

ОБЗОР НАКОПИТЕЛЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МАХОВИКОВОГО ТИПА

А. А. Бубенчиков, Н. А. Терещенко, Т. В. Бубенчикова
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. В статье представлен обзор отечественных и зарубежных разработок накопителей энергии маховикового типа, которые необходимы для накопления, хранения и отдачи электроэнергии, работы в качестве резервных и аварийных источников питания. Указаны области применения накопителей. Произведен анализ параметров геометрии маховика, влияющих на накопление энергии.

Ключевые слова: титановый маховик, удельная энергоемкость, кинетический накопитель, углеродное волокно, магнитный подвес, геометрия маховика, оптимизированная конструкция.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-53-59

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, благодаря широкому развитию промышленности, растут показатели потребления электроэнергии. Поэтому целесообразно заменить традиционные источники энергии на альтернативные. Большинство альтернативных источников энергии являются непостоянными, вследствие этого возникает проблема выработки бесперебойной энергии. Применение эффективных способов аккумуляции электроэнергии позволит справиться с такой проблемой. Сегодня одним из наиболее перспективных способов накопления кинетической энергии является маховик.

Маховик представляет собой массивное вращающееся колесо, которое используют в качестве инерционного аккумулятора. Благодаря наличию привода (механического или электрического), маховик раскручивается, а во время вращения и происходит запас кинетической энергии. В моменты избытка энергии, маховик запасает её, а во время дефицита – отдает, что позволяет выровнять поступление энергии [1]. Кроме того, работу махового колеса можно встретить практически везде, начиная от детских игрушек «йо-йо» и заканчивая применением на космических станциях. Так же при накоплении энергии, маховик способен сохранять направление оси вращения. Данное свойство часто применяется для успокоения корабля при качке от волн. Еще одним преимуществом маховика является его применение в автотранспорте, это позволяет заметно экономить топливо, что актуально при существующих ценах на нефть в XXI веке.

Современный маховиковый кинетический накопитель создает весьма значительную конкуренцию широко распространенным химическим накопителям и будет продолжать набирать обороты, т. к. имеет ряд преимуществ.

- наличие значительной энергоёмкости и возможность выдавать большими «порциями» мощность в сеть;
- маховики являются экологически чистым устройством;
- достаточно высокий КПД (92–97 %);
- долговечность и надёжность;
- наличие неограниченного количества заряда и разряда [2–5].

В корпоративной газете «Энерговектор» представлено преимущество маховиковых систем накопления энергии относительно емкостных и ионно-литиевых аккумуляторов по следующим параметрам: удельная мощность, количество циклов работы и масса системы для электроприводного транспорта [6].

Указанные выше преимущества кинетического накопителя и широкое применение в жизни человека, повышает интерес ученых к данному устройству. Следовательно, увеличивается количество исследований по данной тематике, связанных с модернизацией конструкции. В тоже время ученые исследуют высокотехнологичные материалы, определяют энергетические параметры, которые влияют на эффективность конструкции.

Отечественный опыт. Самым известным учёным в России, который исследовал данное устройство, является Нурбей Владимирович Гулиа. Посвятив десятки лет усовершенствованию маховика, он смог обезопасить конструкцию. Ведь при увеличении скорости вращения маховика, частицы «растягивают» диск, впоследствии чего происходит разрыв конструкции. В данном случае он заменил монолит, который при аварии разлетается на огромное количество осколков, лентой из высокопрочного синтетического волокна, которая при повреждении может тормозить, упираясь о стенку кожуха.

Еще одной немаловажной задачей для проектировщиков, является создание маховиков с весьма огромным запасом прочности. Нурбей Владимирович нашел и в данной ситуации выход. При проведении экспериментов, оказалось, что при значительном увеличении запаса прочности, энергоёмкость устройства изменяется незначительно. Проведя опыты с различными материалами, выявили, что литая лента по сравнению с лентой из тонкой и высокопрочной стали меньше накапливает энергии, а использование сверхпрочных стеклянных или

синтетических волокон позволит в разы увеличить энергоёмкость маховика [7–8]. На данный момент Нурбей Владимирович имеет патент «Маховичный накопитель энергии с горизонтальной осью вращения» [9], который положил начало развитию разработок супермаховика.

Сегодня в России известны компании: «Кинемак» и «Русский сверхпроводник», поставляющие на рынок маховичные накопители энергии. Компания «Кинемак» разработала и произвела маховиковый накопитель кинетической энергии для подъемно-транспортного оборудования, способный экономить потребляемую краном электроэнергию и сетевую мощность. Полученный КПД такого маховика порядка 40%, что превышает показатели зарубежных аналогов [10]. В свою очередь корпорация «Русский сверхпроводник» смогла разработать НКЭ с максимальной энергоёмкостью – 5 МДж и мощностью в 22 кВт на основе асинхронизированной машины вертикального исполнения [11].

Зарубежный опыт. Компания ATZ (Германия) разработала кинетический накопитель энергии (КНЭ), способный запасать 20 МДж. Мощность такого накопителя составляет 250 кВт. Особенности конструкции накопителя – это магнитный подвес на основе высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) керамики и использование системы синхронизации с сетью. Материал, из которого изготовлен маховик – углеродное волокно [12].

В настоящее время лидирующие позиции на зарубежном рынке заняла компания Weacon Power. При производстве маховиков она изготавливает композитный обод из углеродного волокна. Обод поддерживается ступицей и валом, к которому присоединен мотор-генератор. Все, указанные элементы составляют узел ротора. В моменты пиков электрической энергии, она превращается в механическую, заряжая маховик. В этот момент маховик является нагрузкой, вытягивая энергию из системы, для увеличения скорости вращения ротора. Отдача энергии в сеть происходит за счет того, что инерционное движение ротора заставляет вращать двигатель, который в данном случае работает в режиме генератора [13]. Скорость ротора в данной конструкции достигает 16000 об/мин. Преимущество конструкции достигается тем, что используют герметичную вакуумную камеру. Это позволяет избавиться от трения, кислорода и влаги в устройстве, что увеличит срок службы и уменьшит износ устройства.

Накопитель Gyrodribe, выпускаемый британской компанией GKN, нашёл широкое применение в автомобильной отрасли как рекуператор энергии. Скорость маховика в данном устройстве достигает 36000 об/мин. Сам же маховик выполнен из карбона и находится в вакуумном корпусе. Во время разгона автомобиля кинетическая энергия маховика, преобразуясь в электрическую, подпитывает тяговый двигатель. Это способствует более лёгкому ускорению автомобиля. При торможении автомобиля происходит накопление энергии маховиком. Таким образом, использование маховика позволяет не только экономить топливо, но и сократить количество вредных выбросов в атмосферу [14].

В источнике [15] представлена усовершенствованная конструкция системы маховика. Основная отличительная черта – использование гибридных магнитных подшипников, а именно, в осевых направлениях устройства располагаются активные магнитные подшипники, а в радиальных – подшипники с постоянными магнитами. За счет того, что используется активный магнитный подшипник с контролируемым электромагнитом, данная конструкция имеет высокий КПД. Это достигается за счёт отсутствия трения между вращающимися телами. Конструкция может быть использована для длительной бесперебойной работы, а так же быть применена для обмена импульсов в устройстве.

Американская компания Voieing изобрела КНЭ с энергоёмкостью в 35 кВт·ч., мощность которого составила 3 кВт; а запасаемая энергия – 5 кВт·ч. Работы велись в направлении определения конструкции способной выдавать в сеть максимальную мощность и запасать максимальную энергию.

Компания POWERTHRU (шт. Мичиган) в конструкции маховика использует молекулярный насос с геликоидом, расположенным на валу маховика. Емкость такого модуля способна достигать 528 Вт·ч, для увеличения объема емкости можно параллельно соединить несколько модулей. Маховик компании POWERTHRU выполнен из прочного углеродного волокна [16].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Произведя обзор существующих конструкций, поставили цель: определить параметр, который в большей степени влияет на определение оптимальной конструкции маховика. Из анализа источников, выявили следующие параметры маховика:

1. **Материал.** Сегодня маховик можно изготовить из стали, алюминиевых сплавов, титана, но в последнее время преимущество отдают композитным материалам на основе стекловолокна, углеродного волокна или кевлара. У данных материалов наблюдается высокая удельная прочность, которая может запасать большой объём энергии при большой скорости маховика [17–19].

2. **Геометрия.** Параметр, контролирующий способность накопления кинетической энергии маховика; позволяющий оптимизировать форму устройства. Так же позволяет уменьшить нагрузку на вал и подшипники.

3. **Скорость вращения.** В связи с тем, что накопленная энергия маховика зависит от квадрата скорости вращения, то максимальная скорость должна быть соотнесена с максимальной прочностью на разрыв маховика, материал и внешний его диаметр [20].

4. Электрическая машина (двигатель/генератор). Тип и параметры этого компонента зависят от системы применения и продолжительности хранения энергии. Чаще всего используют синхронные машины с постоянными магнитами.

5. Подшипниковая система. Могут быть использованы механические подшипники (шарнирные, сферические или конические при низких скоростях), магнитные подшипники (пассивные и активные), или комбинации магнитных подшипников и механических подшипников. К последнему поколению относят высокотемпературные сверхпроводниковые подшипники, в которых потери из-за трения составляют на два порядка меньше, чем у магнитного подшипника и в несколько порядков, чем у механического.

III. ТЕОРИЯ

Подробно рассмотрим параметр геометрия. В программном пакете SolidWorks была создана трехмерная модель маховика, который представлен в виде диска с ободом и ступицей рис. 1.

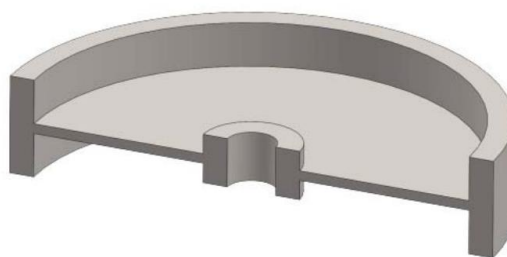


Рис. 1. Трехмерная модель маховика

Во внимание возьмём параметры, которые существенно влияют на поведение маховика: диаметр (D_r), ширина (g_r), высота обода (H_r) и толщина диска (g_d). Всего будет задействовано 7 параметров (рис. 2), из них неизменными будут величины: $g_h = 5$ мм, $H_h = 10$ мм и $D_h = 10$ мм. Исследуемый маховик выполнен из материала Ti-6Al-4V (титановый сплав), который имеет свойства: модуль упругости: 104800,31 МПа; коэффициент Пуассона: 0,31; прочность на растяжение: 1050 МПа; предел текучести: 827,37 МПа; плотность массы титана: 4428,78 кг/м³.

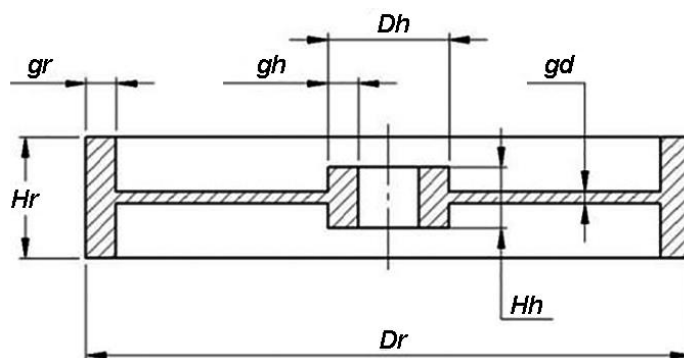


Рис. 2. Двухмерный чертеж маховика (вид в разрезе)

При исследовании диаметра обода величина D_r будет изменяться от 100 до 110 с шагом в 1 мм, $g_r = 5$ мм, $g_d = 2$ мм; $H_r = 20$ мм.

При исследовании ширины обода величина g_r будет изменяться от 3 до 8 с шагом в 0,5 мм, $D_r = 100$ мм, $g_d = 2$ мм; $H_r = 20$ мм.

При исследовании высоты обода величина H_r будет изменяться от 10 до 30 с шагом в 2 мм, $D_r = 100$ мм, $g_d = 2$ мм; $g_r = 5$ мм.

При исследовании толщины диска величина g_d будет изменяться от 1,5 до 4 с шагом в 0,25 мм, $D_r = 100$ мм, $g_r = 5$ мм, $H_r = 20$ мм.

Для каждой конфигурации, используя возможности Evaluate, вкладка в SolidWorks CommandManager, рассчитали массу маховика (m) и момент инерции (I). Так же, учитывая, что маховик вращается со скоростью 7000 об/мин (угловая скорость при этом составляет 733,0383 рад/с), по формулам (1) и (2) рассчитали кинетическую энергию (E_k), хранящуюся в маховике, и удельную энергию (ЕУД):

$$E_K = 0,5 \cdot I \cdot \omega^2, \quad (1)$$

$$E_{уд} = \frac{E_K}{m}. \quad (2)$$

Рассчитанные параметры маховика, масса, момент инерции, кинетическая энергия и удельная энергия представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
РАССЧИТАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАХОВИКА

| <i>Dr</i> , мм | <i>m</i> , кг | <i>I</i> , кг·мм ² | <i>E_K</i> , Дж | <i>E_{уд}</i> , Дж/кг |
|----------------|---------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 100 | 0,196 | 356,619 | 95,814 | 488,846 |
| 101 | 0,199 | 368,723 | 99,066 | 497,818 |
| 102 | 0,201 | 381,114 | 102,395 | 509,427 |
| 103 | 0,204 | 393,795 | 105,802 | 518,637 |
| 104 | 0,207 | 406,772 | 109,288 | 527,964 |
| 105 | 0,21 | 420,047 | 112,855 | 537,405 |
| 106 | 0,212 | 433,625 | 166,503 | 549,543 |
| 107 | 0,215 | 447,51 | 120,234 | 559,226 |
| 108 | 0,218 | 461,707 | 124,048 | 569,028 |
| 109 | 0,221 | 476,218 | 127,947 | 578,944 |
| 110 | 0,223 | 491,049 | 131,931 | 591,621 |
| <i>gr</i> , мм | <i>m</i> , кг | <i>I</i> , кг·мм ² | <i>E_K</i> , Дж | <i>E_{уд}</i> , Дж/кг |
| 3 | 0,15 | 259,065 | 69,604 | 464,024 |
| 3,5 | 0,16 | 284,654 | 76,479 | 472,091 |
| 4 | 0,173 | 309,432 | 83,136 | 480,554 |
| 4,5 | 0,185 | 332,414 | 89,579 | 484,212 |
| 5 | 0,196 | 356,619 | 95,814 | 488,846 |
| 5,5 | 0,207 | 379,063 | 101,844 | 491,999 |
| 6 | 0,218 | 400,763 | 107,674 | 493,918 |
| 6,5 | 0,229 | 421,735 | 113,309 | 494,797 |
| 7 | 0,24 | 441,997 | 118,752 | 494,802 |
| 7,5 | 0,251 | 461,565 | 124,01 | 494,063 |
| 8 | 0,262 | 480,453 | 129,085 | 492,689 |
| <i>gd</i> , мм | <i>m</i> , кг | <i>I</i> , кг·мм ² | <i>E_K</i> , Дж | <i>E_{уд}</i> , Дж/кг |
| 1,5 | 0,183 | 342,39 | 91,991 | 502,682 |
| 1,75 | 0,189 | 349,504 | 93,902 | 496,837 |
| 2 | 0,196 | 356,619 | 95,814 | 488,846 |
| 2,25 | 0,203 | 363,733 | 97,725 | 481,404 |
| 2,5 | 0,21 | 370,847 | 99,636 | 474,459 |
| 2,75 | 0,216 | 377,962 | 101,548 | 470,13 |
| 3 | 0,223 | 385,076 | 103,459 | 463,943 |
| 3,25 | 0,23 | 392,19 | 105,371 | 458,133 |
| 3,5 | 0,236 | 399,305 | 107,282 | 454,586 |
| 3,75 | 0,243 | 406,419 | 109,194 | 449,357 |
| 4 | 0,25 | 413,533 | 111,105 | 444,42 |
| <i>Hr</i> , мм | <i>m</i> , кг | <i>I</i> , кг·мм ² | <i>E_K</i> , Дж | <i>E_{уд}</i> , Дж/кг |
| 10 | 0,13 | 207,093 | 55,64 | 428,002 |
| 12 | 0,143 | 236,998 | 63,675 | 445,279 |
| 14 | 0,157 | 266,903 | 71,71 | 456,748 |
| 16 | 0,17 | 296,808 | 79,744 | 469,083 |
| 18 | 0,183 | 326,714 | 87,779 | 479,667 |
| 20 | 0,196 | 356,619 | 95,814 | 488,846 |
| 22 | 0,209 | 386,524 | 103,848 | 496,882 |
| 24 | 0,223 | 416,329 | 111,883 | 501,718 |
| 26 | 0,236 | 446,334 | 119,918 | 508,126 |
| 28 | 0,249 | 476,239 | 127,952 | 513,865 |
| 30 | 0,262 | 506,145 | 135,987 | 519,035 |

На рис. 3–6 представлено поведение маховика, оцениваемое тем, как удельная энергия, накопленная маховиком, зависит от параметров, выбранных для анализа.

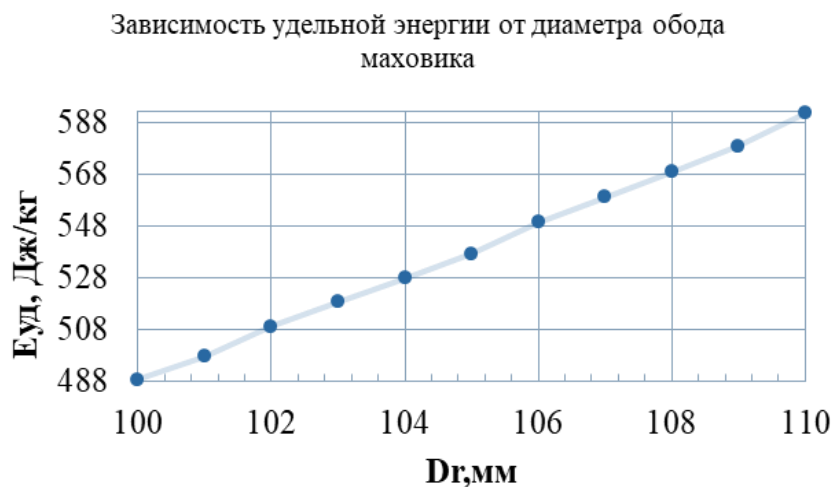


Рис. 3. Зависимость удельной энергии от диаметра обода маховика

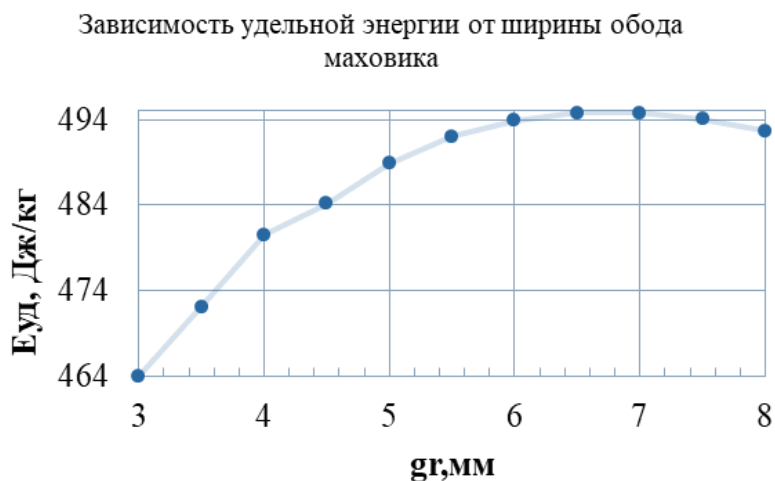


Рис. 4. Зависимость удельной энергии от ширины обода маховика

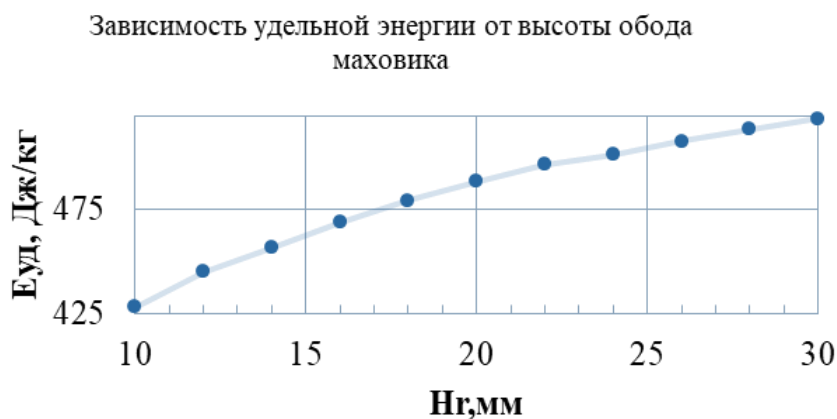


Рис. 5. Зависимость удельной энергии от высоты обода маховика

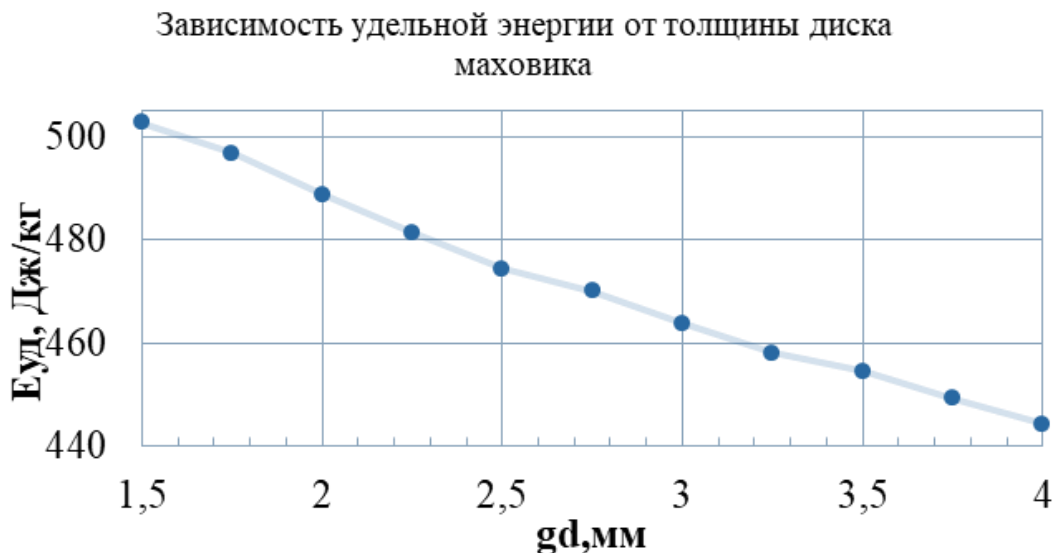


Рис. 6. Зависимость удельной энергии от толщины диска маховика

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из табл. 1 и рис. 3 видно, что при увеличении диаметра обода маховика (D_r) от 100 мм до 110 мм (10 %), удельная энергия (ЕУД), накопленная маховиком увеличивается с 488,846 Дж/кг до 591,621 Дж/кг (21,02 %).

Из табл. 1 и рис. 4 видно, что при увеличении ширины обода маховика (g_r) от 3 до 8 мм (166,67 %), удельная энергия (ЕУД), накопленная маховиком увеличивается с 464,024 Дж/кг до 492,689 Дж/кг (6,18 %).

Из табл. 1 и рис. 5 видно, что при увеличении высоты обода маховика (H_r) от 10 до 30 мм (200 %), удельная энергия (ЕУД), накопленная маховиком увеличивается с 428,002 Дж/кг до 519,035 Дж/кг (6,18 %).

Из табл. 1 и рис. 6 видно, что при увеличении толщины диска маховика (g_d) от 1,5 мм до 4 мм (166,67 %), удельная энергия (ЕУД), накопленная маховиком уменьшается с 502,682 Дж/кг до 444,42 Дж/кг (–11,59 %).

Таким образом, наибольшее воздействие на увеличение удельной энергии маховика вносит диаметр обода маховика, а наименьшее, а точнее уменьшение удельной энергии – толщина диска.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что в России маховики ещё не достигли своего пика, виден большой шаг в развитии этих устройств. Уже сегодня кинетические системы накопления энергии, могут успешно заменить весьма распространенные химические накопители, имея достаточно многочисленные преимущества. Также события последних лет в данной области позволяют применять более прочные материалы, усовершенствованную силовую электронику и системы подшипников. А существующие программные пакеты позволяют создать большое количество конфигураций маховика путем изменения некоторых параметров, которые имеют значительное влияние на его поведение. Из анализа созданных конфигураций, пришли к выводу, что наибольшее влияние на удельную энергию, накопленную маховиком, имеет диаметр маховика, затем следуют ширина обода и высота обода, а при увеличении толщины диска удельная энергия уменьшается.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента № МК-5446.2018.8.
 Научный руководитель Бубенчиков Антон Анатольевич.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худяков В. В. Возобновляемые источники энергии // Электричество. 2011. № 10. С. 35–40.
2. Диски высокой энергии: маховичный накопитель // Популярная механика. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/8424-diski-vysokoy-energii-makhovichnyy-nakopitel/#part2> (дата обращения: 25.01.2019).

3. Гулия Н. В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980. 152 с.
4. Кинетические накопители энергии для электроэнергетики // Школа для электрика. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/1887-kineticheskie-nakopiteli-jenergii-dlja.html> (дата обращения: 25.01.2019).
5. Соколов В. С., Красных О. В., Косторной Г. В. Использование маховиков на транспорте // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2009. № 4 (12). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-mahovikov-na-transporte> (дата обращения: 25.01.2019).
6. Характеристики и сферы применения маховичных накопителей энергии // Умей вертеться. URL: <http://www.energovector.com/energoznanie-umey-vertetsya.html> (дата обращения: 25.01.2019).
7. Диски высокой энергии: маховичный накопитель // Умей вертеться. URL: <http://magspace.ru/blog/185231.html> (дата обращения: 25.01.2019).
8. Маховики для маховичного накопителя // Маховичный накопитель. URL: <http://sersalaev.narod.ru/index.files/flyweel4.htm> (дата обращения: 25.01.2019).
9. Пат. 132850 Российская Федерация, МПК F 16 F 15/315. Накопитель энергии на основе маховика с вертикальной осью вращения / Гулия Н. В., Лаврентьев А. И., Юрков С. А., № 2013123661/11; заявл. 23.05.2013; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27.
10. Проведены испытания накопителя кинетической энергии для подъемно-транспортного оборудования // Кинемак. URL: <http://www.kinemak.ru/?p=190> (дата обращения: 25.01.2019).
11. Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоемкости // Наука и техника. URL: <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm> (дата обращения: 25.01.2019).
12. Кинетические накопители энергии для электроэнергетики // Управление и автоматизация. URL: <https://vk.com/@controlsys-kineticheskie-nakopiteli-energii-dlya-elektroenergetiki> (дата обращения: 25.01.2019).
13. Разработка электромеханического накопителя энергии для систем бесперебойного электропитания. URL: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/49131/1/TPU570245.pdf> (дата обращения: 25.01.2019).
14. Начато производство гибридного привода с маховиком «Gyrodrive»// icarbio. URL: <http://icarbio.ru/news/2014/november/gyrodrive.html> (дата обращения: 25.01.2019).
15. Başaran S., Sivrioğlu S. Adaptive control of a novel hybrid magnetic bearing flywheel system for use in momentum exchange devices // IEEE. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2013. P. 55–60. DOI: 10.1109/RAST.2013.6581272.
16. Характеристики и сферы применения маховичных накопителей энергии // Перспективные технологии. URL: <http://www.energovector.com/files/ev02-2017.pdf> (дата обращения: 25.01.2019).
17. Попов А. Ю., Госина К. К., Петров И. В., Макарова А. Е., Балова Д. Г., Пепеляев А. В. Классификация, состав, достоинства и недостатки многокомпонентных композитных материалов // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 42–46.
18. Рогов В. А., Шкарупа М. И., Велис А. К. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 2. 41–49.
19. Сеницын В. Ф., Джафаров М. Н., Оганисян М. А. Имитационная модель машины для сводки древостоя // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 11. С. 162–166.
20. Сохранение энергии при помощи маховика // Ресурсосбережение и энергоэффективность на строительном форуме. URL: <http://building-forum.ru/energoberezhenie/mahovik.php> (дата обращения: 25.01.2019).

УДК 62-83:681.532.55

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБОБЩЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

А. В. Бубнов, А. Н. Четверик, А. Н. Чудинов
 Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. В статье приведена разработанная обобщенная компьютерная модель электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости. Модель разработана с использованием модели импульсного частотно-фазового дискриминатора с дополнительными функциональными возможностями. Это позволяет исследовать наиболее эффективные, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования, способы управления данным электроприводом. Приведена классифика-