

4. Генфальд, Е.Д. Технология биотоплив : уч. пособие для магистрантов, обуч. по направлению 240700.68 «Биотехнология», рукопись / Е. Д. Генфальд. – Архангельск : Сев. (Аркт.) фед. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2012. – 60 с.

5. Руководство по биогазу. От получения до использования / Амон Т., Хартвиг фон Бредов и др. – Германия : Агентство по возобновляемым источникам (FNR), 2010. – 215 с.

ИНЕРЦИОННЫЕ НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ INERTIAL ENERGY STORAGEES

А. В. Ющик, В. И. Красовский
A. V. Yuschik, V. I. Krasovsky

*Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь
yuschikalexeigm@gmail.com, vikras@iseu.by
International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU,
Minsk, Republic of Belarus*

Инерционные накопители энергии накапливают и сохраняют энергию посредством вращающегося маховика, а выделяют в виде механической энергии вращения. Современные инерционные накопители энергии это супермаховики, в которых используются прочные и гибкие материалы для повышения энергоэффективности, энергоёмкости и безопасности маховика. По удельной энергоёмкости эти накопители могут превосходить все имеющиеся на данный момент.

Inertial energy accumulators accumulate and store energy through a rotating flywheel, and release it in the form of mechanical rotational energy. Modern inertial energy storage devices are super flywheels that use durable and flexible materials to improve the energy efficiency, energy capacity and safety of the flywheel. In terms of specific energy intensity, these storage devices can exceed all currently available ones.

Ключевые слова: маховик, супермаховик, графен, нанотрубки, энергоэффективность.

Keywords: flywheel, superflywheel, energy storage, graphene, nanotubes, energy efficiency.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-215-219>

Маховики представляют собой вращающиеся тела и в большинстве случаев симметричны относительно оси вращения. Маховики используются в машинах с неравномерным потреблением и использованием энергии, для накопления энергии, когда потребление энергии превышает ее расход, и для отдачи, когда потребление энергии превышает ее расход. Они также используются в качестве накопителей энергии в гибридных двигателях и для рекуперации энергии при торможении. Функцию маховика обычно выполняет большой вращающийся элемент механизма. Помимо энергии, вращающийся маховик также обладает моментом импульса, что имеет отношение к наблюдению гироскопического эффекта, при котором направление оси вращения изменяется вокруг своего первоначального направления при приложении внешней силы, не совпадающей с направлением оси вращения. Одним из первых применений гироскопического эффекта стал переход от стрельбы круглыми ядрами к продолговатым снарядам в XIX веке. Продолговатый снаряд может сохранять ориентацию в пространстве за счет вращения, а продолговатая форма позволяет значительно увеличить массу и взрывную массу при равном аэродинамическом сопротивлении. Ротор гироскопа также является маховиком. Маховики используются в гироскопических устройствах контроля ориентации в пространстве. Самый известный пример маховика-велосипедное колесо. Способность маховика удерживать ось вращения в одном направлении используется для успокоения качки кораблей. В повседневной жизни маховики чаще всего используются в автомобилях. Любой поршневой двигатель оснащен маховиком, который обычно совмещает функции части сцепления и стартера. Также маховик снижает неравномерность вращения в двигателе до приемлемой, что увеличивает ресурс трансмиссии. Энергия, аккумулируемая маховиком, рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{I\omega^2}{2},$$

где I – момент инерции массы относительно оси вращения маховика, ω – угловая скорость в радианах в секунду.

Для простых форм маховика существуют следующие выражения момента инерции:

Для полого цилиндра:

$$I = \frac{1}{2}m(r^2 + r_0^2),$$

где m – масса полого цилиндра; r – его радиус; r_0 – внутренний радиус цилиндра.

Для тонкостенного цилиндра:

$$I = mr^2,$$

Для сплошного цилиндра:

$$I = \frac{1}{2}mr^2$$

Заменив в формуле для полого цилиндра угловую скорость ω на частоту вращения f по формуле:

$$\omega = 2\pi f$$

получим

$$E = m(\pi f)^2(r^2 + r_0^2)$$

Размеры и масса маховика обычно определяются той энергией, которую он должен накапливать и отдавать машине. Следующее уравнение определяет максимальное напряжение, испытываемое ротором:

$$\sigma_{max} = \rho\omega^2 r^2$$

Ограничение скорости также зависит от фактора формы K , который определяет конструкцию маховика. Рисунок 1 изображает различные формы маховика и соответствующий ему коэффициент формы. Как удельная энергия (E/m), так и плотность энергии (E/V) зависят от формы маховика, которую можно выразить через следующие уравнения:

$$\frac{E}{m} = K \frac{\sigma_{max}}{\rho},$$

$$\frac{E}{V} = K\sigma_{max}$$

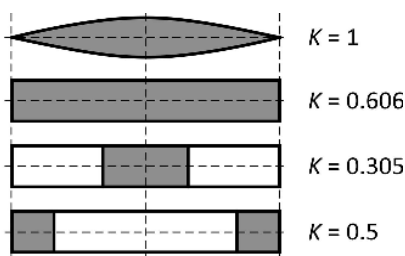


Рисунок 1 – Коэффициенты формы различных маховиков

Как правило, маховики изготавливаются из лучших сортов стали, удельная энергоёмкость таких маховиков доходит до 145 кДж/кг. Однако в маховиках при превышении допустимой окружной скорости происходит разрыв, приводящий к образованию крупных осколков, вызывающих разрушения окружающих конструкций. Чем прочнее маховик, тем опаснее его разрыв. Из-за возможности разрыва маховики приходится производить с максимально возможной прочностью, что сильно влияет на их эффективность. Маховики, изготовленные путём навивки из сверхпрочных углеродных волокон малой плотности, позволяют повысить угловую скорость вращения и получать более высокую удельную энергоёмкость – до 1,8 МДж/кг. Такие маховики называются – супермаховики.

Супермаховики-это разновидность маховиков, используемых в инерционных накопителях энергии. Они могут накапливать больше кинетической энергии, чем обычные маховики, и являются более безопасными. Современные супермаховики представляют собой вращающиеся тела, изготовленные из различных прочных и гибких материалов, таких как тонкие стальные ленты, стекловолоконная или углепластиковая лента, обернутые вокруг специального сердечника. Благодаря такой конструкции супермаховики обладают большей энергоёмкостью и безопасностью в эксплуатации, чем обычные маховики. При разрушении супермаховика он не разлетается на крупные куски, а разрушается лишь частично. Отделившиеся части ленты при трении о внутреннюю поверхность корпуса тормозят супермаховик, предотвращают его дальнейшее разрушение. Супермаховик из графеновой ленты имеет удельную энергоёмкость до 4,4 МДж/кг. В составе инерционного накопителя супермаховик работает вместе с мотором-генератором. При подаче энергии на мотор-генератор он раскручивает супермаховик, а при подключении нагрузки он тормозит, вырабатывая при этом электроэнергию. КПД такого преобразования достигает 98 %. Для уменьшения потерь на трение супермаховик находится в вакууме внутри оболочки и также используется магнитный подвес. В 1964 году советский инженер Н. В. Гулия вероятно являясь первым изобретателем супермаховика заявил авторские права на него.

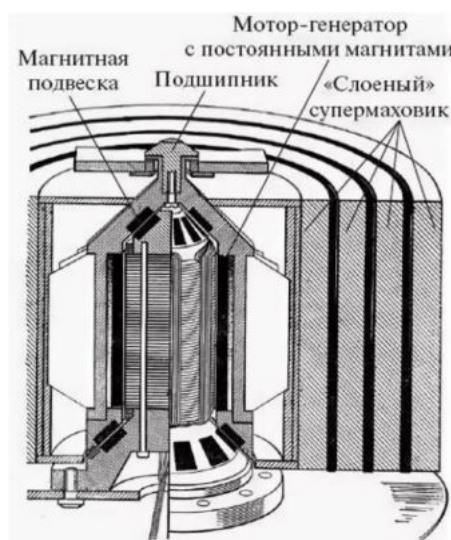


Рисунок 2 – Схема супермаховика Н. Гулиа

Окружная скорость разрыва супермаховика около 2 км/с. Использование для намотки супермаховиков углеродных волокон повышенной прочности, получаемых с помощью нанотехнологий, в теории позволит увеличить энергоёмкость свыше 180 МДж/кг. На данный момент ни какие другие накопители энергии не способны иметь такой показатель удельной энергоёмкости. Современные маховики по удельной мощности (Вт/кг) уже намного превосходят другие накопители энергии. В наиболее экономичных конструкциях маховик вращается на магнитном подвесе в вакууме, а энергия в нем хранится месяцами, что сопоставимо с другими накопителями энергии. Супермаховики перспективны для накопления энергии ночью и использования ее в гибридных силовых установках автомобилей днем и при пиковых нагрузках, и наоборот, для накопления энергии днем и использования ее для получения солнечной энергии ночью. Инерционные системы хранения с большой эффективностью могут быть применены для обратного получения энергии на рельсовом транспорте с большой частотой ускорения и торможения (метропоездах, электричках). Экономия энергии при использовании данной технологии может достигать 50 % и выше. Также, данные системы с успехом применяются на подъёмных лифтах, кранах и других устройствах для подъёма груза. При этом КПД подъёмных устройств, оборудованных маховичной системой накопления энергии может достигать 90 % и выше, например, в случаях, когда груз расположен выше места его доставки. Данные системы выгодно применять для быстрой зарядки аккумуляторов электротранспорта, стабилизации частоты и мощности в электросетях, в источниках бесперебойного электропитания, в гибридных установках автотранспорта.

Недостатком супермаховиков является гироскопический эффект, вызванный большим моментом импульса вращающегося маховика, который не позволяет маховику изменить направление оси вращения. Чтобы компенсировать этот эффект, маховик может быть подвешен на кардановом подвесе при использовании в качестве накопителя энергии в транспортных средствах, но это значительно усложняет конструкцию.

Изначально Н. В. Гулиа планировал применить супермаховик в качестве накопителя энергии для транспортных средств и даже изготовил несколько образцов такого транспорта, которые на тот момент оказались неэффективными для использования в автомобилях. Современные супермаховичные накопители энергии используются и для других целей: В 1997 году американская компания Beason Power сделала важный шаг вперед, разработав серию больших стационарных супермаховиков для использования в промышленных электросетях. Супермаховики производства Beason Power способны в зависимости от модели накапливать энергию в 21,6 и 90 МДж и выдавать мощность в 2 и 200 кВт соответственно. Американская энергосистема – это среда с множеством местных поставщиков энергии и открытыми энергетическими рынками, и необходимость регулировать мощность создает многие из проблем, которые компания хочет решить. Текущая частота регулируется путем накопления «лишней» энергии при падении потребления и закрытия разрыва при пике потребления. Однако супермаховики, обмотанные углеродным волокном, оказались слишком ненадежными, и под научным руководством Н. В. Гулиа компания KEST разработала уникальный стационарный накопитель кинетической энергии на основе супермаховика, изготовленного из высокопрочной стальной ленты. Один такой накопитель способен запасать энергию до 72 МДж и обеспечивать мощность до 1 МВт. Кластер из нескольких таких аккумуляторов может заменить дорогостоящие и громоздкие гидроаккумулирующие электростанции и выровнять ежедневную неоднородность электрических нагрузок в регионе. Хотя автомобили с маховиками не так распространены, транспорт остается одним из наиболее привлекательных вариантов использования супермаховиков. Подключенный к той же электросети, что и поезд, супермаховик может накапливать энергию торможения, которая затем может быть подана обратно в сеть для ускорения поезда. Полученная этим способом энергия позволяет снизить энергопотребление на более 30 %. Супермаховики так же используются для обеспечения

бесперебойного питания на объектах с повышенным уровнем ответственности (медицинские, военные и другие объекты). Характеристики супермаховика обеспечивают отклик устройства на уровне до сотых долей секунды, не прерывая подачу электроэнергии ни на секунду.

В 2012 г. инженеры Boeing сумели получить линейную скорость обода супермаховика 800 м/с. На тот момент мировой рекорд для малых тестовых систем составлял 1405 м/с. Важно и то, что инженеры Boeing с помощью сверхпроводящих электромагнитов смогли замедлить саморазряд супермаховичного накопителя до скорости, близкой к скорости саморазряда электрохимических систем.

Хотя электрохимические решения доминируют на мировом рынке промышленных систем хранения энергии, маховики имеют ряд преимуществ, включая большое количество циклов заряда и разряда, отсутствие деградации характеристик со временем и простоту измерения остаточной емкости. Маховичные накопители энергии с использованием графеновых трубок обладают самой высокой удельной энергоемкостью, но сами трубки довольно дороги для широкого применения этого накопителя энергии. При использовании графеновых трубок низкого качества энергоемкость значительно снижается.

Маховики отлично показывают себя в случаях, когда требуется высокая мощность, то есть они конкурируют скорее с суперконденсаторами, чем с аккумуляторами, тем не менее по сравнению с аккумуляторами имеют большую удельную энергоемкость. По всему миру разработкой маховичных накопителей занимаются более 25 научных коллективов, а производством - по крайней мере, 27 предприятий. Коммерческие решения для транспорта имеют удельную мощность 3,5 кВт/кг и удельную энергоемкость 23,04 кДж/кг, тогда как система обратного получения энергии для транспорта на основе суперконденсаторов имеет показатели 1,7 кВт/кг и 8,28 кДж/кг, что по мощности является в 2 раза меньше и в 3 раза меньше по энергоемкости. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики трёх систем накопления энергии для электроприводного транспорта.

Таблица 1

Характеристики трёх систем накопления энергии для электроприводного транспорта

Тип накопителя	Маховичный	Суперконденсаторный	Ионно-литиевый аккумулятор
Номинальная мощность, кВт	120	120	120
Ёмкость, МДж	1,64	2,33	95,04
Число рабочих циклов	>1 млн	~1 млн	~1000
Удельная энергия, кДж/кг	29,88	6,3	396
Удельная мощность, Вт/кг	2200	320	500
Масса системы, кг	55	370	240

Ещё одна область применения инерционных накопителей – это буфер для повышения энергоэффективности электрических кранов, экскаваторов и других механизмов, работающих с неравномерной нагрузкой. Часто установку для выработки энергии выбирают такую чтобы её максимальная мощность покрывала максимальное пиковое потребление, которое требуется достаточно нечасто. Большую часть времени генератор будет недогружен, что приведёт к излишнему расходу энергоресурса и износу генератора. Буферный накопитель в данной электрической системе берёт пиковую нагрузку на себя, тем самым выравнивая условия работы генератора. При таком буфере в системе можно использовать генераторы с меньшей мощностью, чем те в которых нет буфера.

Возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая энергия, обычно снижают надежность системы, поскольку они являются нестабильными, непредсказуемыми и прерывистыми по своей природе. Тем не менее, более быстрое реагирование инерционных накопителей энергии помогают облегчить сглаживание энергопотребления и служат жизнеспособным хранилищем в часы пик. Дисбаланс выхода энергии ветрогенераторов и необходимость нагрузки устраняются за счет гибридной комбинации инерционных накопителей и технологии накопления энергии со сжатым воздухом, в итоге смягчая низкую амплитуду колебания и более высокие частоты. В дополнение к этому, накопители энергии на маховиках играют значительную роль в регулировании частоты сети энергосистемы.

Технологии производства супермаховиков на сегодня уже довольно распространены: 500 накопителей установлены в автобусах Лондона (экономия энергоресурса превысила 20%), 400 крупных маховиков по всему миру работают в энергетических сетях, выполняя задачи регулирования частоты, и многие тысячи задействованы в комплексных системах питания ответственного оборудования.

Обычные маховики всегда изготавливались из материалов, одинаково прочных во всех направлениях, например, из твердой стали. Суть концепции супермаховика заключается в использовании вместо этого материала, тот, который является сверхпрочным в одном конкретном направлении – внешнем направлении напряжения, которое стремится разорвать быстро вращающийся маховик на части. Прочные провода представляют собой готовый материал. Обычно они прочнее по длине, чем исходный материал в объемном виде. Супермаховик может быть изготовлен из радиальных нитей высокопрочной стальной музыкальной проволоки, которая в настоящее время доступна с пределом прочности на разрыв около 4,1 ГПа. Современные материалы состоят из высокопрочных волокон графита или бора. Такие волокна могут быть ориентированы не случайным образом, а так, чтобы придавать дополнительную прочность в радиальном направлении. Супермаховик из такого материала может принимать различные формы: стержень, диск или клин. Чтобы зарядить супермаховик, он оснащен

электродвигателем, который подключается к внешнему источнику энергии, чтобы разогнать ротор. Затем двигатель становится генератором, приводимым в движение вращающимся маховиком.

В перспективе инерционные накопители энергии (маховики и супермаховики) целесообразно использовать в большинстве систем за счёт их высокой энергоёмкости по сравнению с остальными накопителями. Их использование позволяет стабилизировать выход энергии в солнечной энергетике. Использование инерционного накопителя энергии возможно в высоко- и низкотемпературных зонах без значительного уменьшения его эффективности. Также за счёт большей удельной мощности накопителей на маховиках позволяет уменьшить массу системы рекуперации на транспортных средствах, что также уменьшает их потребление энергоресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маховик // Большая российская энциклопедия 2004 - 2017 URL: https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/2195703 (дата обращения: 15.02.2024).
2. Маховик // Википедия URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Маховик> (дата обращения: 15.02.2024).
3. Супермаховик // Википедия URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Супермаховик> (дата обращения: 15.02.2024).
4. Маховичный накопитель энергии // Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Маховичный_накопитель_энергии (дата обращения: 15.02.2024).
5. Характеристики и сферы применения маховичных накопителей энергии // Aftershock URL: <https://aftershock.news/?q=node/488846&full> (дата обращения: 15.02.2024).

СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПИВА ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИЕЙ ПИВОВАРЕННОГО ЯЧМЕНЯ

REDUCTION OF SPECIFIC ENERGY INTENSITY OF BEER BY ELECTROACTIVATION OF MALTING BARLEY

О. В. Бондарчук¹, В. А. Пашинский², Ю. Н. Селюк¹

O. V. Bondarchuk¹, V. Pashynski², Y. Seluk¹

¹Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
БГАТУ

²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт
имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь.
guloks82@mail.ru

¹Belarusian State Agrarian Technical University, BSATU

²International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU
Minsk, Republic of Belarus

Представлены результаты оценки удельных затрат энергии на производство пива и солода после электроактивации пивоваренного ячменя в переменном электрическом поле. Обработка ячменя в электрическом поле оптимальных значений параметров существенным образом влияет на качество солода (увеличивает экстрактивность на 1...3 %), что в конечном счете позволяет получить дополнительный выход пива, удельная энергоёмкость которого значительно ниже энергоёмкости основной продукции.

The results of estimation of specific energy consumption for beer and malt production after electroactivation of malting barley in an alternating electric field are presented. Processing of barley in the electric field of optimal values of parameters significantly affects the quality of malt (increases extractivity by 1...3 %), which ultimately allows to obtain an additional output of beer, the specific energy intensity of which is much lower than the energy intensity of the main product.

Ключевые слова: пивоваренный ячмень, показатели качества, напряженность электрического поля, солод, энергоёмкость, экстрактивность.

Keywords: malting barley, quality indicators, electric field strength, malt, energy intensity, extractivity.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-219-222>

Как известно, Президентом Республики Беларусь поставлены задачи по повышению эффективности работы пивоваренных организаций, расширению и наращиванию объемов производства импортозамещающих сортов пива, сокращению импорта пивоваренной продукции, развитию сырьевой зоны по выращиванию ячменя