

## Кинематический накопитель энергии для децентрализованной энергетики

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

При освоении децентрализованных источников возобновляемой энергии возникают проблемы включения их в общую сеть, что связано с неравномерностью выдачи ими электрической мощности. В качестве дополнительного источника мощности для ветростанции в статье рассмотрен кинематический накопитель энергии (КНЭ), а в качестве двигателя-генератора КНЭ предложена высокоскоростная трехфазная синхронная машина с постоянными магнитами и выходным электронным блоком, позволяющим накопителю работать при переменной частоте вращения. Параметры кинематического накопителя энергии с моментом инерции 100 кгм<sup>2</sup> при использовании различных материалов (стали, алюминия, титана и композитного материала высокой прочности) рассчитаны при различных значениях соотношения диаметра маховика и его высоты. Показано, что накопитель с маховиком из композитного материала массой 624 кг в течение 8 ч может реализовать мощность 5 кВт в диапазоне частот вращения 18000–6000 мин<sup>-1</sup>. Для такого КНЭ предлагается синхронный трехфазный двигатель-генератор с постоянными магнитами.

**Ключевые слова:** децентрализованная энергетика, накопитель энергии, материалы высокой прочности, постоянные магниты, синхронная машина

Накопители энергии предназначены для решения различных задач хранения и преобразования энергии: выравнивание графиков нагрузки в сети, питание потребителей с нестандартными параметрами, сглаживание колебаний мощности и стабилизации работы малоинерционных систем распределенной генерации, реализация оптимальных режимов работы оборудования, обеспечение бесперебойного питания особо важных объектов.

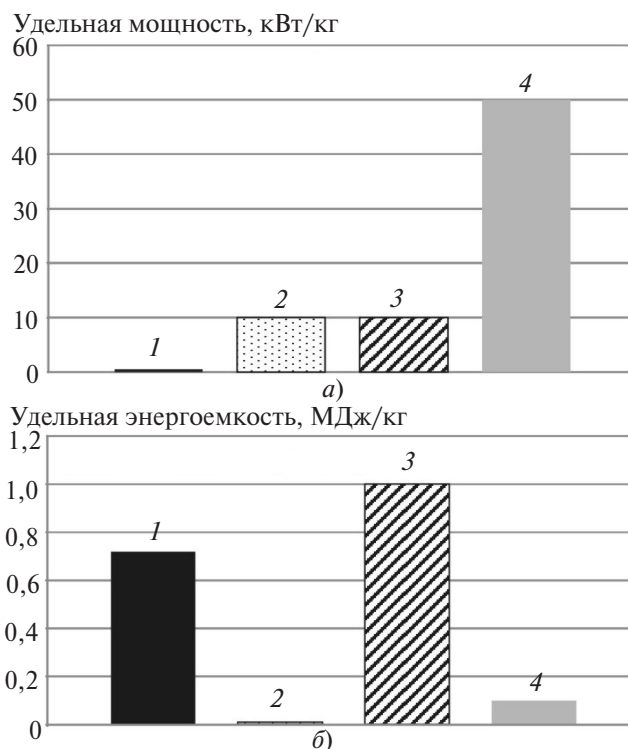
Обзор отечественных и зарубежных разработок перспективных систем, предназначенных для накопления, хранения и отдачи электроэнергии, приведен в [1–6]. Сравнение основных параметров, областей применения и анализ примеров практического использования разработанных к настоящему времени различных накопителей энергии как электрохимических, так и физических позволили авторам сделать вывод, что наиболее перспективным типом накопителя энергии для маломасштабных систем накопления энергии являются кинематические накопители энергии (КНЭ).

Удельная запасаемая энергия КНЭ находится в диапазоне от 0,06 до 1,8 МДж/кг, а удельная мощность составляет 500–10000 Вт/кг. На рис. 1 представлены наибольшие значения достигнутых удельных характеристик различных накопителей энергии. По удельной мощности КНЭ несколько уступают только сверхпроводниковым индукционным накопителям (СПИН), по удельной энергоемкости превосходят все сравниваемые накопители.

Дополнительными достоинствами КНЭ являются компактность, экологическая чистота, высокий

КПД, малоинерционность, повышенный ресурс работы, простота эксплуатации и обслуживания.

Наиболее интересные КНЭ, разработанные в различных странах, в том числе и в России, представлены в табл. 1.



**Рис. 1.** Сопоставление накопителей энергии по удельным характеристикам: а — удельная мощность, кВт/кг; б — удельная энергоемкость, МДж/кг: 1 — аккумуляторы; 2 — суперконденсаторы; 3 — КНЭ; 4 — СПИН

Таблица 1

Фирма, страна	Электрическая мощность, кВт	Запасаемая энергия, МДж/	Масса, кг	Диаметр, м	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
Boeing, США [1]	3,0; 100,0	36,0; 18,0	- -	- -	- -
POWERTHRU, США [1]	190,0	1,9	-	-	53000; 30000
Beacon Power, США [2]	2,0*; 100*	21,6; 90	800; 1134	0,68	22500; 16000; 8000
Urenco Power Technologies Ltd, США [2,6]	2,1*; 250,0; 100	9,0; 7,2; 18,0	110; 1600	0,9	37800/27000; 42000
AFS-Trinity system, США [6]	200,0	7,2	540	-	40000
ATZ, Германия [1]	250,0	20,0		1,5	
Chubu Electric Power Company, Mitsubishi Heavy Industries, Япония [1]	300	360	4000	2,0	6000
НИИЭМ, Россия [1]	10,0; 100,0	0,5; 5,0	100; 100	- -	4000-6000; 5000-8000
Русский сверхпроводник, Россия [7]	22,0	4,0	1070	-	2930
ИЭЭ РАН, Россия [2]	500	-	66	0,23	15000

\* Модуль для кластера.

Конструкция КНЭ включает в себя следующие обязательные элементы: герметичный корпус, маховик, мотор-генератор, магнитный подвес, ВТСП-подшипники (как правило) и система безопасности для защиты в случае разрушения маховика. На рис. 2 показан один из вариантов конструктивного исполнения КНЭ.

Основной элемент конструкции – маховик – в результате прогресса претерпел существенные изменения и превратился в супермаховик [8]. Для увеличения запасаемой кинетической энергии маховика применяют высокопрочные материалы и выбирают его форму в виде диска равной прочности. Поскольку плотность энергии прямо пропор-

циональна отношению прочности к плотности материала, тяжелые и плотные материалы менее выгодны для маховиков, чем легкие и прочные. Прогресс в материаловедении привел к созданию материалов (волокна из стекла, кварца, бора, графита и т.д.) с прочностью в десятки раз выше, чем прочность стали. Маховик из упрочненного кварца в виде равнопрочного диска может иметь плотность энергии 5,0 МДж/кг – в 150 раз больше, чем стальной маховик [8]. В [8] предложено изготавливать маховики из ленты или проволоки. После технологического процесса холодной прокатки или волочения благодаря внутренней структуре прочность ленты или проволоки в несколько раз превышает прочность исходного материала.

По данным испытаний плотность энергии такого маховика почти в 6 раз выше, чем у монолитного, но главное преимущество маховика из ленты – его безопасность при разрыве. При вращении в направлении навивки в аварийном случае первым отрывается внешний виток, а отслоившийся конец ленты прижимается центробежной силой к внутренней поверхности кожуха и автоматически тормозит маховик. Безопасный разрыв характерен для всех маховиков, изготавливаемых из слоисто-волокнистых композиционных материалов высокой прочности, поскольку опасных осколков при разрыве маховика не образуется. Среди созданных различных конструкций стержневых маховиков (щеточных, брусковых, псевдодисковых) варианты ободковых супермаховиков обладают большими возможностями по компактности и аэродинамике. Для повышения КПД супермаховика применяются меры для снижения потерь, в первую очередь – помещение маховика в вакуум и его магнитный подвес.

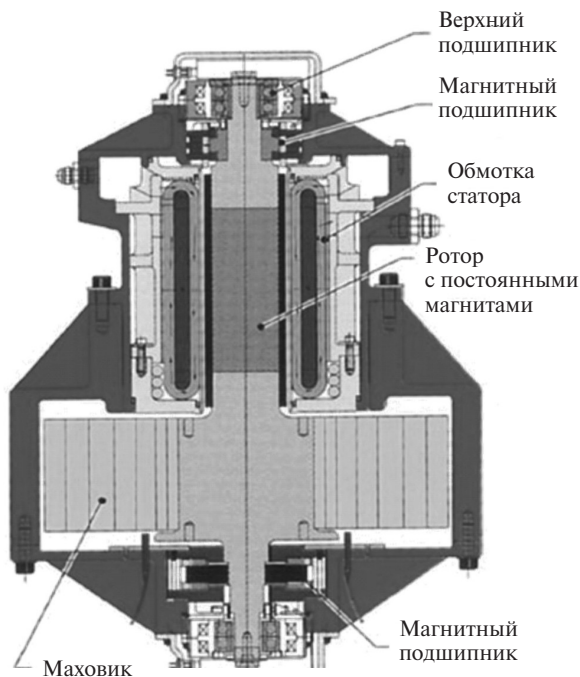


Рис. 2. Конструктивное исполнение КНЭ

Мотор-генератор должен работать при высокой частоте вращения и иметь максимально широкий диапазон регулирования частоты вращения при постоянной мощности (не менее 3). При высокой частоте вращения следует обеспечить прочность ротора и избегать вращающихся контактов.

В качестве мотор-генератора для КНЭ применяются асинхронные, вентильно-индукторные и синхронные машины. Преимущества синхронных машин: возможность контроля в широком диапазоне работы при максимальной постоянной мощности; возможность эффективной оптимизации выработки энергии за счет минимизация как джоулевых, так и магнитных потерь; легкая интегрируемость в накопительное устройство.

При освоении децентрализованных источников возобновляемой энергетики возникают проблемы подключения их в общую сеть, связанные с неравномерностью выдачи ими электрической мощности. Выходная мощность ветроустановок в связи с изменением силы ветра изменяется от 0 до 80%, кроме того, они работают всего от 1000 до 2500 ч в год.

При производстве электроэнергии в распределенной генерации накопление энергии играет ключевую роль в балансировании потребления и генерации. Увеличение числа малых и средних генерирующих установок приведет к снижению необходимого времени использования систем хранения энергии. Наличие накопителей энергии позволяет снизить требования к диапазону регулирования объекта и облегчат условия подключения.

Вследствие своих характеристик КНЭ могут обеспечить решение вопросов как по улучшению

качества питания и безопасности, преодолению максимальной нагрузки, так и по выравниванию нагрузки в цикле. Бесспорные преимущества КНЭ: высокая надежность, простота управления, быстрое реагирование, длительный срок службы, низкая цена, экологичность [5]. Кинематические накопители уже существуют и коммерчески доступны как источники бесперебойного питания (ИБП) с циклом порядка минут; накопители, однако предназначенные для более длительных периодов (до нескольких часов), только теперь начинают появляться на рынке.

Автономные ветроустановки возобновляемой энергетики представляют, как правило, многофункциональный энергетический комплекс, в котором для режимов компенсации недостатка мощности ветроэлектростанции обеспечена совместимость ветрогенераторов с дополнительными источниками мощности (например, дизель-генератором, подзаряжаемой и разряжаемой аккумуляторной батареей, солнечной батареей, установкой по созданию и использованию водорода). В качестве дополнительного источника мощности для ветростанции целесообразно рассмотреть также кинематический накопитель энергии.

Рассмотрим параметры КНЭ для ветростанции мощностью 5 кВт, который должен компенсировать отсутствие ветроэнергии в течение 8 ч. Для непрерывной работы в течение 8 ч КНЭ с мощностью 5 кВт должен израсходовать  $W_{max} = 144$  МДж энергии. Момент инерции накопителя

$$J = \frac{2W_{max}}{\omega_n^2 - k_{\omega} \omega_n^2}$$

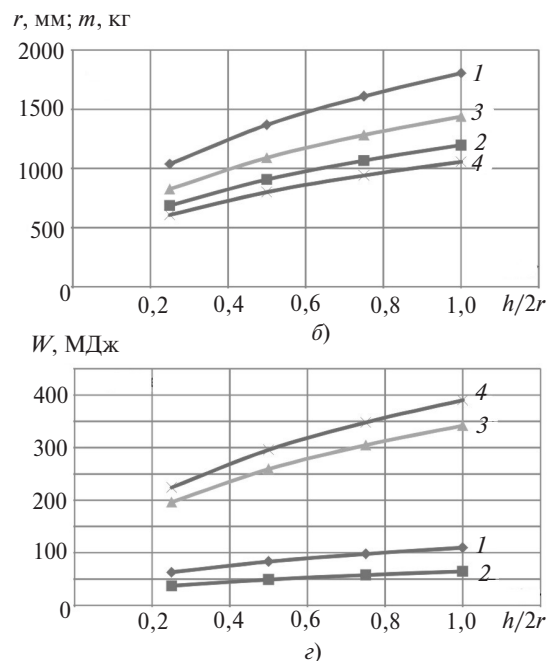
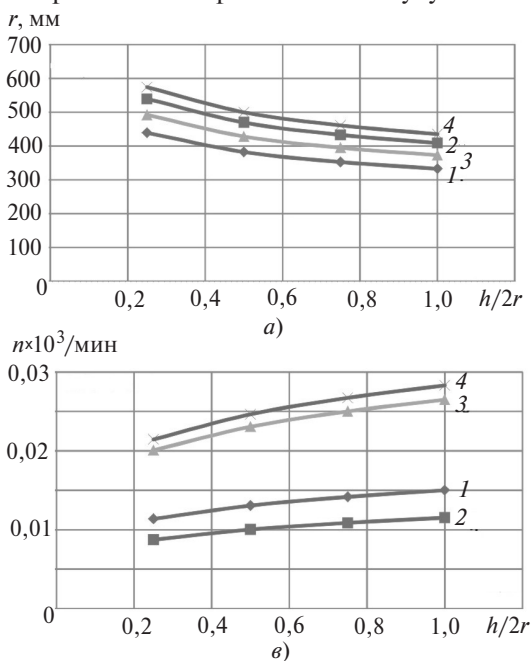


Рис. 3. Параметры кинематического накопителя энергии с моментом инерции 100 кг·м<sup>2</sup>: а – радиус диска; б – масса; в – частота вращения; г – энергия при использовании различных материалов: 1 – сталь; 2 – алюминий; 3 – титан; 4 – композит

однозначно определяется по номинальной частоте вращения двигателя-генератора  $\omega_n$  и допустимому уровню ее снижения  $k_\omega$ .

Выбор размеров маховика и номинальной частоты вращения двигателя зависит от материала маховика — плотности материала  $\rho$  и допустимого уровня механических напряжений  $\sigma_{\text{доп}}$ . Параметры кинематического накопителя энергии с моментом инерции  $100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  при использовании различных материалов рассчитаны при разном соотношении диаметра маховика и его высоты и представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Анализ полученных данных показывает, что стальные и алюминиевые маховики поставленную задачу решить не могут. Стальной маховик при равенстве высоты и диаметра способен реализовывать в течение 8 ч мощность 3,8 кВт в диапазоне скоростей  $15000\text{--}5000 \text{ мин}^{-1}$ , маховик из композитного материала способен реализовать мощность 11,9 кВт в диапазоне скоростей  $26500\text{--}8800 \text{ мин}^{-1}$ .

Для КНЭ с маховиком из композитного материала с диаметром 0,92 м, длиной 0,46 м и массой 624 кг мощность 5,0 кВт в течение 8 ч может быть реализована в диапазоне частоты вращения от 18000 до 6000  $\text{мин}^{-1}$ . Для такого КНЭ предлагается синхронный трехфазный двигатель-генератор с постоянными магнитами СДГПМ-5,0-18000 (5,0 кВт, 400 В, 8,0 А,  $18000 \text{ мин}^{-1}$ ), который характеризуется следующими параметрами:

Внутренний диаметр $D_{1i}$	54,0 мм
Внешний диаметр $D_{1o}$	100,0 мм

Воздушный зазор $\delta$	3,0 мм
Число пазов	24
Число последовательных витков в фазе $w$	40
Длина магнита $l_m$	130,0 мм
Ширина магнита $b_{\text{мсп}}$	27,3 мм
Высота магнита $h_m$	3,0 мм
Остаточная индукция магнита $B_r$ , Тл	1,38
Коэрцитивная сила $H_c$ , кА/м	955,0
Индукция в зазоре $B_\delta$ , Тл	0,518
Линейная нагрузка $A_1$ , А/см	114,0
Плотность тока в обмотке $j_a$ , А/мм <sup>2</sup>	3,27

Двигатель-генератор следует выполнять четырехполюсным, для магнитопровода статора использовать аморфный сплав ГМ-440. В этом случае общие потери электрической машины не превысят 50 Вт и могут быть устранены путем конвекции и теплоизлучения с уровнем теплового потока  $0,12 \text{ Вт/см}^2$ .

На ветростанциях агрегаты с синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов имеют выходной электронный блок, позволяющий ветротурбине работать при переменной частоте вращения. Такой же блок (рис. 4) требуется и для КНЭ при работе генератора в диапазоне заданных частот вращения.

Схема со звеном постоянного тока включает выпрямление переменного напряжения генератора и преобразование постоянного напряжения в выходное трехфазное напряжение переменного тока заданного значения и частоты. Конденсатор сгла-

Таблица 2

Параметры кинематического накопителя энергии с моментом инерции  $100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ 

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{\text{доп}}$ , МПа	$h/2r$	$r$ , мм	$m$ , кг	$V$ , м/с	$\omega$ , рад/с	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$W$ , МДж	$P$ , кВт
Сталь	7800	880	0,25	439	1037	523	1191	11373	63	2,19
			0,5	382	1369	523	1368	13065	83	2,89
			0,75	352	1610	523	1484	14168	98	3,40
			1,00	333	1806	523	1572	15007	110	3,81
Титан	4420	1950	0,25	492	826	1034	2102	20076	196	6,82
			0,5	428	1091	1034	2415	23061	259	9,00
			0,75	395	1283	1034	2619	25009	305	10,58
			1,00	373	1439	1034	2774	26490	342	11,88
Алюминий	2790	280	0,25	539	688	493	915	8733	37	1,29
			0,5	470	907	493	1051	10032	49	1,70
			0,75	433	1067	493	1139	10879	58	2,00
			1,00	409	1197	493	1207	11524	65	2,25
Композит (высокой прочности)	2040	1400	0,25	574	607	1290	2246	21451	224	7,79
			0,5	500	800	1290	2580	24641	296	10,28
			0,75	461	941	1290	2798	26722	348	12,08
			1,00	435	1056	1290	2964	28305	390	13,56

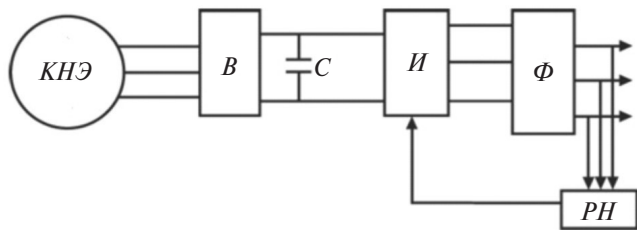


Рис. 4. Схема КНЭ на базе синхронного генератора с постоянными магнитами: В – выпрямитель; С – блок конденсаторов; И – выходной инвертор; Ф – выходной фильтр; РН – регулятор напряжения

живает пульсацию тока инвертора, а выходной фильтр обеспечивает высокое качество выходного напряжения.

Синхронный генератор работает на выбеге, и при постоянной нагрузке генератора кривая выбега представляет собой параболу, представленную на рис. 5:

$$n^2 = -\frac{2P_l}{C}t + n_n^2,$$

где  $n_n$ ,  $n$  – номинальная и текущая частота вращения;  $P_l$  – нагрузка генератора, включая потери агрегата;  $C = J/91,2$  – постоянная самоторможения;  $J$  – момент инерции КНЭ.

Таким образом, кинематический накопитель энергии принципиально может быть использован в автономных ветроустановках возобновляемой энергетики в качестве дополнительного источника энергии для бесперебойного снабжения потребителей. В качестве двигатель-генератора КНЭ целесо-

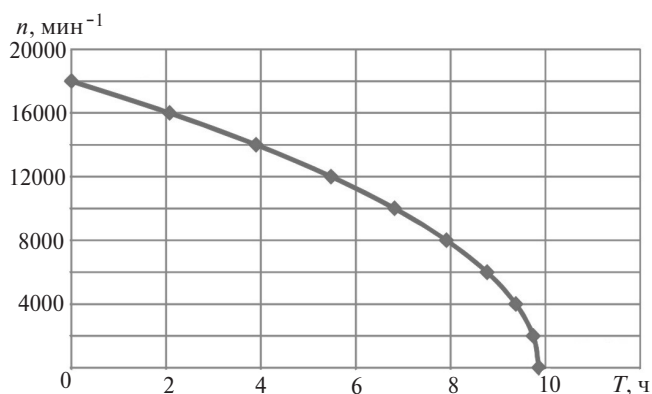


Рис. 5. Изменение частоты вращения КНЭ при нагрузке 5,0 кВт

образно применять высокоскоростную трехфазную синхронную машину с постоянными магнитами и выходным электронным блоком, позволяющим КНЭ работать при переменной частоте вращения. Оценка технико-экономических показателей КНЭ автономных ветроустановок возможна для конкретного применения, когда определены необходимые мощность и время работы накопителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанцев С.Г. Кинетические накопители: мировые тренды и отечественные разработки с применением ВТСП-лент второго поколения. — Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2016, т. 155, с. 3–21.
2. Желокова М.З., Максимова И.Ф. Маховичные агрегаты и тенденции их современного использования. — Известия РАН. Энергетика, 2013, № 3, с. 84–95.
3. Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике. — Электро, 2005, № 1, с. 42–46.
4. Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике. — Электро, 2005, № 2, с. 48–52.
5. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях. — Ползуновский вестник, 2013, № 4–2, с. 176–180.
6. Bernard N., Ahmed H.B., Multon B., Kerzreho C., Delamare J., Faure F. Flywheel energy storage systems in hybrid and distributed electricity generation. — PCIM 2003, May 2003, Nurnberg, Germany, 2003, 9 p.
7. Гулиа Н.В., Кацай А.В. Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоёмкости 2012 [Электрон. ресурс] <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm>. (дата обращения 20.03.2019).
8. Гулиа Н.В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980, 150 с.
9. Манн Э.Г., Тиунчик В.М. Кольцевые электромеханические инерционные аккумуляторы. — Электричество, 1986, № 4, с. 19–24.
10. Герасимов А., Толмачев В., Уткин К. Дизель-генераторные электростанции. Работа при переменной частоте вращения дизеля. — Новости Электротехники, 2005, № 3(33), с. 1–9.

[24.04.2019]

А в т о р ы: Антипов Виктор Николаевич – доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН – ИХС РАН, диссертацию защитил в 1989 г.

Грозов Андрей Дмитриевич – научный сотрудник ИХС РАН.

Иванова Анна Владимировна – кандидат техн. наук, старший научный сотрудник ИХС РАН, диссертацию защитила в 1989 г.

## A Kinematic Energy Storage for Decentralized Energy Generation

ANTIPOV Victor N. (Institute of Silicate Chemistry named I.V. Gryebenshchikov of Russia Academy of Sciences (ISCh RAS), St. Petersburg, Russia) – Leading Scientist, Dr. Sci. Eng.

GROZOV Andrey D. (ISCh RAS, St. Petersburg, Russia) – Research Worker

IVANOVA Anna V. (ISCh RAS, St. Petersburg, Russia) – Senior Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

*In mastering the use of decentralized renewable energy sources, problems of connecting them to the common grid are encountered, including those stemming from the nonuniform power output produced by them. The use of a kinematic energy storage (KES) as an additional source of power for a wind farm is considered. In addition, a high-speed three-phase permanent-magnet synchronous machine equipped with an output electronic module, with which the energy storage can operate with a variable rotation frequency, is proposed to be used as the KES motor-generator unit. The parameters of a KES with the inertia moment equal to 100 kg·m<sup>2</sup> made using different materials (steel, aluminum, titanium, and high-strength composite material) have been calculated for different flywheel diameter-to-height ratios. It is shown that the energy storage equipped with a 624-kg flywheel made of composite material can produce the power output equal to 5 kW for 8 h in the rotation frequency range 18000–6000 min<sup>-1</sup>. A three-phase permanent-magnet motor-generator is proposed for such KES.*

**Key words:** *decentralized energy generation, energy storage, high-strength materials, permanent magnets, synchronous machine*

#### REFERENCES

1. Kazantsev S.G. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM – in Russ. (Questions of Electromechanics. Proc. of VNIIEM)*, 2016, vol. 155, pp. 3–21.
2. Zhelokova M.Z., Maksimova I.F. *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2013, No. 3, pp. 84–95.
3. Alekseyev B.A. *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2005, No. 1, pp. 42–46.
4. Alekseyev B.A. *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2005, No. 2, pp. 48–52.
5. Smolentsev N.I. *Polzunovskii Vestnik – in Russ. (Polzunovsky Bulletin)*, 2013, No. 4-2, pp. 176–180.
6. Bernard N., Ahmed H.B., Multon B., Kerzreho C., Delamare J., Faure F. Flywheel energy storage systems in hybrid and distributed electricity generation. — PCIM 2003, May 2003, NURNBERG, Germany, 2003, 9 p.
7. Gulia N.V., Katsai A.V. *Tsiklicheskiye ispytaniya nakopitelya kineticheskoi energii...* (Cyclic Tests of Sfore of Kinetic Energy...) [Electron. Resource] <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm> (Date of appeal 20.03.2019).
8. Gulia N.V. *Nakopiteli energii (Stores of Energy)*. Moscow, Nauka, 1980, 150 p.
9. Mann E.G., Tiunchik V.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1986, No. 4, pp. 19–24.
10. Gerasimov A., Tolmachev V., Utkin K. *Novosti Elektrotekhniki – in Russ. (News of the Electrical Engineering)*, 2005, No. 3(33), pp. 1–9.

[24.04.2019]