

УДК 531.8

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/machsci/1020.html>

## ПРИМЕНЕНИЕ МАХОВИЧНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В ВЕТРОВОЙ ОТРАСЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

С.В. Ойдинская

osv22t288@student.bmstu.ru

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация*

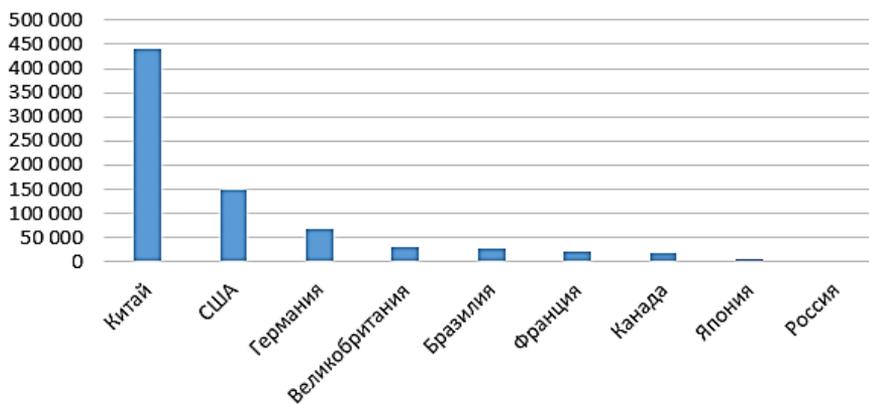
Ветроэнергетика — довольно перспективная отрасль, главный недостаток которой — это нестабильность вырабатываемой электроэнергии и ее огромные потери при торможении. Эту проблему можно решить с помощью маховичных аккумуляторов. Они будут накапливать энергию торможения и отдавать ее в систему, когда потребуется. Приведены статистические данные, показывающие рост роли ветроэнергетики на мировом рынке и указывающие на необходимость ее развития в Российской Федерации, упомянуты основные преимущества и недостатки данной отрасли энергетики. Описаны строение и принцип работы ветрогенератора и маховика, а также обоснована необходимость использования именно маховичных накопителей энергии в рассматриваемой области энергетики.

**Ключевые слова:** маховичные аккумуляторы, ветрогенератор, ветроэнергетика, рекуперация энергии, электрический генератор, тормозная система, тормозное устройство, супермаховик

**Введение.** Прежде чем раскрывать данную тему, необходимо ответить на вопрос, которым могут задаться многие читатели: а зачем вообще в России развивать ветровую энергетику? Россия — крупнейшая нефтегазодобывающая страна на международном рынке, к тому же она входит в пятерку мировых лидеров по производству электроэнергии. Ветроэнергетика, по распространенному мнению, — прерогатива ресурсодефицитных стран и к нашей стране никакого отношения не имеет. Однако это огромное заблуждение.

Начнем с того, что тенденции развития электроэнергетики стремительно меняются с каждым годом. И если раньше можно было рассуждать о несостоятельности ветроэнергетики, то сейчас все по-другому. Можно говорить о стремлении к диверсификации электроэнергетики и декарбонизации экономики в целом в ближайшем будущем. Согласно отчетам Международного энергетического агентства, глобальные мощности возобновляемой энергетики в 2023 г. выросли на 50 % по сравнению с прошлым годом, что является рекордом за последние 20 лет. Во-первых, по прогнозам агентства, ветроэлектростанции (ВЭС) обгонят атомные электростанции по производству энергии уже в 2025 г., а в 2028 г. энергия возобновляемых источников энергии будет составлять 42 % общемировой генерации энергии.

Во-вторых, согласно мировой статистике, Россия в разы отстает от своих «коллег» в списке крупнейших энергопроизводителей по развитию ветроэнергетики. Рассмотрим представленную ниже гистограмму (рис. 1). Если по общему объему производимой электроэнергии РФ входит в пятерку мировых лидеров, то в ветроэнергетической области едва ли сможет задержаться в четвертой десятке.



**Рис. 1.** Общее количество выработанной ветровой энергии за 2023 г., МВт (по версии Международного агентства по возобновляемым источникам IRENA)

В-третьих, почти все «нефтяные монархии» (Саудовская Аравия, Катар, Омар и т. д.) несмотря на значительные запасы ресурсов активно вкладываются в развитие ветроэнергетики. И наконец, согласно исследованиям, Россия занимает первое место в мире по ветроэнергетическому потенциалу. Особенно богатыми ветровыми ресурсами обладают прибрежные районы севера и Дальнего Востока, однако и другие области РФ (Калининградская, Ленинградская) вполне могут составить конкуренцию по ветровому потенциалу многим европейским странам. Таким образом, все перечисленные выше факторы заставляют задуматься о немалой упущенной выгоде нашей страны в области электроэнергетики.

**Строение ветрогенератора.** В целом все существующие в мире ветрогенераторы можно подразделить на две крупные группы: горизонтальные и вертикальные. В данной работе рассмотрено устройство вертикальных ветрогенераторов как наиболее распространенных.

Стандартный ветрогенератор (рис. 2) состоит из фундамента 1, силового шкафа, включающего в себя силовые контакторы и цепи управления 2, башни 3, лестницы 4, поворотного механизма 5, гондолы 6, электрического генератора 7, анемометра 8, тормозной системы 9, трансмиссии 10, лопастей 11,

системы изменения угла атаки лопасти 12 и колпака ротора 13. Рассмотрим подробнее некоторые его части.

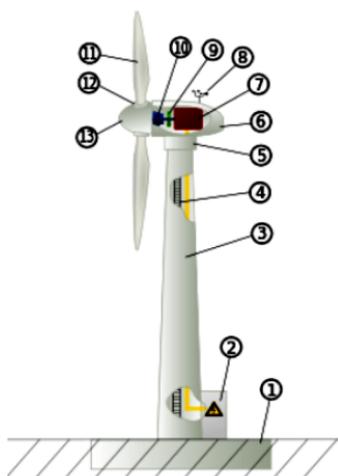


Рис. 2. Строение ветрогенератора

Одной из основных частей ветрогенератора является ротор. От квадрата его диаметра зависит мощность ветрогенератора. Поэтому чем лучше аэродинамические свойства ротора, тем выгоднее использование ветрогенератора. Сейчас большинство турбин имеют эффективность от 20 до 45 %. При этом максимально возможная эффективность, рассчитанная независимо Жуковским и Бецом, составляет чуть больше 59 %. Найти оптимальное соотношение между диаметром ротора (и соответственно мощностью), массой и объемом установки, стоимостью, надежностью и долговечностью — основная задача конструкторов. Одно из ее решений — изготовление лопастей из специальных композитных материалов (стекловолокнистый ламинат), которые уменьшают их массу при неизменной мощности и увеличении прочности, довольно экологично утилизируются и имеют адекватную стоимость. Также можно упомянуть про установку сборных башен для уменьшения затрат, использование эпоксидного геля в качестве покрытия, применение особых смазочных материалов для расширения диапазона рабочих температур и т. п.

Ветер — явление довольно непостоянное по силе и времени действия. Прежде чем продолжить эту мысль, отметим, что такой же непостоянностью отличается и среднесуточное потребление электроэнергии жителями нашей страны. Утром и вечером, когда мы все включаем телевизоры, чайники, микроволновки, потребляется намного больше электричества, чем, например, в обед, когда, грубо говоря, работает только холодильник. С ветровыми потоками сле-

дующая ситуация: когда они слабы, вырабатывается недостаточное для обеспечения нужд количество энергии. Все совсем по-другому при сильном ветре: тут уже существует опасность поломки ветрогенератора, поэтому в каждом обязательно установлено тормозное устройство, останавливающее лопасти при необходимости. А теперь представим, сколько кинетической энергии при торможении тратится просто так? Вот тут на помощь приходит рекуперация.

**Маховичные аккумуляторы: строение и принцип работы.** Существует множество видов аккумуляторов (электрохимические, пневматические, пружинные и др.). В этой работе представлен маховичный аккумулятор, поскольку он наиболее часто применяется в России (в отличие от электрических, популярных за рубежом).

Начало изучения маховиков в СССР можно отнести к 60-м годам XX в. Этой разработкой активно занимался ученый Нурбей Владимирович Гулиа и добился огромных успехов.

Существует два вида маховичных аккумуляторов: высокоскоростные и низкоскоростные. Первые развивают скорость от 10 000 до 100 000 об/мин, вторые — менее 10 000 об/мин. Принципиальные различия этих двух видов заключаются в материалах, качестве и стоимости входящих в них компонентов (частей). В современном мире чаще применяют высокоскоростные маховики.

Механические маховичные системы состоят из следующих основных частей (рис. 3): 1 — корпус махового колеса; 2 — магнитные подшипники; 3 — обод маховика; 4 — защитные диски и кольца; 5 — втулка маховика, связывающая его с мотором; 6 — вакуумные уплотнители и посадочные кольца; 7 — датчик скорости.

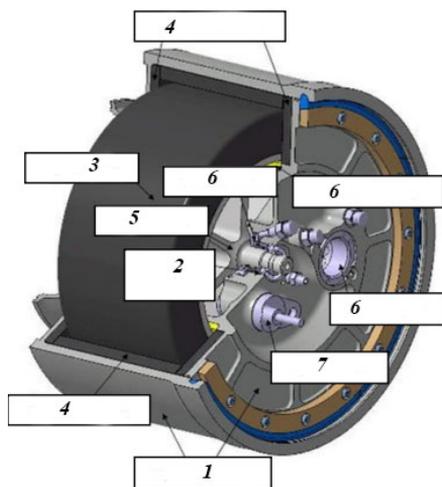


Рис. 3. Строение маховика

Корпус маховика предназначен для обеспечения внутри вакуума, что, в свою очередь, помогает снизить силы сопротивления и, как следствие, потери энергии. Также он выполняет защитную функцию: разрыв маховика (а такое может произойти, поскольку он работает на очень высоких скоростях) можно сравнить по мощности с разрывом фугаса.

Подшипники поддерживают ротор маховика. К ним предъявляют довольно жесткие требования, так как маховик имеет очень большую массу, следовательно, нагрузки на подшипник значительны даже в условиях вакуумной среды. На практике чаще всего применяют магнитные подшипники (несмотря на их относительную дороговизну), которые, левитируя, не контактируют с деталями и имеют более долгий срок эксплуатации.

Мотор необходим для того, чтобы непосредственно «заряжать» и «разряжать» маховик, т. е. сообщать ему энергию или забирать ее. В маховичных системах используют разные виды генераторов (синхронные, асинхронные и т. д.). Их выбор, в первую очередь, зависит от тепловыделения ротора и маховика и от охлаждающей системы. Поскольку механизм находится в условиях вакуума, отведение теплоты затруднено (трудно подвести смазку, охлаждающую жидкость и т. п.) и происходит путем излучения в корпус. Поэтому мотор выбирают с учетом тепловых нагрузок.

Теперь поговорим о самом маховике. Тут невозможно еще раз не упомянуть имя Нурбея Владимировича Гулия, который создал и продвигает идею супермаховиков как накопителей энергии. Основные характеристики накопителей энергии: мощность (величина мощности, поставляемой накопителем в систему), удельная энергоемкость (энергия на единицу массы), эффективность (процентное соотношение энергии, полученной при разрядке к энергии, затраченной на накопление энергии). Все они в основном определяются материалом, из которого создан маховик, его формой и способом изготовления.

Чтобы наглядно показать, как материал и форма маховика влияют на его характеристики, рассмотрим следующую формулу:

$$\frac{E}{m} = K \frac{\sigma}{\rho},$$

где  $E$  — энергия;  $m$  — масса маховика;  $K$  — коэффициент формы;  $\sigma$  — плотность на растяжение;  $\rho$  — плотность материала.

Это формула плотности энергии (удельной энергоемкости). Из нее следует, что чем больше  $\sigma$  и чем меньше  $\rho$ , тем больше плотность энергии. Теперь рассмотрим приведенную ниже таблицу материалов. По представленным данным видно, что маховик, изготовленный, например, из углеродного волокна, имеет удельную энергоемкость почти в 7 раз большую, чем такой же маховик из стали.

Сравнительная таблица материалов

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность на растяжение $\sigma$ , МПа	Удельная энергоем- кость $E/m$ , Вт/кг
Сталь (AISI 4340)	7800	1800	39
Сплав (AlMnMg)	2700	600	38
Титаниум (TiAl <sub>6</sub> Zr <sub>5</sub> )	4500	1200	45
Стекловолокно (60 %)	2000	1600	135
Углеродное волокно (60 %)	1500	2400	269

Форма маховика в основном влияет на коэффициент формы  $K$  (данная зависимость проиллюстрирована на рис. 4) и на массу маховика.

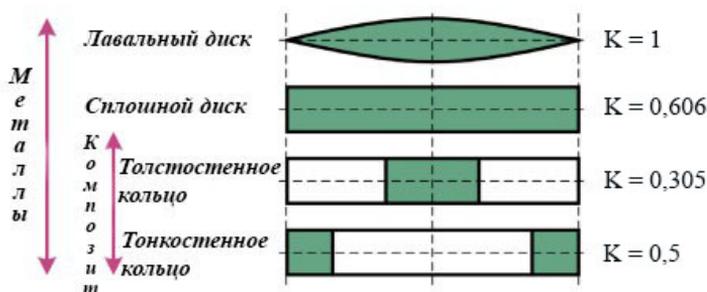


Рис. 4. Сравнение форм маховика

Согласно представленным данным, самым эффективным является маховик с формой лавального диска. Большинство современных маховиков имеют форму тонкстенных колец с  $K = 0,5$ .

Существуют углеволоконные и ленточные супермаховики. Первые, несмотря на неплохую эффективность, применяют не так часто, поскольку они очень разрывоопасны (разрыв происходит с образованием осколков), что нельзя сказать о вторых. Ленточный супермаховик, разработанный Н.В. Гулиа в 1966 г., благодаря особой технологии изготовления чуть эффективнее и намного безопаснее, чем углеволоконный. Это обеспечивается за счет того, что происходит разрыв не внутреннего витка (следствием которого является разрыв с осколками всего маховика), а внешнего, который абсолютно безопасен и при особой технике склейки, запатентованной компанией «Кинетик», еще и легко устраним.

С развитием науки и изобретением графеновой ленты появилась возможность усовершенствования ленточного супермаховика. Теоретически его

эффективность возрастет в десятки раз, однако на практике это еще недостаточно исследовано.

Принцип работы маховиков довольно прост. С помощью мотора маховику сообщается энергия, он раскручивается до огромных скоростей, и таким образом, находясь в вакууме, сохраняет сообщенную энергию. Когда энергию необходимо вернуть в систему, маховик раскручивает мотор, передавая ему свою энергию.

**Применение маховиков в ветроэнергетике.** После ознакомления с устройством и принципом работы маховичных аккумуляторов легко понять, что их применение целесообразно только в тех системах, где очень часто происходит торможение. И под это определение идеально подходит ветроэнергетика (об этом говорилось выше). Использование маховиков в ВЭС поможет обеспечить потребителей бесперебойной электроэнергией, гарантировать требуемое качество электроэнергии, а также снизит колебания мощности. За рубежом можно найти немало подобных примеров. Например, американская компания Beacon Power уже давно (с 2011 г.) использует маховики как хранилище избыточной кинетической энергии. Их маховики активно применяются в электроэнергетике для стабилизации частоты, на изолированных островах для экономии топлива и в том числе в энергетике, связанной с возобновляемыми источниками энергии. Другим примером служит разработка фирмы Toshiba — ROTES, накопитель энергии с маховиком и двигателем-генератором, который с 1996 г. применяется на электростанции на острове Окинава в Японии. Отдаваемая им энергия — 200 МДж. Во Франции компания Voltalia, крупный разработчик в области возобновляемой энергетики, в 2019 г. начала строительство маховичного накопителя энергии из бетона — очень бюджетный вариант благодаря использованию дешевых материалов. По всему миру достаточно примеров применения маховиков в электроэнергетике. Используя разработки профессора Гулиа, можно развить данную тенденцию и в нашей стране и значительно поднять уровень российской ветроэнергетики, сделав ее стабильной, экономичной и экологичной отраслью.

**Заключение.** Подведем итоги. Ветроэнергетика — довольно перспективная отрасль, имеющая множество преимуществ. Ветер — возобновляемый источник энергии, он никогда не закончится, в отличие от ископаемого топлива. При работе ВЭС не выделяются парниковые газы, вредные вещества, что положительно сказывается на экологической обстановке.

Стоит отметить, что электроэнергия, полученная от ВЭС — одна из самых дешевых (нет затрат на топливо). Дешевле только энергия атомных электростанций, но и ее получение намного опаснее. Также не будем забывать,

что эксплуатация ВЭС довольно экономична, затраты требуются в основном только на ремонт и обслуживание. Но, конечно, имеются и недостатки. Основной — это нестабильность получаемой электроэнергии. Но он легко устраним, если использовать маховичные аккумуляторы. Безусловно, это еще больше повышает первоначальные затраты (а они и без этого немалые), но стоит отметить два важных тезиса. Во-первых, энергетики стремятся к минимизации стоимости при неизменной мощности путем внедрения в производство маховиков новых материалов (графеновые ленты). Эту же тенденцию можно выделить и в производстве ветрогенераторов (улучшение аэродинамики ротора, уменьшение массы и т. п.). Во-вторых, в конечном счете затраты окупятся за счет дешевой эксплуатации и долговечности.

В итоге можно смело сказать, что за симбиозом маховичных аккумуляторов и ветрогенераторов стоит будущее энергетики, поэтому необходимо развивать эту технологию в нашей стране.

## Литература

- [1] Гулиа Н.В., Лаврентьев А.И., Зотов А.В., Зотов А.А., Супермаховичные накопители энергии и их перспективы. *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*, 2022, № 4.
- [2] Гулиа Н.В. *Инерция*. Москва, Наука, 1982, 152 с.
- [3] Гапич Д.С., Ханин Ю.И., Немченко А.В., Лихолетов Е.А. Ветроэнергетика: состояние, проблемы и перспективы развития. *Инновации и инвестиции*, 2022, № 4, с. 228–231.
- [4] Read M. *Flywheel Energy Storage Systems for Rail*, 2010. <https://doi.org/10.25560/6451>
- [5] Letcher T. *Storing Energy. Donald Bender*. Chapter 10, Flywheels, 2016.
- [6] Li Xing. *Evaluation and Design of a Flywheel Energy Storage System*. Ph. D. Thesis. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUPrints, 2019. <https://doi.org/10.25534/tuprints-00009461>
- [7] Olabi A.G., Wilberforce T., Abdelkareem M.A. Critical Review of Flywheel Energy Storage System. *Energies*, 2021, vol. 14, art. 2159, pp. 1–33.
- [8] Pullen K.R. The Status and Future of Flywheel Energy Storage. *Joule*, 2019, vol. 3, iss. 6, pp. 1394–1399. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.04.006>
- [9] Ragheb M. *Energy Storage and Transport Systems. Bridging the Supply-Demand Gap*. Kinetic Energy Flywheel Energy Storage. Lecture Notes, Web Text, Chapter 31, 2011. URL: [https://www.researchgate.net/publication/265612325\\_Bridging\\_the\\_Gap\\_Between\\_Supply\\_and\\_Demand](https://www.researchgate.net/publication/265612325_Bridging_the_Gap_Between_Supply_and_Demand) (accessed 15.09.2024).

- [10] Choudhury S. Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, vol. 31 (9). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13024>

**Поступила в редакцию 09.10.2024**

**Ойдинская Софья Владимировна** — студентка кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Барбашов Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Ойдинская С.В. Применение маховичных аккумуляторов в ветровой отрасли электроэнергетики. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 01 (96). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/machsci/1020.html>

## INTRODUCING THE FLYWHEEL BATTERIES IN THE WIND POWER INDUSTRY

S.V. Oydinskaya

osv22t288@student.bmstu.ru

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

Wind power is a rather promising industry, which main drawback is the instable power generation and significant power losses during braking. This problem could be solved using the flywheel batteries. They would accumulate the braking energy and give it to the system when needed. The paper provides the statistical data showing the increasing role of wind power in the world market and indicating the need for its development in the Russian Federation. It notes main advantages and disadvantages of this energy sector. The paper describes the wind generator and flywheel structure and operation principles, and substantiates the need to use the flywheel power storage systems particularly in this power industry.

**Keywords:** flywheel batteries, wind generator, wind power, energy recovery, electric generator, braking system, braking device, super flywheel

---

*Received 09.10.2024*

**Oydinskaya S.V.** — Student, Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Barbashov N.N., Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

### **Please cite this article in English as:**

Oydinskaya S.V. Introducing the flywheel batteries in the wind power industry. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 01 (96). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/machsci/1020.html>