызвать вертикальные биения, вибрации и механическое повреждение конструкции.

3. Движение в осевом направлении является одним из самых больших недостатков магнитного подшипника. Поскольку у него должен быть хотя бы один ограничитель осевого упора, и эта опора

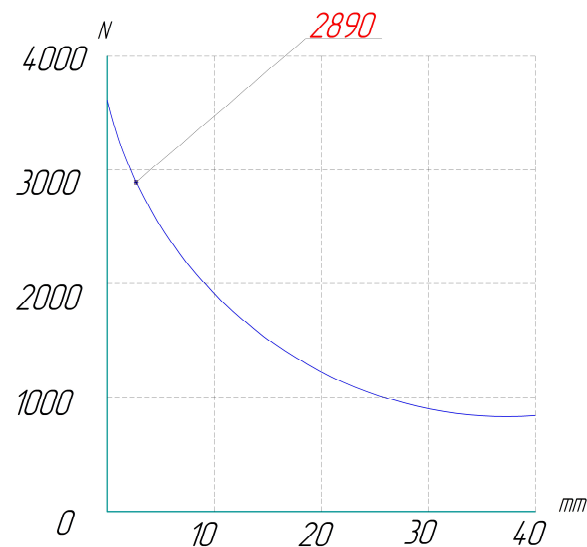


Рис. 7. Отталкивающая сила между двумя кольцевыми магнитами с осевой намагниченностью

на конце хрупкая (хотя должна быть острой для уменьшения трения), в случае плавающего ротора большая механическая нагрузка быстро повредит острие упора. Кроме того, могут появиться шум и вибрации, сопровождающие этот случай.

Некоторые ВОВЭУ содержат несколько генераторов, различающихся по типу передачи вращающего момента. Если есть коробка передач (мультипликатор), то следует серьезно изменить конструкцию, чтобы учесть вертикальное движение вала. Когда генератор расположен на одной оси вала ротора, вертикальное движение приводит к смещению ротора генератора относительно статора, ослаблению магнитного потока и уменьшению генерируемой мощности. Это смещение также может привести к повреждению обмотки в осевых генераторах. Конструкция генератора радиального потока должна изменяться при увеличении размеров катушек и высоты ламинирования, что приводит к электрическим потерям и увеличению стоимости.

4. Необходимость в разработке некоторых ограничительных упоров (или подшипников), которые будут поглощать нагрузку в экстренных случаях, чтобы избежать повреждения генератора.

5. Сильные магниты притягивали бы как магнитный, так и статический мусор и стружку. Это требует установку защиты от пыли, что, в свою очередь, может вызвать проблемы с рассеиванием температуры обмоток генератора внутри корпуса.

6. Когда температура превышает 80 °С, магниты Ne-типа серии N начинают размагничиваться, и в случае перегрева генератора (требуется датчик температуры) ВЭУ должна быть остановлена. Магниты серии EH работают при 180 °С с вдвое большей коэрцитивной силой, но они неоправданно дорогие.

### Заключение

В заключение мы рассматриваем конструкцию ВЭУ на магнитном подшипнике как перспективное, но на данный момент неотработанное решение. Его заявленными преимуществами являются длительный срок службы, малый коэффициент трения, низкая стартовая скорость ВЭУ, отсутствие вибраций.

Ограничение нагрева магнитов до 80 °С может ограничить диапазон работы ветроэнергетической установки. Начало генерации при скорости ветра 2,5 м/с вместо 3,0 м/с практически ничего не дает с точки зрения выработки электроэнергии, поскольку объем вырабатываемой мощности на этих скоростях составляет несколько ватт или менее 0,01 % от общего объема выработки. В дополнение к этому в списке есть серьезные недостатки. Конструкция и сборка усложняются, нужно добавлять больше компонентов. Обслуживание становится все более сложным в полевых условиях – для сборки магнитного подшипника, поддержки

вающего ротор ВЭУ, потребуются специальные инструменты. С учетом полного жизненного цикла ВЭУ экологичность будет меньше. Достаточное увеличение общей стоимости ВЭУ может оттолкнуть потенциальных клиентов.

Поскольку нет экономически привлекательных решений, отсутствуют технические преимущества и в любом случае должен сохраняться минимальный набор механических контактов, мы считаем, что магнитные подшипники не могут на данный момент найти применения в ВОВЭУ.

Статья выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов (СП-71.2018.1) и Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.A03.21.0011.

### Литература

1. Низамутдинова, Н.С. Мировой и российский опыт применения государственной поддержки возобновляемой энергетики / Н.С. Низамутдинова, И.М. Кирпичникова, О.С. Пташкина-Гирина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 140–145. DOI: 10.14529/power180117
2. Solomin, E.V. State of world wind industry development / E.V. Solomin, E.A. Sirotkin // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2014. – No. 1. – С. 22–26.
3. Коробатов, Д.В. Историко-экономический анализ ветроэнергетических установок и систем управления / Д.В. Коробатов, С.В. Козлов, Е.А. Сироткин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2016. – № 15-18. – С. 54–66. DOI: 10.15518/ijaee.2016.15-18.054-066
4. Анализ жизненных фаз ветроэнергетической установки / А.С. Аникин, С.В. Козлов, Е.А. Сироткин, Е.Е. Соломин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 5 (145). – С. 37–41.
5. Siemens' Energy Division Profit Down 54 Pct. – <http://www.offshorewind.biz/2014/05/07/siemens-energy-division-profit-down-54-pct/> (дата обращения: 25.02.2019).
6. Zhao, H. Fault diagnosis method for wind turbine rolling bearings based on Hankel tensor decomposition / H. Zhao, W. Zhang, G. Wang // IET Renewable Power Generation. – 2019. – 13 (2). – P. 220–226. DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5284
7. Design analysis of MAGLEV-VAWT with modified magnetic circuit generator / C.V. Aravind, Kamalini, S.C. Tay et al. // 2014 IEEE 2nd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). – 2014. – 6924146. DOI: 10.1109/icees.2014.6924146
8. Vorwaller, M.R. The effect of magnetic bearing on the vibration and friction of a wind turbine. Masters Thesis / M.R. Vorwaller. – Brigham Young University, 2012. – 75 p.

9. Yu, Y. *Modeling and decoupling control for rotor system in magnetic levitation wind turbine* / Y. Yu, X. Sun, W. Zhang // 2017 IEEE Access. – 2017. – Vol. 5, 7994596. – P. 15516–15528. DOI: 10.1109/access.2017.2732450
10. Rajalakshmy, P. *Development of magnetic levitation system* / P. Rajalakshmy, P. Subha Hency Jose, B. Thilagavathy // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. – 2019. – Vol. 8, iss. 4S. – P. 248–251.
11. *The maglev: The Super-powered Magnetic Wind Turbine*. – <http://inhabitat.com/super-powered-magnetic-wind-turbine-maglev/> (дата обращения: 26.02.2019).
12. Deepak, K. *Magnetocaloric properties of low-cost fe and sn substituted mnnisi-based alloys exhibiting a magnetostructural transition near room temperature* / K. Deepak, R.V. Ramanujan // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2018. – 54 (11). – 8369408. DOI: 10.1109/tmag.2018.2832090
13. Earnshaw, S. *On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether* / S. Earnshaw // *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. – 1842. – Vol. 7. – P. 97–112.
14. Cansiz, A. *Rotor optimization in a superconducting magnetic bearing by using frozen image model and Amperian current approximation* / A. Cansiz, I. Yildizer, D.T. McGuinness // *Cryogenics*. – 2019. – Vol. 98. – P. 60–66. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2019.01.002
15. Liu Shuqin. *Magnetic Suspension and Self-pitch for Vertical-axis Wind Turbines* / Liu Shuqin. – China: Shandong University. – 2011. DOI: 10.5772/22598.
16. Toshiyuki Aso. *Study on the Bearing Resistance in a Wind Turbine Generator System* / Toshiyuki Aso, Kazuichi Seki, Izumi Ushiyama // *Wind Engineering*. – 2015. – Vol. 39, no. 1. – P. 113–128. DOI: 10.1260/0309-524x.39.1.113
17. Powerflux™ *Active Magnetic Bearings*. – <http://www.calnetix.com/powerflux-active-magnetic-bearings> (дата обращения: 01.03.2019).

**Соломин Евгений Викторович**, профессор, кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; solominev@susu.ru.

**Сироткин Евгений Анатольевич**, аспирант, кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tv-222@mail.ru.

**Буданов Геннадий Владимирович**, аспирант, кафедры «Спортивное совершенствование», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; budanovgv@susu.ru.

**Козлов Сергей Васильевич**, аспирант, кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; soninpapa@mail.ru.

**Мирошниченко Алексей Алексеевич**, магистрант, кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; alex.miroshnichenko@mail.ru.

*Поступила в редакцию 20 марта 2019 г.*

DOI: 10.14529/power190411

## THE ADVISABILITY OF MAGNETIC BEARINGS APPLICATION IN VERTICAL-AXIS WIND TURBINES

**E.V. Solomin**, easirotkin@susu.ru,

**E.A. Sirotkin**, easirotkin@susu.ru,

**G.V. Budanov**, budanovgv@susu.ru,

**S.V. Kozlov**, soninpapa@mail.ru

**A.A. Miroshnichenko**, alex.miroshnichenko@mail.ru

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The article presents a study of the advantages and disadvantages of rotor magnetic levitation in wind turbines. Globally, a lot of research is done into the use of windwheels magnetic levitation. However, the “magnetic bearing” in wind turbines has both positive and negative effects. This prompts a question whether this technical solution should be used. The authors identified the basis for increased attention to the magnetic levitation of the windwheel and analyzed the main approaches to the design. The work includes the calculation of the magnetic support and an estimate of the cost for a vertical-axial wind power plant with a rotor magnetic

bearing. The results of the study showed that the economic efficiency of this approach is extremely low and it is not justified to be used in commercial products.

*Keywords:* magnetic levitation, wind turbine, bearing.

The work was supported by RF President scholarship for young scientists and postgraduate students (SP-71.2018.1), by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0011.

### References

1. Nizamutdinova N.S., Kirpichnikova I.M., Ptashkina-Girina O.S. World and Russian Experience of the Renewable Energy State Support Application. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 140–145. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180117
2. Solomin E.V., Sirotkin E.A. State of World Wind Industry Development. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2014, no. 1, pp. 22–26.
3. Korobатов D.V., Kozlov S.V., Sirotkin E.A. [Historic and Economic Analysis of Wind Turbines and Control Systems]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology], 2016, no. 15-18, pp. 54–66. DOI: 10.15518/isjaee.2016.15-18.054-066
4. Anikin A.S., Kozlov S.V., Sirotkin E.A., Solomin E.E. [Analysis of wind turbine life time stages] *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology], 2014, no. 5 (145), pp. 37–41.
5. Siemens' Energy Division Profit Down 54 Pct. Available at: <http://www.offshorewind.biz/2014/05/07/siemens-energy-division-profit-down-54-pct/> (accessed 25.02.2019).
6. Zhao H., Zhang W., Wang G. Fault Diagnosis Method for Wind Turbine Rolling Bearings Based on Hankel Tensor Decomposition. *IET Renewable Power Generation*, 2019, vol. 13 (2), pp. 220–226. DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5284
7. Aravind C.V., Kamalinni, Tay S.C., Jagadeeswaran A. and Firdaus R. Design Analysis of MAGLEV-VAWT with Modified Magnetic Circuit Generator. *2014 IEEE 2nd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2014, 6924146. DOI: 10.1109/icees.2014.6924146
8. Vorwaller M.R. *The Effect of Magnetic Bearing on the Vibration and Friction of a Wind Turbine*. Masters Thesis, Brigham Young University, 2011. 75 p.
9. Yu Y., Sun X., Zhang W. Modeling and decoupling control for rotor system in magnetic levitation wind turbine. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, 7994596, pp. 15516–15528. DOI: 10.1109/access.2017.2732450
10. Rajalakshmy P., Subha Hency Jose P., Thilagavathy B. Development of Magnetic Levitation System. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, vol. 8, iss. 4S, pp. 248–251.
11. *The Maglev: The Super-Powered Magnetic Wind Turbine*. Available at: <http://inhabitat.com/super-powered-magnetic-wind-turbine-maglev/> (accessed 26.02.2019).
12. Deepak K., Ramanujan R.V. Magnetocaloric Properties of Low-Cost Fe and Sn Substituted MnNiSi-Based Alloys Exhibiting a Magnetostructural Transition Near Room Temperature. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54 (11), 8369408. DOI: 10.1109/tmag.2018.2832090
13. Earnshaw S. On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1842, vol. 7, pp. 97–112.
14. Cansiz A., Yildizer İ., McGuinness D.T. Rotor optimization in a Superconducting Magnetic Bearing by Using Frozen Image Model and Amperian Current Approximation. *Cryogenics*, 2019, vol. 98, pp. 60–66. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2019.01.002
15. Liu Shuqin. *Magnetic Suspension and Self-Pitch for Vertical-Axis Wind Turbines*. Shandong University, China, 2011. DOI: 10.5772/22598
16. Toshiyuki Aso, Kazuichi Seki, Izumi Ushiyama. Study on the Bearing Resistance in a Wind Turbine Generator System. *Wind Engineering*, 2015, vol. 39, no. 1, pp. 113–128. DOI: 10.1260/0309-524x.39.1.113
17. *Powerflux™ Active Magnetic Bearings*. Available at: <http://www.calnetix.com/powerflux-active-magnetic-bearings> (accessed 01.03.2019).

Received 20 March 2019

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

О целесообразности применения магнитных подшипников в вертикально-осевых ветроэнергетических установках / Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин, Г.В. Буданов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 95–101. DOI: 10.14529/power190411

### FOR CITATION

Solomin E.V., Sirotkin E.A., Budanov G.V., Kozlov S.V., Miroshnichenko A.A. The Advisability of Magnetic Bearings Application in Vertical-Axis Wind Turbines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 95–101. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190411