

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

к.ф.-м.н. **Зуев С.М.**<sup>1</sup>, к.т.н. **Малеев Р.А.**<sup>1</sup>, **Шматков Ю.М.**<sup>1</sup>, **Ханджалов М.Ю.**<sup>1</sup>, к.т.н. **Яхутль Д.Р.**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГУП НИИАЭ, Москва, Россия

eoep@mospolytech.ru

*В данной статье проведен сравнительный анализ различных накопителей энергии. Проведен подробный обзор и анализ молекулярных накопителей энергии, определены их основные характеристики и параметры, а также области применения.*

*Определены основные типы молекулярных накопителей энергии: конденсаторы с двойным электрическим слоем, псевдоконденсаторы, гибридные конденсаторы. Приведено сравнение характеристик различных элементов питания. Представлены параметры различных накопителей энергии. Проведен анализ молекулярных накопителей энергии и аккумуляторов, выявлены их преимущества и недостатки.*

*Показано, что молекулярные накопители энергии или электрохимические конденсаторы с двойным слоем являются идеальными системами накопления энергии вследствие высокой удельной энергии, быстрой зарядки и большого срока службы по сравнению с обычными конденсаторами. В статье представлены осциллограммы литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при импульсном токе нагрузки 2А ноутбука при включении молекулярного накопителя энергии и без него, а также осциллограммы литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при параллельном выключении молекулярного накопителя энергии емкостью 7 Ф и без него для ноутбука с DVD. Приведенный сравнительный анализ показывает, что при включении выключением молекулярного накопителя энергии емкостью 7 Ф значительно улучшаются переходные процессы и не происходит провалов напряжения питания. Приведены зависимости времени работы литий-ионного аккумулятора 3,6 В 600 мАч при нагрузке 2 А для питания устройств мобильной сотовой связи при включении молекулярного накопителя энергии и без него. Показано, что при включении молекулярного накопителя энергии время работы аккумулятора увеличивается почти на 20%.*

**Ключевые слова:** накопитель энергии, конденсатор, молекулярные накопители энергии, электрохимический конденсатор, псевдоконденсатор, режим заряда, электроника, гибридные системы накопления энергии.

**Для цитирования:** Зуев С.М., Малеев Р.А., Шматков Ю.М., Ханджалов М.Ю., Яхутль Д.Р. Исследование молекулярных накопителей энергии // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3 (49). С. 49–56. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-49-56

## Введение

Молекулярные накопители энергии в последнее время находят широкое применение в различных отраслях техники, в частности в электронных приборах, в радиопередающих устройствах GPS/GPRS (навигаторы, трекеры, гаджеты), в счетчиках электроэнергии, в источниках бесперебойного питания, в устройствах аварийного освещения, в солнечных электростанциях, в твердотельных жестких дисках, в автомобильных «черных ящиках», в мультимедийных аудиосистемах, в элеваторах и лифтах, в системах запуска двигателей и дизель-генераторов, в ветрогенераторах, в железнодорожном транспорте и метро, а также на электромобилях и гибридных автомобилях [1].

Обычные диэлектрические и электролитические конденсаторы накапливают заряд на параллельных проводящих пластинах с относительно небольшой площадью поверхности и, следовательно, имеют ограниченную емкость. Однако они могут работать при высоких напряжениях. В качестве альтернативы электрохимические конденсаторы (ЭК) (также называемые молекулярными накопителями энергии) накапливают заряд в двойных электрических слоях или на участках восстановления-окисления поверхности (рис. 1) [2].

Молекулярные накопители энергии (МНЭ) представляют собой электрохимические конденсаторы с большими значениями удельной мощности, отличаются лучшими технически-

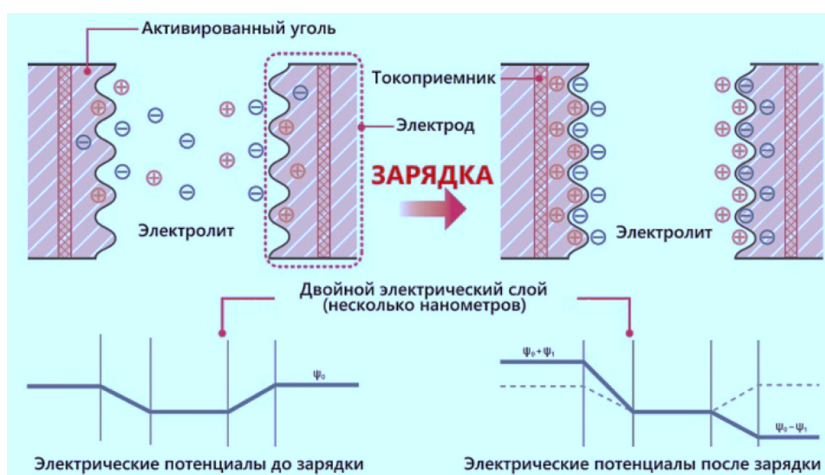


Рис. 1. Принцип действия МНЭ

Fig. 1. The principle of operation of the molecular energy storage

ми характеристиками, чем аккумуляторы, быстрее заряжаются и разряжаются [3].

В последние годы популярность портативных электронных устройств, таких как ноутбуки, мобильные устройства и гаджеты, цифровые фотоаппараты, а также электромобили и гибридные автомобили, привела к необходимости создания экологически чистых систем хранения энергии большой емкости [3]. Поэтому научные исследования были сосредоточены на создании энергоемких источников энергии и конденсаторов большой емкости. МНЭ или электрохимические конденсаторы с двойным слоем являются идеальными системами накопления энергии вследствие высокой удельной энергии, быстрой зарядки и большого срока службы по сравнению с обычными конденсаторами [4].

Принцип работы конденсаторов и МНЭ схожи. Однако системы хранения энергии отличаются друг от друга. В то время как элек-

трические заряды накапливаются на пластине конденсатора, электрические заряды в МНЭ реализуются путем накопления на электроде и сепараторе электролита. Благодаря системе хранения этих энергетических нагрузок МНЭ достигают высоких значений емкости (рис. 2) [4, 5].

МНЭ основаны на разделении электронных и электростатических зарядов между контактными поверхностями между электродом и раствором электролита, который представляет собой проводящую структуру как механизм накопления энергии. Во время процесса зарядки конденсатора электроны передаются от положительного электрода к отрицательному через внешний источник тока. Ионы электролита движутся по электроду. Во время периода разряда электроны перемещаются от отрицательного электрода к положительному.

Целью работы является определение основных параметров и характеристик молеку-

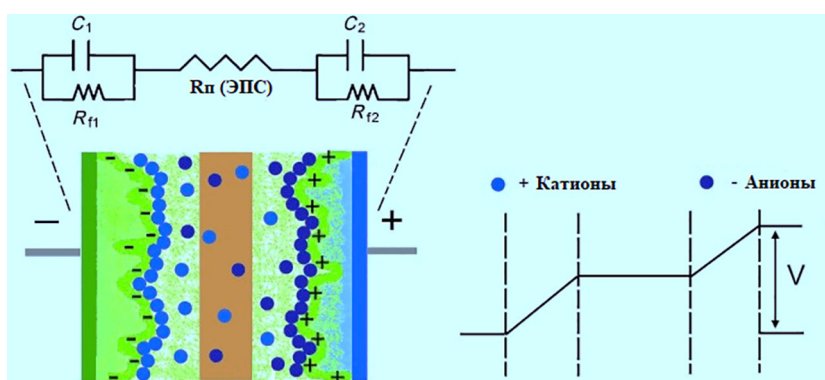


Рис. 2. Внутреннее устройство МНЭ

Fig. 2. The internal structure of the molecular energy storage

лярных накопителей энергии, а также исследование влияния молекулярных накопителей энергии на срок службы аккумуляторных батарей.

### Основная часть

Существующие типы молекулярных накопителей энергии, несмотря на большое их разнообразие, подразделяют на три типа [5] (рис. 3):

1. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (КДЭС).
2. Псевдоконденсаторы.
3. Гибридные конденсаторы.

#### Конденсатор с двойным электрическим слоем (КДЭС)

Конденсаторы с двойным электрическим слоем (КДЭС) представляют собой элементы накопления энергии с высокой удельной энергией по сравнению с обычными конденсаторами и высокой удельной мощностью по сравнению с батареями. В отличие от обычных конденсаторов, в которых не используются химические реакции и сохраняется небольшое количество энергии за счет физического накопления электрических зарядов между двумя проводящими пластинами при приложении электрического поля, эти электрохимические накопители переходят границы в аккумуляторной технологии с использованием специальных электродов и электролита, и имеют значения емкости до 3500 Ф в одном стандартном корпусе с длительным сроком службы (> 100 000 циклов) [6].

#### Псевдоконденсаторы

Псевдоконденсаторы, также называемые фарадеевскими МНЭ, отличаются от КДЭС тем,

что псевдоемкость возникает в результате быстрых и обратимых фарадеевских (окислительно-восстановительных) реакций на поверхности электрода или вблизи нее. Фарадеевские электрохимические процессы включают прохождение заряда через двойной слой, в результате чего ток проходит через ячейку МНЭ.

Такие конденсаторы обладают высокой удельной энергией, но низкой удельной мощностью по сравнению с КДЭС. В качестве материалов для КДЭС как правило применяют псевдоемкостные материалы – оксиды металлов ( $\text{RuO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ) и электропроводящие полимеры (полианилины, полипирролы, политиофены) [7].

#### Гибридные конденсаторы:

Представляют с собой комбинацию аккумулятора и конденсатора в одном корпусе, благодаря чему они имеют высокие значения как удельной энергии, так и мощности [8]. В настоящее время проводятся большие исследования гибридных конденсаторов с различными конструкциями электродов (композитные, асимметричные и аккумуляторные) [8–9].

В гибридных конденсаторах используются углеродные и металлооксидные материалы. Использование активированного угля для электродов при производстве конденсаторов дает возможность изменять диапазон потенциалов. Удельная энергия гибридных конденсаторов больше, чем у конденсаторов с двойным слоем, но меньше, чем у аккумуляторных батарей [9].

Основные характеристики молекулярных накопителей энергии:

– время зарядки/разрядки: от миллисекунд до секунд;

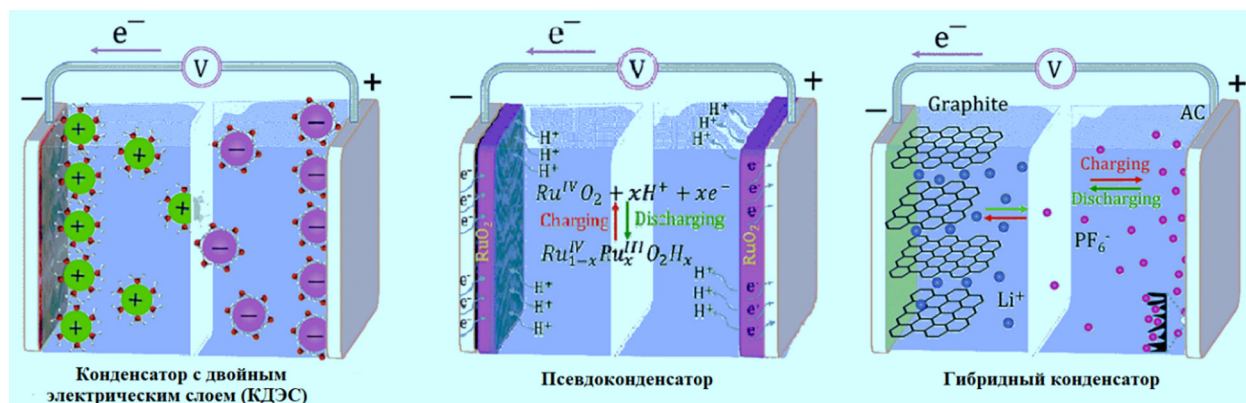


Рис. 3. Основные типы МНЭ

Fig. 3. Types of molecular energy storages

- рабочая температура: от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ ;
- рабочее напряжение: около 1 В (для жидких электролитов) и около 2–3 В (для органических электролитов);
- емкость: от 1 мФ до  $> 10,000$  Ф;
- срок службы: от 5000 до 50 000 часов (в зависимости от температуры и напряжения);
- удельная мощность: от 0,01 до 10 кВт/кг;
- удельная энергия: от 0,05 до 10 Вт·ч/кг;
- импульсная нагрузка: от 0,1 до 100 А.

МНЭ имеют следующие преимущества и недостатки.

Преимущества:

- малое внутреннее сопротивление;
- большой срок службы;
- неограниченное по количеству циклов заряд/разряд;
- относительно малая стоимость;
- широкий диапазон рабочих температур: от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ ;
- быстрый процесс заряда и разряда;
- работа при любом напряжении, что не превышает номинального;
- использование простых способов заряда;
- отсутствие контроля за режимом заряда.

К числу недостатков МНЭ следуют отнести:

- относительно низкую удельную энергию;

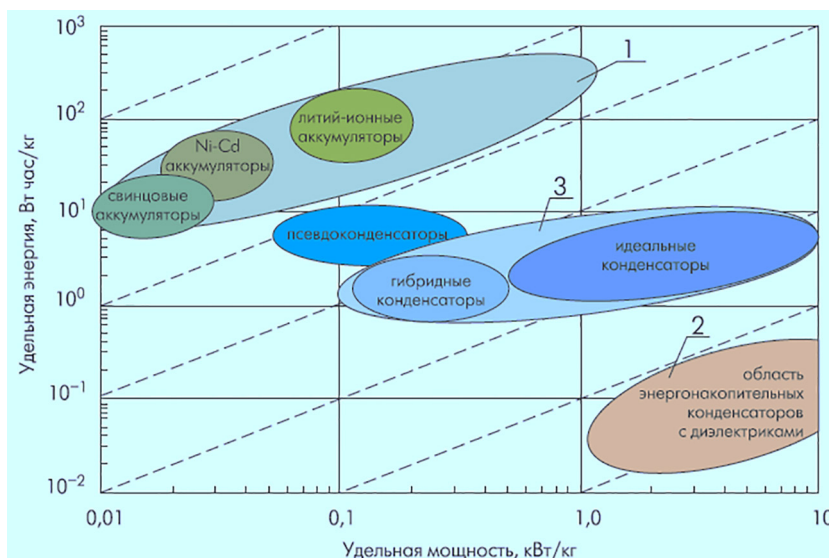
- невозможность обеспечения полного накопления электроэнергии;
- относительно низкое напряжение одного элемента накопителя;
- повышенный саморазряд.

МНЭ представляют собой элементы питания, которые занимают промежуточное положение между химическими источниками тока (аккумуляторами и батарейками) и обыкновенными конденсаторами (рис. 4) [10].

Сравнительный анализ различных накопителей энергии показал, что НЭ (конденсаторы, МНЭ и т.д.) при небольшой удельной энергии обладают высокими показателями по удельной мощности [10]. Аккумуляторы отличаются достаточно большой емкостью, но имеют относительно высокое внутреннее сопротивление, что в значительной степени снижает ток отдачи. При относительно небольшой емкости МНЭ способны отдавать достаточно большие токи нагрузки. Таким образом, МНЭ и аккумулятор идеально дополняют друг друга.

На рис. 5 представлена осциллограмма литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при импульсном токе нагрузки 2 А.

На рис. 6 представлена осциллограмма литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при параллельном выключении МНЭ емкостью 7 Ф.



**Рис. 4. Анализ параметров источников энергии:**

- 1 – область перспективного развития перезаряжаемых химических источников тока (аккумуляторов);
- 2 – область перспективного развития энергонакопительных конденсаторов с диэлектриками;
- 3 – область перспективного развития конденсаторов с двойным электрическим слоем

*Fig. 4. Analysis of the parameters of energy sources: 1 – area of prospective development of rechargeable chemical current sources (batteries); 2 – area of promising development of energy storage capacitors with dielectrics; 3 – area of promising development of capacitors with an electric double layer*



Таблица 1

Параметры различных накопителей энергии

Table 1. Parameters of various energy storage devices

| Тип накопителей энергии | Удельная энергия, Дж/см <sup>3</sup> | Максимальная мощность, Вт          | Удельная мощность, Вт/м <sup>3</sup> |
|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Емкостный               | 0,1–0,5                              | 10 <sup>12</sup> –10 <sup>13</sup> | 10 <sup>11</sup>                     |
| Индуктивный             | 10–40                                | 10 <sup>8</sup> –10 <sup>9</sup>   | 10 <sup>9</sup>                      |
| Механический            | 100                                  | 10 <sup>7</sup> –10 <sup>8</sup>   | 10 <sup>8</sup>                      |
| Химический              | 200–500                              | 10 <sup>6</sup> –10 <sup>7</sup>   | 10 <sup>7</sup>                      |

Таблица 2

Анализ молекулярных накопителей энергии и аккумуляторов

Table 2. Analysis of molecular energy storage and batteries

| Параметр                        | МНЭ                                             | Аккумуляторы                                 |
|---------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Механизм накопления             | Электростатическое накопление заряда            | Химическое взаимодействие                    |
| Удельная емкость, Вт·ч/кг       | 3...5                                           | 20...150                                     |
| Удельная мощность, кВт/кг       | 2...3                                           | 0,05...0,3                                   |
| Время заряда                    | Быстрое 1...30 с                                | 0,3...3 часа                                 |
| Срок службы                     | Более 500,000 циклов заряда-разряда, 10..50 лет | 500...2000 циклов заряда-разряда, 10..50 лет |
| Эффективность заряда-разряда, % | 90...95                                         | 70...85                                      |
| Диапазон рабочих температур, °C | –40...70                                        | –20...70                                     |

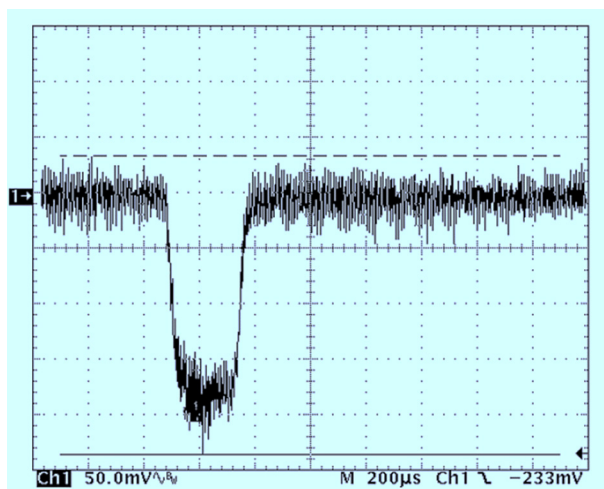


Рис. 5. Осциллограмма литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при импульсном токе нагрузки 2А

Fig. 5. Oscillogram of a lithium-ion battery with a voltage of 10.8 V at a pulsed load current of 2A

Сравнительный анализ осциллограмм показывает, что при включении МНЭ емкостью 7 Ф значительно улучшаются переходные процессы и не происходит провалов напряжения питания.

На рис. 7 представлена осциллограмма литий-ионного аккумулятора с напряжением

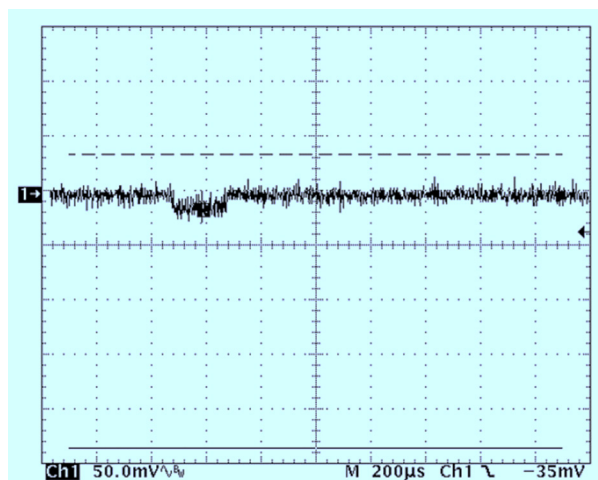


Рис. 6. Осциллограмма литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при параллельном выключении МНЭ емкостью 7 Ф

Fig. 6. Oscillogram of a lithium-ion battery with a voltage of 10.8 V with parallel switching off of the molecular energy storage with a capacity of 7 F

ем 10,8 В при импульсном токе нагрузки 2А для ноутбука с DVD.

На рис. 8 представлена осциллограмма литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при параллельном выключении МНЭ емкостью 7 Ф для ноутбука с DVD

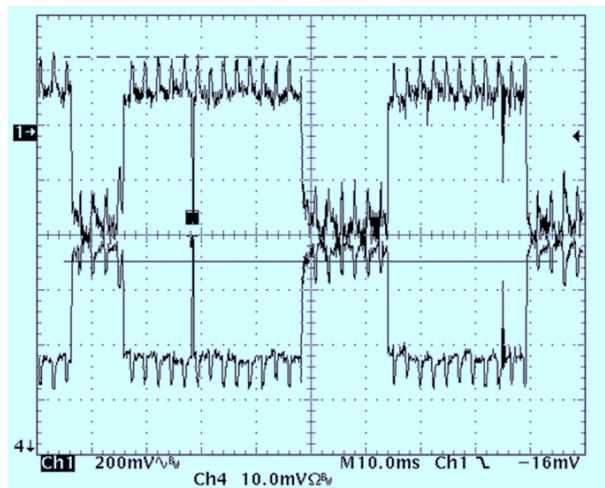


Рис. 7. Осциллограмма литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при импульсном токе нагрузки 2А для ноутбука с DVD

*Fig. 7. Waveform of 10.8V Li-ion battery at 2A impulse load current for laptop with DVD*

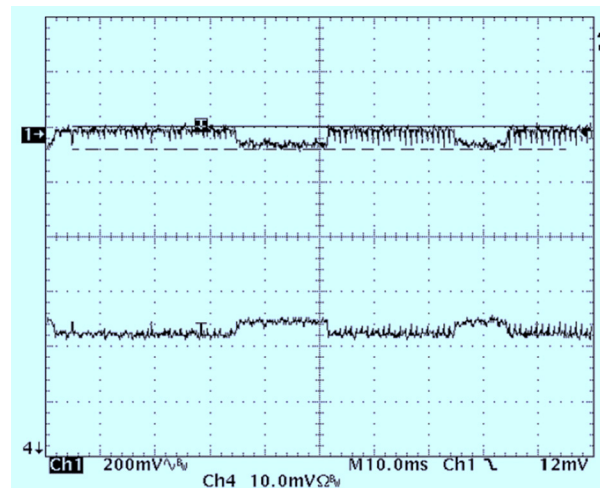


Рис. 8. Осциллограмма литий-ионного аккумулятора с напряжением 10,8 В при параллельном выключении МНЭ емкостью 7 Ф для ноутбука с DVD

*Fig. 8. Oscillogram of a lithium-ion battery with a voltage of 10.8 V with parallel switching off of a 7 F molecular energy storage for a laptop with DVD*

Таким образом, включение МНЭ параллельно аккумулятору позволяет значительно уменьшить пиковую нагрузку, обеспечивая тем самым более всякое качество напряжения питания ноутбука. При этом уменьшается нагрев аккумулятора, повышается его КПД и срок службы.

На рис. 9 приведены зависимости времени работы литий-ионного аккумулятора 3,6 В 600 мАч при нагрузке 2 А для питания устройств мобильной сотовой связи при включении молекулярного накопителя энергии и без него (серая кривая – без МНЭ, черная – с МНЭ).

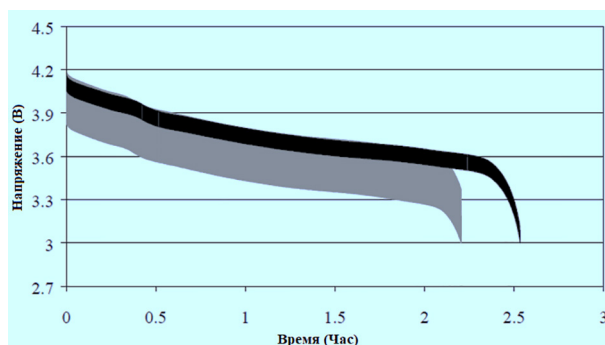


Рис. 9. Времени работы литий-ионного аккумулятора 3,6 В 600 мАч при нагрузке 2 А для питания устройств мобильной сотовой связи при включении молекулярного накопителя энергии и без него

*Fig. 9. Run-time of 3.6V 600mAh Li-ion battery at 2A load to power mobile cellular devices with and without molecular energy storage*

Как видно, включение молекулярного накопителя энергии позволяет увеличить время работы аккумулятора почти на 20 %.

### Заключение

В данной статье был проведен подробный обзор и анализ молекулярных накопителей энергии, определены их основные характеристики и параметры, а также области применения. Проведенный сравнительный анализ различных накопителей энергии показал, что накопители энергии (конденсаторы, МНЭ и т.д.) при небольшой удельной энергии обладают высокими показателями по удельной мощности.

Можно отметить, что аккумуляторы отличаются достаточно большой емкостью, но имеют относительно высокое внутреннее сопротивление, что в значительной степени снижает ток отдачи. МНЭ представляют собой элементы питания, которые занимают промежуточное положение между химическими источниками тока (аккумуляторами и батарейками) и обыкновенными конденсаторами. При относительно небольшой емкости МНЭ способны отдавать достаточно большие токи нагрузки. Таким образом, МНЭ и аккумулятор идеально дополняют друг друга.

Приведенные исследования показывают, что включение МНЭ параллельно аккумулятору значительно снижает пиковую нагрузку на аккумулятор, в результате чего снижается его нагрев, а также повышается КПД и срок службы.

## Литература

1. Maleev R.A., Zuev S.M., Fironov A.M., Volchkov N.A., Skvortsov A.A. The starting processes of a car engine using capacitive energy storages. *Periodico Tche Quimica*, 2019, vol. 16, No 33, p. 877–888.
2. Малеев Р.А., Зуев С.М., Скворцов А.А., Лавриков А.А. Системы электростартерного пуска с высоковольтными источниками тока. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 1. С. 66–71.
3. Grebenchikov N.P., Varlamov D.O., Zuev S.M., Maleev R.A., Skvortsov A.A. and Grebenchikov A.P. Study of Solar Panel Charge Controllers. ISSN 1064-2269, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, Vol. 65, No. 9, pp. 1053–1061.
4. Малеев Р.А., Гулин А.Н., Мычка Н.В., Кузнецова Ю.А. Система электростартерного пуска с различными источниками тока // Известия МГТУ «МАМИ». № 4 (26), 2015. Т. 1. С. 51–55.
5. Малеев Р.А., Гулин А.Н., Мычка Н.В., Капралова М.А. Расчет параметров системы электростартерного пуска двигателя с комбинированным источником тока // МГТУ «МАМИ», 2014, № 3 (21). Т. 1. С. 47–53.
6. Малеев Р.А., Шматков Ю.М. Исследование нестандартных источников тока в системах электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания // МГТУ «МАМИ», 2014, № 1 (19). Т. 1. С. 39–45.
7. Лавриков А.А., Малеев Р.А., Зуев С.М., Шматков Ю.М. Математическое моделирование адаптера для выравнивания напряжений аккумуляторной батареи // МГТУ «МАМИ», 2019, № 3 (41). С. 57–66.
8. Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Н. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство, Компоненты и технологии. 2005. № 6.
9. Малеев Р.А., Зуев С.М., Лавриков А.А., Гребенчиков Н.П. Исследование режимов работы емкостных накопителей энергии в системах пуска автомобильного двигателя // МГТУ «МАМИ», 2019, № 1 (39). С. 29–36.
10. Малеев Р.А., Шматков Ю.М., Холодов А.А. Системы электростартерного пуска с высоковольтными источниками тока // МГТУ МАМИ, 2018, № 1 (35). С. 33–38.

## References

1. Maleev R.A., Zuev S.M., Fironov A.M., Volchkov N.A., Skvortsov A.A. The starting processes of a car engine using capacitive energy storages. *Periodico Tche Quimica*, 2019, vol. 16, No 33, p. 877–888.
2. Maleyev R.A., Zuyev S.M., Skvortsov A.A., Lavrikov A.A. Electric starting systems with high voltage power sources. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*. 2020. No 1, pp. 66–71 (in Russ.).
3. Grebenchikov N.P., Varlamov D.O., Zuev S.M., Maleev R.A., Skvortsov A.A. and Grebenchikov A.P. Study of Solar Panel Charge Controllers. ISSN 1064-2269, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, Vol. 65, No. 9, pp. 1053–1061.
4. Maleyev R.A., Gulin A.N., Mychka N.V., Kuznetsova Yu.A. Electric starting system with various power sources. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. No 4 (26), 2015. V. 1, pp. 51–55 (in Russ.).
5. Maleyev R.A., Gulin A.N., Mychka N.V., Kapralova M.A. Calculation of the parameters of the electric starting system of the engine with a combined power source. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2014, No 3 (21). V. 1, pp. 47–53 (in Russ.).
6. Maleyev R.A., Shmatkov Yu.M. Investigation of unconventional power sources in systems for electric starter start-up of internal combustion engines. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2014, No 1 (19). V. 1, pp. 39–45 (in Russ.).
7. Lavrikov A.A., Maleyev R.A., Zuyev S.M., Shmatkov Yu.M. Mathematical modeling of an adapter for battery voltage equalization. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2019, No 3 (41), pp. 57–66 (in Russ.).
8. Kuznetsov V., Pan'kina O., Machkovskaya N. Electrical double layer capacitors (supercapacitors): development and production. *Komponenty i tekhnologii*. 2005. No 6 (in Russ.).
9. Maleyev R.A., Zuyev S.M., Lavrikov A.A., Grebenchikov N.P. Investigation of operating modes of capacitive energy storage systems in starting systems of a vehicle engine. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2019, No 1 (39), pp. 29–36 (in Russ.).
10. Maleyev R.A., Shmatkov Yu.M., Kholodov A.A. Electric starting systems with high-voltage power sources. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2018, No 1 (35), pp. 33–38 (in Russ.).

## RESEARCH ON MOLECULAR ENERGY STORAGE

PhD in Physics and Mathematics **S.M. Zuyev**<sup>1</sup>, PhD in Engineering **R.A. Maleyev**<sup>1</sup>, **Yu.M. Shmatkov**<sup>1</sup>, **M.Yu. Khandzhalov**<sup>1</sup>,  
PhD in Engineering **D.R. Yakhutl'**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise Scientific Research and Experimental Institute of Road Electronics and Electric Devices, Moscow, Russia  
eope@mospolytech.ru

*This article provides a comparative analysis of various energy storage devices. A detailed review and analysis of molecular energy storage units is carried out, their main characteristics and parameters, as well as their application areas, are determined.*

*The main types of molecular energy storage are determined: electric double layer capacitors, pseudo capacitors, hybrid capacitors. Comparison of the characteristics of various batteries is given. The parameters of various energy storage devices are presented. The analysis of molecular energy storage devices and accumulators is carried out. Their advantages and disadvantages are revealed.*

*It has been shown that molecular energy storage or double layer electrochemical capacitors are ideal energy storage systems due to their high specific energy, fast charging and long life compared to conventional capacitors.*

*The article presents oscillograms of a lithium-ion battery with a voltage of 10,8 V at a pulsed load current of 2A of a laptop with and without a molecular energy storage device, as well as oscillograms of a laptop with DVD lithium-ion battery with a voltage of 10,8 V with a parallel shutdown of a molecular energy storage device with a capacity of 7 F and without it. The comparative analysis shows that when the molecular energy storage unit with a 7 F capacity is switched on and off, transient processes are significantly improved and there are no supply voltage dips. The dependences of the operating time of a 3,6 V 600 mAh lithium-ion battery at a load of 2 A for powering mobile cellular devices with and without a molecular energy storage are given. It is shown that when the molecular energy storage device is switched on, the battery operation time increases by almost 20 %.*

**Keywords:** energy storage, capacitor, molecular energy storage, electrochemical capacitor, pseudo capacitor, charge mode, electronics, hybrid energy storage systems.

**Cite as:** Zuyev S.M., Maleyev R.A., Shmatkov Yu.M., Khandzhalov M.Yu., Yakhutl' D.R. Research on molecular energy storage. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 3 (49), pp. 49–56 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-49-56