ISSN 1727-2769

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 2 (51)
АПРЕЛЬ–ИЮНЬ
2021

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Журнал публикует статьи о новых конкретных результатах законченных оригинальных и особенно имеющих приоритетный характер исследований в области инноваций, а также в области физико-математических и технических наук по группам специальностей (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28.12.2018 № 90-р):

Физико-математические науки

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Технические науки

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

01.04.10 – Физика полупроводников

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов. Для авторов публикация является бесплатной.

Редакция журнала «Доклады АН ВШ РФ» просит авторов при подготовке статей строго соблюдать правила, доступные по адресу http://journals.nstu.ru/doklady/rules. Статьи, оформленные с нарушением правил, отклоняются без рецензирования.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2021 апрель–июнь № 2 (51)

Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)
Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)
А. Загоскин, PhD (Великобритания)
Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)
М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)
К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.
И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.
А.О. Давидов, д-р техн. наук
В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.
С.Л. Елистратов, д-р техн. наук
А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.
В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.
О.В. Нос, д-р техн. наук, проф.
В.П. Разинкин, д-р техн. наук, проф.
В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.
С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.
С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.
В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций в 2021 г. (свидетельство ПИ № ФС 77–81374 от 30.06.2021 г.)

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 346, телефон: (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирский государственный технический университет, 2021 г.

S C I E N T I F I C J O U R N A L

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

2021 | April – June | № 2 (51)

Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)
A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)
V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)
A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.
O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Razinkin, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 346, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2021

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2021 апрель–июнь № 2 (51)

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Попов И.П.
Об электромагнитном излучении отдельных зарядов 7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Калытка В.А., Алиферов А.И., Коровкин М.В., Мехтиев А.Д., Мади П.Ш.
Квантовые свойства диэлектрических потерь в нанометровых слоях твердых диэлектриков при сверхнизких температурах 14

Мейкшан В.И., Тесля Н.Б.
Выбор оптимального размещения данных при использовании облачной инфраструктуры 34

Удовиченко А.В., Токарев В.Г., Гришанов Е.В., Кучак С.В.
Разработка эффективного согласующего устройства аккумуляторной батареи с инвертором напряжения в накопителе электрической энергии 43

Щуров Н.И., Бахолдин П.А., Бахолдин Д.А
Энергетические показатели электромагнитного гасителя колебаний транспортного средства 53

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES

2021 April – June № 2 (51)

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Popov I.P.
On electromagnetic radiation of individual charges.....7

TECHNICAL SCIENCES PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Kalytka V.A., Aliferov A. I., Korovkin M.V., Mehtiyev A.D., Madi P.Sh.
Quantum properties of dielectric losses in nanometer layers of solid dielectrics at ultra-low temperatures 14

Meikshan V.I., Teslya N.B.
Selection of optimal data placement using a cloud infrastructure.....34

Udovichenko A.V., Tokarev V.G., Grishanov E.V., Kuchak S.V
Development of an effective accumulator battery
with a voltage inverter in the electric energy storage unit.....43

Shchurov N.I., Bakholdin P.A., Bakholdin D.A.
Energy parameters of the vehicle electromagnetic shock absorber.....53

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 апрель–июнь № 2 (51)

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 537.531

ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ИЗЛУЧЕНИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ

И.П. Попов
Курганский государственный университет

Цель исследования состоит в установлении условий синхротронного излучения, исходя из существенных отличий между тангенциальным и центростремительным ускорением электрических зарядов. Из того обстоятельства, что электромагнитное излучение уносит энергию, следует, что энергия излучающей системы при излучении изменяется. С этим связано следующее общеизвестное правило: изменение энергии равно совершенной работе. Доказаны три релевантные теоремы. Теорема 1: тангенциально ускоренный электрический заряд излучает электромагнитные волны. Теорема 2: нормально ускоренный электрический заряд не излучает электромагнитные волны. Общеизвестным обстоятельством является то, что центростремительная сила работы не совершает (поскольку скалярное произведение ортогональных векторов необходимо равно нулю). Доказательства теорем 1 и 2 выполнены в терминах сил. Для электрических зарядов переход к терминам ускорений осуществляется в соответствии с теоремой 3: электрический заряд удовлетворяет второму закону Ньютона. Тангенциальное ускорение электрического заряда приводит к излучению электромагнитных волн. Обобщение феномена излучения на ускорение «вообще», в том числе нормальное ускорение заряда, неправомерно. Причину синхротронного излучения следует искать в тангенциальном ускорении, обусловленном кулоновскими взаимодействиями между зарядами пучка.

Ключевые слова: излучение, заряд, тангенциальное ускорение, нормальное ускорение, энергия, работа.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-7-13

Введение

Считается, что электрический заряд, движущийся по круговой траектории, т.е. с центростремительным ускорением, необходимо должен излучать электромагнитные волны. Это распространяется, в том числе на циклотронное излучение.

Цель работы состоит в установлении условий излучения электрического заряда, исходя из существенных отличий между его тангенциальным и центростремительным ускорением.

Актуальность работы определяется широким использованием устройств, генерирующих электромагнитное излучение за счет ускорения электрических зарядов, в том числе рентгеновских установок и магнетронов [1, 2].

1. Методика

Исходным пунктом является достоверное утверждение. С ним выполняется ряд математически корректных преобразований. Следовательно, результат является необходимо достоверным.

Печальный опыт показывает, что для многих специалистов эта логика недоступна. В случае, если такой необходимо достоверный результат противоречит существующей парадигме, предпочтение практически всегда отдается парадигме, невзирая на убедительность доказательств. Это обстоятельство является почти непреодолимым препятствием получения нового знания. Ведь если оно не противоречит парадигме, то оно не новое и ценности никакой не представляет.

© 2021 И.П. Попов

Остается лишь надеяться, что в данном конкретном случае произойдет исключение из правил и необходимо достоверный результат будет признан таковым.

2. Условие излучения заряда

Электромагнитное излучение уносит энергию [3, 4].

Из этого следует, что энергия излучающей системы при излучении изменяется. С этим связано

Правило (общеизвестное). Изменение энергии равно совершенной работе:

$$dE = dA.$$

Работа равна

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}.$$

Теорема 1. Тангенциально ускоренный заряд *излучает* электромагнитные волны.

Доказательство.

Пусть

$$\mathbf{F} = F\frac{\mathbf{s}}{s}.$$

Тогда

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = F\frac{\mathbf{s}}{s}d\mathbf{s} = Fds = dE \neq 0.$$

Теорема доказана.

Теорема 2. Нормально ускоренный заряд *не излучает* электромагнитные волны.

Доказательство.

Пусть

$$\mathbf{F} = F\frac{\mathbf{r}}{r}, \ \mathbf{r} \perp \mathbf{s}.$$

Тогда

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = F\frac{\mathbf{r}}{r}d\mathbf{s} = 0.$$

Теорема доказана.

Теорема 2 формализует общеизвестное в механике обстоятельство, заключающееся в том, что центростремительная сила работы не совершает (поскольку скалярное произведение ортогональных векторов необходимо равно нулю).

3. О динамике заряда

Доказательства теорем 1 и 2 выполнены в терминах сил. Для инертных тел переход к терминам ускорений осуществляется в соответствии со вторым законом Ньютона.

Для электрических зарядов подобный переход возможен с учетом выражения

$$m_e = k\frac{e^2\mu_0}{b}, \tag{1}$$

где m_e – масса электрона, e – его заряд, μ_0 – магнитная постоянная, b – величина, имеющая размерность длины, k – безразмерный коэффициент [5].

Теорема 3. Электрический заряд удовлетворяет второму закону Ньютона.

Доказательство.

Пусть электрон движется в направлении **s** со скоростью $\mathbf{v} = v\mathbf{s}/s$.

Выражение (1), строго говоря, не предполагает какой-то конкретной геометрической формы электрона, при этом оно позволяет временно формально представить его в виде эквивалентной безмассовой заряженной сферы радиуса $k_1 b$. Здесь k_1 – коэффициент пропорциональности, который при дальнейшем рассмотрении определяется однозначно.

Энергия электростатического поля равномерно заряженной сферы радиусом $k_1 b$ и зарядом e определяется выражением

$$W_\varepsilon = \frac{1}{2}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 k_1 b} \tag{2}$$

Поскольку заряженная сфера поступательно движется, имеет место магнитное поле, напряженность которого равна

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0 c^2}[\mathbf{v}, \mathbf{E}],$$

где **E** – напряженность электрического поля. Энергии электрического и магнитного полей соотносятся следующим образом:

$$dW_\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}dV = \frac{E^2}{2c^2\mu_0}dV,$$

$$dW_\mu = \frac{\mu_0 H^2}{2}dV = \frac{\mu_0}{2}\left\{\frac{1}{\mu_0 c^2}[\mathbf{v}, \mathbf{E}]\right\}^2 dV =$$

$$= k_2\frac{E^2 v^2}{2\mu_0 c^4}dV = k_2 dW_\varepsilon \frac{v^2}{c^2},$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, обусловленный пространственной конфигурацией магнитного поля [6].

С учетом (2)

$$W_\mu = k_2 W_\varepsilon \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{2}\frac{k_2 e^2 v^2}{4\pi\varepsilon_0 k_1 b c^2} = k\frac{e^2\mu_0 v^2}{2b}.$$

Соответствующим образом подбирая k_1, можно добиться равенства

$$k = \frac{k_2}{4\pi k_1}.$$

Сила является градиентом энергии:

$$\mathbf{F} = \frac{dW_\mu}{d\mathbf{r}} = k\frac{e^2\mu_0}{2b}\frac{d(v^2)}{d\mathbf{r}} = k\frac{e^2\mu_0}{b}\mathbf{v}\frac{d\mathbf{v}}{d\mathbf{r}} = k\frac{e^2\mu_0}{b}\mathbf{v}\frac{d\mathbf{v}/dt}{d\mathbf{r}/dt} =$$

$$= k\frac{e^2\mu_0}{b}\mathbf{v}\frac{1}{\mathbf{v}}\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = k\frac{e^2\mu_0}{b}\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}.$$

С учетом (1)

$$\mathbf{F} = m_e\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}.$$

Теорема доказана.

Теорема 3 позволяет перейти к терминам ускорений в теоремах 1 и 2.

Выводы

Считается, что циклотронное излучение происходит в результате нормального ускорения зарядов.

Это и есть парадигма, о которой шла речь в методике. Эта парадигма противоречит ***необходимо достоверному*** результату – теореме 2. Следовательно, она (парадигма) недостоверна. В этом нет ничего плохого и даже странного. История науки говорит о том, что ***все*** *научные парадигмы являются недостоверными*.

В свете теорем 1 и 2 причину циклотронного излучения следует искать в тангенциальном ускорении, обусловленном кулоновскими взаимодействиями зарядов пучка [7].

Никто не сомневался, что тангенциальное ускорение электрического заряда приводит к излучению электромагнитных волн [8–10]. Вот только укоренившееся обобщение феномена излучения на ускорение «вообще», в том числе нормальное ускорение заряда, неправомерно.

Парадоксальность ситуации состоит в том, что теоремы 1 и 2 не выглядят сенсационными.

Результаты исследования могут использоваться при построении теоретических моделей явлений и процессов, а также учитываться в технических приложениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микроструктура кольцевых полимерных сферолитов: исследование с помощью микрофокусной рентгеновской дифракции / Д.А. Иванов, В.А. Батаев, А.Ю. Огнев, M. Rosenthal, Д.В. Анохин, В.А. Лучников, R.J. Davies, C. Riekel, M. Burghammer, G. Bar, В.В. Базаркина // Доклады АН ВШ РФ. – 2010. – № 2. – С. 54–65.
2. Рентгеновское излучение высоковольтных элементов ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией / А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 1. – С. 56–62.

3. **Гайслер А.В., Щеглов Д.В.** Полупроводиковый брэгговсий микрорезонатор для излучателей одиночных фотонов // Доклады АН ВШ РФ. – 2014. – № 4. – С. 21–32.
4. Поляризационно-угловая анизотропия нелинейных параметрических резонансов двухфотонного рассеяния на плазменных колебаниях / В.В. Анциферов, В.В. Макаров, Д.И. Свириденко, Г.И. Смирнов // Доклады АН ВШ РФ. – 2005. – № 1. – С. 6–11.
5. **Попов И.П.** Сведение постоянной Планка к классическим фундаментальным константам // Вестник Удмуртского университета. Физика и химия. – 2014. – № 3. – С. 51–54.
6. **Павлов В.Д.** Магнитный поток и его квантование // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2020. – № 4. – С. 25–28. – DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28.
7. **Карпов Г.В., Стюф А.С.** Новая система измерения положения пучка для форинжектора инжекционного комплекса // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 2. – С. 110–117.
8. Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М: состояние и перспективы / А.Н. Алешаев, В.В. Анашин, О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, А.В. Богомягков, Д.Б. Буренков, С.П. Васичев, С.А. Глухов, Ю.М. Глуховченко, О.П. Гордеев, Г.А. Гусев, В.Н. Ерохов, К.В. Золотарёв, В.Н. Жилич, А.И. Жмака, А.Н. Журавлёв, В.В. Каминский, С.Е. Карнаев, Г.В. Карпов, В.А. Киселёв и др. // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 1. – С. 35–46.
9. **Кибис О.В.** Электрон-фотонные состояния в графене // Доклады АН ВШ РФ. – 2011. – № 1. – С. 6–11.
10. Статус электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 / Д.Е. Беркаев, А.А. Борисов, Г.А. Гусев, Ю.М. Жаринов, И.М. Землянский, А.Н. Кирпотин, И.А. Кооп, В.С. Кузьминых, А.П. Лысенко, И.Н. Нестеренко, А.В. Отбоев, О.А. Павлов, Е.А. Переведенцев, Ю.А. Роговский, А.Л. Романов, А.Н. Скринский, П.Ю. Шатунов, Ю.М. Шатунов, Д.Б. Шварц // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 2. – С. 16–25.

ON ELECTROMAGNETIC RADIATION OF INDIVIDUAL CHARGES

Popov I.P.
Kurgan State University, Kurgan, Russia

The aim of the study is to establish the conditions for synchrotron radiation based on significant differences between tangential and centripetal accelerations of electric charges. From the fact that electromagnetic radiation carries away energy, it follows that the energy of the radiating system changes during radiation. Related to this is the following well-known rule: a change in energy is equal to work done. Three relevant theorems are proved. Theorem 1 states that a tangentially accelerated electric charge emits electromagnetic waves. Theorem 2 states that a normally accelerated electric charge does not emit electromagnetic waves. It is a well-known circumstance that the centripetal force does not perform work (since the scalar product of orthogonal vectors must be equal to zero). The proofs of Theorems 1 and 2 are performed in terms of forces. For electric charges, the transition to the terms of accelerations is carried out in accordance with Theorem 3which states that an electric charge satisfies Newton's second law. The tangential acceleration of an electric charge leads to the emission of electromagnetic waves. Generalization of the phenomenon of radiation to acceleration in general, including. normal charge acceleration, is false. The cause of synchrotron radiation should be sought in the tangential acceleration due to Coulomb interactions between the beam charges.

Keywords: radiation, charge, tangential acceleration, normal acceleration, energy, work.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-7-13

REFERENCES

1. Ivanov D.A., Bataev V.A., Ognev A.Yu., Rosenthal M., Anokhin D.V., Luchnikov V.A., Davies R.J., Riekel C., Burghammer M., Bar G., Bazarkina V.V. Mikrostruktura kol'tsevykh polimernykh sferolitov: issledovanie s pomoshch'yu mikrofokusnoi rentgenovskoi difraktsii [Microstructure of ring polymeric spherulites: study using microfocus X-ray diffraction]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2010, no. 2, pp. 54–65.
2. Bashkirtsev A.G., Ivanov A.A., Kasatov D.A., Kuznetsov A.S., Sorokin I.N., Taskaev S.Yu., Chudaev V.Ya. Rentgenovskoe izluchenie vysokovol'tnykh elementov uskoritelya-tandema s vakuumnoi izolyatsiei [X-ray radiation of high-voltage elements of the tandem accelerator with vacuum insulation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 1, pp. 56–62.
3. Gaisler A.V., Shcheglov D.V. Poluprovodnikovyi breggovskii mikrorezonator dlya izluchatelei odinochnykh fotonov [Semiconductor Bragg microcavity for single photon sources]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4, pp. 21–32.
4. Antsiferov V.V., Makarov V.V., Sviridenko D.I., Smirnov G.I. Polyarizatsionno-uglovaya anizotropiya nelineinykh parametricheskikh rezonansov dvukhfotonnogo rasseyaniya na plazmennykh kolebaniyakh [Polarization-angular anisotropy of nonlinear parametric resonances of two-photon scattering by plasma oscillations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2005, no. 1, pp. 6–11.
5. Popov I.P. Svedenie postoyannoi Planka k klassicheskim fundamental'nym konstantam [Reduction of Planck's constant to classical fundamental constants]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Fizika i khimiya = Bulletin of the Udmurt University. Physics and chemistry*, 2014, no. 3, pp. 51–54.
6. Pavlov V.D. Magnitnyi potok i ego kvantovanie [Magnetic flux and its quantization]. *Izvestiya Ufimskogo Nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the RAS Ufa Scientific centre*, 2020, no. 4, pp. 25–28. DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28.
7. Karpov G.V., Styuf A.S. Novaya sistema izmereniya polozheniya puchka dlya forinzhektora inzhektsionnogo kompleksa [New system for measuring the position of the beam for the forinjector of the injection complex]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 2, pp. 110–117.
8. Aleshaev A.N., Anashin V.V., Anchugov O.V., Blinov V.E., Bogomyagkov A.V., Burenkov D.B., Vasichev S.P., Glukhov S.A., Glukhovchenko Yu.M., Gordeev O.P., Gusev G.A., Erokhov V.N., Zolotarev K.V., Zhilich V.N., Zhmaka A.I., Zhuravlev A.N., Kaminsky V.V., Karnaev S.E., Karpov G.V., Kiselev V.A. et. al. Elektron-pozitronnyi kollaider VEPP-4M: sostoyanie i perspektivy [Electron-positron collider VEPP-4M: state and prospects]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 1, pp. 35–46.
9. Kibis O.V. Elektron-fotonnye sostoyaniya v grafene [Electron-photon states in graphene]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2011, no. 1, pp. 6–11.
10. Berkaev D.E., Borisov A.A., Gusev G.A., Zharinov Yu.M., Zemlyansky I.M., Kyrpotin A.N., Koop I.A., Kuzminykh V.S., Lysenko A.P., Nesterenko I.N., Otboyev A.V., Pavlov O.A., Perevedentsev E.A., Rogovsky Yu.A., Romanov A.L., Skrinsky A.N., Shatunov P.Yu., Shatunov Yu.M., Shwartz D.B. Status elektron-pozitronnogo kollaidera VEPP-2000 [VEPP-2000 electron-positron collider status]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 2, pp. 16–25.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Игорь Павлович – старший преподаватель кафедры «Общая физика», Курганский государственный университет. Опубликовано более 100 работ, в том числе в области электродинамики. (Адрес: 640015, Курган, ул. Парижской Коммуны, 33. E-mail: ip.popow@yandex.ru).

Popov Igor Pavlovich – senior lecturer at the Department of General Physics, Kurgan State University. More than 100 papers have been published including papers in the field of electrodynamics. (Address: 33, Commune Street, Kurgan, 640015 E-mail: ip.popow@yandex.ru).

Статья поступила 20 мая 2021
Received May 20 2021

To references:

Popov I.P. Ob elektromagnitnom izluchenii otdel'nykh zaryadov [On electromagnetic radiation of individual charges]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 2 (51), pp. 7–13. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-7-13.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 апрель–июнь № 2 (51)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 539.2+537.226

КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В НАНОМЕТРОВЫХ СЛОЯХ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.А. Калытка[1], А.И. Алиферов[4], М.В. Коровкин[2,3], А.Д. Мехтиев [3,5], П.Ш. Мади[1,3]

[1] *Карагандинский технический университет*
[2] *Томский государственный университет*
[3] *Томский политехнический университет*
[4] *Новосибирский государственный технический университет*
[5] *Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина*

На основании существующей физической модели (с учетом ряда ранее установленных экспериментальных допущений) протонной релаксации строится и исследуется квантовое кинетическое уравнение, описывающее, совместно с операторным уравнением Пуассона, механизм диффузионного туннельного переноса ионов водорода (протонов) в потенциальном поле кристаллической решетки, возмущенной поляризующим полем (квантовая диффузионная поляризация) в кристаллах с водородными связями. Расчет измеряемой в эксперименте величины поляризации кристалла проводится путем полного квантово-механического усреднения оператора поляризации с помощью неравновесной матрицы плотности, вычисляемой для ансамбля невзаимодействующих протонов, без учета протон-фононного взаимодействия, причем фононная подсистема (в данной модели) представляет собой слабое пространственно-однородное силовое поле, воздействующее на релаксаторы (протоны) на фоне основных сил водородных связей. Равновесная матрица плотности вычисляется с помощью квантовой статистики Больцмана. Исследуется влияние параметров электрического поля (амплитуда и частота электродвижущей силы) и температур на нелинейные свойства спектров комплексной диэлектрической проницаемости в широком диапазоне варьирования толщины кристаллического слоя. Теоретически, в КВС обнаружены размерные эффекты, проявляющиеся в смещениях низкотемпературных (50–100 К) максимумов тангенса угла диэлектрических потерь в сторону сверхнизких температур (4–25 К) с уменьшением амплитуд максимумов на три-четыре порядка, при сокращении толщины кристаллического слоя от 1–10 мкм до 1–10 нм. Установлено, что аномально высокие квантовые прозрачности потенциального барьера для протонов (0,8–0,9) в тонких пленках кристаллов с водородными связями (1–10 нм) обуславливают вблизи температур смещенных максимумов диэлектрических потерь (4–25 К) квазисегнетоэлектрическое состояние, характеризуемое также аномально высокими значениями вещественной компоненты комплексной диэлектричесой проницаемости (2,5–3,5 млн). При этом мнимая компонента комплексной диэлектрической проницаемости существенно не изменяется и мала по величине (0,06–0,08). Как и все сегнетоэлектрики с водородными связями, кристаллы онотского талька и гипса описываются прямоугольной петлей гистерезиса.

Ключевые слова: кристаллы с водородными связями, нелинейная квантовая диффузионная поляризация, туннелирование протонов, квантовая прозрачность потенциального барьера для протонов, ансамбль невзаимодействующих протонов, сегнетоэлектрики с водородными связями, квазисегнетоэлектрическое состояние.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-14-33

Введение

В последние два десятилетия существенную роль в современной промышленности играют композиционные материалы на основе слоистых диэлектриков

© 2021 В.А. Калытка, М.В. Коровкин, А.И. Алиферов, А.Д. Мехтиев, П.Ш. Мади

с ионно-молекулярной химической связью, способные проявлять в определенных диапазонах параметров полей и температур высокую ионную проводимость [1].

Отдельную категорию ионно-молекулярных диэлектриков представляют кристаллы с водородными связями (КВС), используемые в радиоэлектронике (элементы электронно-управляемых систем СВЧ, ССВЧ-диапазона [1]), оптоэлектронике (нелинейные преобразователи оптических сигналов; оптоволоконные датчики), лазерной технике (регуляторы параметров излучения и электрические затворы) [2–9], микроэлектронике (полевые транзисторы, резонансные туннельные диоды, МДП, МПМ-структуры), электроэнергетике и технике высоких напряжений (изоляционные покрытия токоотводящих элементов электрогенераторов ТЭС) [10–13].

По электрофизическим свойствам КВС классифицируются как протонные полупроводники и диэлектрики (ППД) и проявляют свойство протонной проводимости, сводящейся к диффузионному переносу ионов водорода (протонов) по водородным связям в направлении силовых линий внешнего электрического поля [1].

Проявление у сегнетоэлектриков класса КВС (КДП [1], триглицинсульфат (ТГС) [10], сегнетова соль [11] и др.) прямоугольной петли гистерезиса (ППГ) с аномально большим временем релаксации остаточной поляризации (до 10 лет) позволяет использовать эти материалы в конденсаторах энергонезависимых быстродействующих запоминающих устройств (ячейки памяти типа DRAM, FeRAM и др.) электронно-вычислительных устройств [12, 13].

1. Краткий обзор проблемы исследования. Выбор методологии исследования

В области высоких температур (100–550 К) основной вклад в диэлектрическую релаксацию в КВС вносят термически активируемые (классические) переходы релаксаторов (протонов) по водородным связям [14]. В этом случае теоретические исследования механизмов поляризации и проводимости проводятся методами квазиклассической кинетической теории, на основании совместного решения системы нелинейных уравнений Фоккера–Планка и Пуассона, в произвольном приближении k по безразмерному малому параметру теории возмущений $(\gamma \approx 0,001 \div 0,1)$ [1] и уже в линейном приближении по параметру сравнения $(\gamma < 0,01)$ хорошо согласуются с экспериментом [14].

В области низких температур (50–100 К) доминирующий вклад в релаксационные процессы в КВС вносят туннельные (квантовые) переходы протонов через потенциальный барьер, параметр разложения заметно увеличивается $(\gamma > 0,01)$ [15], что требует более строгого учета влияния нелинейных эффектов на поляризацию. При этом энергетический спектр протонов в потенциальном поле кристаллической решетки становится квазидискретным и статистические свойства протонной подсистемы в равновесном состоянии описываются матрицей плотности, вычисляемой квантового канонического распределения Гиббса [15, 16].

При этом теоретически выявлены смещения низкотемпературных максимумов плотности термостимулированного тока деполяризации (ТСТД) в КВС в сторону сверхнизких температур (4–25 К) с увеличением амплитуд максимумов на три-четыре порядка, при сокращении толщины кристаллического слоя от 3–30 мкм до 3–30 нм. Этот эффект объясняется в [15] аномальными изменениями структуры и параметров квазидискретного энергетического спектра протонов при толщине диэлектрика порядка 1–10 нм. В [17] исследована зонная структура и рассчитаны параметры энергетических зон (ширина зоны, «дно» и «потолок» зоны

и др.) протонов. При этом исследования детализированного, с точки зрения численной оценки влияний параметров потенциального рельефа протона (параметр решетки, энергия активации, ширина и высота потенциального барьера) и толщины диэлектрика на динамику и величины смещений (по температуре и амплитуде) низкотемпературных максимумов ТСТД в КВС в [15, 17], не проводились. Максимумы тангенса угла диэлектрических потерь в КВС в области низких температур (50–100 К) выявить из эксперимента пока не удается [15].

Решение данной проблемы, выполненное на основании ранее построенной физико-математической модели квантовой туннельной поляризации КВС [16–18], с привлечением аппарата минимизации функции сравнения [19, 20], позволит разработать и реализовать с помощью компьютерной программы (комплекта программ) оптимизированную схему численного анализа и прогнозирования свойств температурных спектров термостимулированного тока деполяризации и тангенса угла в КВС [15, 17].

Целью данной работы является усовершенствовование физико-математической модели и численное исследование влияний нелинейностей квантового кинетического уравнения на механизм туннельной диффузионной поляризации, применительно к температурным спектрам тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta(T)$, в кристаллах с водородными связями (КВС) в широком диапазоне изменения толщины кристаллического слоя (1 нм–10 мкм). Область изменения температур кристалла принимаем от 10 К до 550 К. Туннельное диффузионное движение основных носителей заряда (протонов) в КВС доминирует, по данным эксперимента, в области низких температур (50–100 К) и характеризуется малыми значениями энергии активации (0,05–0,1эВ) [14].

Важным является вопрос об исследовании влияний толщины диэлектрика и параметров релаксаторов (U_0 – высота потенциального барьера, сравнимая с энергией активации протонов на водородной связи; δ_0 – ширина потенциального барьера; ω_0 – круговая частота колебаний протона в потенциальной яме; n_0 – равновесная концентрация [17]) на свойства диэлектрика и динамику температурного поведения тангенса угла диэлектрических потерь в КВС. А также вопрос о влияниях частоты ω переменного поляризующего поля на тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta(\omega, T)$. В силу специфики, экспериментальных и теоретических методов изучения частотных зависимостей [15, 21] в рамках данной работы этот вопрос не рассматривается и является предметом отдельного исследования.

2. Квантово-механическая модель диэлектрических потерь в протонных полупроводниках и диэлектриках в области низких и сверхнизких температур

Прямые квантово-механические исследования неравновесных электрофизических процессов в диэлектрике будем строить из решения квантового кинетического уравнения Лиувилля [15, 16], позволяющего, совместно с операторным уравнением Пуассона и уравнением Шрёдингера, построить неравновесную матрицу плотности и на этой основе перейти к вычислениям измеряемых в эксперименте величин (ток термостимулированной деполяризации, тангенс угла диэлектрических потерь и др.).

В отсутствие внешнего возмущения моделируемая система (кристалл класса КВС) описывается уравнением Лиувилля [15, 16].

$$\frac{\partial \hat{\rho}_C^{(0)}}{\partial t} + \frac{1}{i\hbar}\left[\hat{\rho}_C^{(0)}, \hat{H}_C^{(0)}\right] = 0 . \qquad (1)$$

Гамильтониан невозмущенной системы (кристалла) представим в виде [16]

$$\hat{H}_C^{(0)} = \hat{H}_{pr,C}^{(0)} + \hat{H}_{ph} + \hat{H}_{pr,ph} . \tag{2}$$

В (2) $\hat{H}_{pr,C}^{(0)}$ – гамильтониан протонной подсистемы; $\hat{H}_{ph}$ – гамильтониан фононной подсистемы; $\hat{H}_{pr,ph}$ – оператор протон-фононного взаимодействия.

Согласно экспериментально установленным для КВС допущениям [2], пренебрегая протон-фононным взаимодействием $\hat{H}_{pr,ph} \to 0$, принимая гамильтониан фононной подсистемы числовым оператором $\hat{H}_{ph} \to \text{const}$ и ограничиваясь моделью идеального протонного газа, преобразуем уравнение (1) к уравнению Лиувилля для протонной подсистемы [16]:

$$\frac{\partial \hat{\rho}_{pr}^{(0)}}{\partial t} + \frac{1}{i\hbar}\left[\hat{\rho}_{pr}^{(0)}, \hat{H}_{pr}^{(0)}\right] = 0 . \tag{3}$$

Здесь $\hat{H}_{pr}^{(0)}$ – невозмущенный внешним полем гамильтониан отдельного протона.

Поскольку энергия Ферми протонного газа в КВС стремится к нулю [15, 16], решение уравнения (3) запишем согласно квантовой статистике Больцмана [16]:

$$\hat{\rho}_{pr}^{(0)} = N_{pr,F}\left\{\sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{E_n^{(0)}}{k_B T}\right)\right\}^{-1} \exp\left(-\frac{\hat{H}_{pr}^{(0)}}{k_B T}\right). \tag{4}$$

Здесь $N_{pr,F}$ – полное количество релаксаторов (протонов), двигающихся с заданной энергией активации U_0 [15, 16].

Статистический оператор протонной подсистемы в присутствии поляризующего поля вычисляется из уравнения [16]

$$\frac{\partial \hat{\rho}_{pr}}{\partial t} + \frac{1}{i\hbar}\left[\hat{\rho}_{pr}, \hat{H}_{pr}\right] = 0 , \tag{5}$$

где $\hat{H}_{pr} = \hat{H}_{pr}^{(0)} + \hat{W}_{el}(\vec{r}; t)$ – возмущенный внешним полем гамильтониан протона; $\hat{W}_{el}$ – возмущающая поправка к оператору $\hat{H}_{pr}^{(0)}$; $\vec{r}$ – радиус-вектор протона; $\hat{\rho}_{pr} = \hat{\rho}_{pr}^{(0)} + \delta\hat{\rho}_{pr}$ – неравновесный статистический оператор протонов; $\delta\hat{\rho}_{pr}$ – неравновесная поправка к невозмущенному статистическому оператору (4).

Воздействуя операторами $\frac{\partial \hat{\rho}_{pr}}{\partial t}$ и $\frac{1}{i\hbar}\left[\hat{\rho}_{pr}, \hat{H}_{pr}\right]$ на волновую функцию протона в *n*-м стационарном состоянии и исключая члены второго порядка по полю $\delta\hat{\rho}_{pr} \cdot \left(\hat{W}_{el}\psi_n\right)$, $\hat{W}_{el} \cdot \left(\delta\hat{\rho}_{pr}\psi_n\right)$, имеем

$$\frac{\partial\left(\delta\hat{\rho}_{pr}\psi_n\right)}{\partial t} + \frac{1}{i\hbar}\left(\delta\hat{\rho}_{pr}\left(\hat{H}_{pr}^{(0)}\psi_n\right) - \hat{H}_{pr}^{(0)}\left(\delta\hat{\rho}_{pr}\psi_n\right) + \right.$$

$$\left. + \hat{\rho}_{pr}^{(0)}\left(\hat{W}_{el}\psi_n\right) - \hat{W}_{el}\left(\hat{\rho}_{pr}^{(0)}\psi_n\right)\right) = 0 . \tag{6}$$

Вводя в (6) скалярную функцию $u_n(\vec{r};\, t) = \delta\hat{\rho}_{pr}\psi_n(\vec{r};\, t)$, получим

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} + \frac{E_n^{(0)}}{i\hbar}u_n - \frac{1}{i\hbar}\hat{H}_{pr}^{(0)}u_n + \frac{1}{i\hbar}\left[\hat{\rho}_{pr}^{(0)};\, \hat{W}_{el}\right]\psi_n = 0\,. \tag{7}$$

Для модели блокирующих электродов [15,16]

$$\hat{j}_{pr}(d;\, t) = \hat{j}_{pr}(0;\, t) = 0\,, \tag{8}$$

где d – толщина диэлектрика.

В начальный момент времени поляризация отсутствует [15, 16], протонная подсистема не возмущена внешним полем, поэтому $\delta\hat{\rho}_{pr}\psi_n\left(\vec{r};\, 0\right) = 0$. Тогда

$$u_n(\vec{r};\, 0) = 0\,. \tag{9}$$

Решение уравнения (7) строим совместно с уравнением Пуассона [15, 16]

$$\frac{\partial\hat{E}}{\partial x} = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon_\infty}\delta\hat{n}(\vec{r};\, t) \tag{10}$$

с учетом граничного условия [15, 16]

$$\int_0^d \hat{E}(x;\, t)dx = V_0\exp(i\omega t)\,, \tag{11}$$

где q – заряд протона; ε_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость; V_0, ω – соответственно амплитуда и круговая частота внешнего поля.

Квантово-механическое выражение для избыточной концентрации релаксирующих протонов [16]

$$\delta\hat{n}(\vec{r};\, t) = \sum_{n=0}^{\infty}\psi_n^*\delta\hat{\rho}_{pr}(\vec{r};\, t)\psi_n = \sum_{n=0}^{\infty}\psi_n^* u_n(\vec{r};\, t) \tag{12}$$

позволяет рассчитать оператор поляризации протонной подсистемы $\hat{P}(\vec{r};\, t) = = q\vec{r}\,\delta\hat{n}(\vec{r};\, t)$ в виде

$$\hat{P}(\vec{r};\, t) = q\sum_{n=0}^{\infty}\psi_n^*\vec{r}\,u_n(\vec{r};\, t)\,. \tag{13}$$

Усреднение оператора (13) по координатам и энергиям проведем с помощью неравновесной поляризационной матрицы плотности

$$\left\langle\overline{P}\right\rangle \equiv Sp\left(\hat{\rho}_{pr}\times\hat{P}\right) = \int_V \Psi^*\hat{P}(\vec{r},\, t)\Psi dV\,. \tag{14}$$

Поляризация кристалла в переменном поле [16]

$$\left\langle\hat{P}\right\rangle = \varepsilon_0\left(\hat{\varepsilon}(\omega,\, T) - \varepsilon_\infty\right)E(t)\,. \tag{15}$$

На основании (14), (15) запишем теоретический спектр комплексной диэлектрической проницаемости $\hat{\varepsilon}(\omega,\, T) = \mathrm{Re}\left[\hat{\varepsilon}(\omega,\, T)\right] - i\,\mathrm{Im}\left[\hat{\varepsilon}(\omega,\, T)\right]$ в виде

$$\hat{\varepsilon}(\omega, T) = \varepsilon_\infty + \frac{q}{\varepsilon_0 E_0} \exp(-i\omega t) \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^d \psi_n^*(x) \hat{x} u_n(x; t)\, dx \,. \qquad (16)$$

Здесь $E(t) = E_0 \exp(i\omega t)$ – напряженность внешнего поляризующего поля, $E_0 = \frac{V_0}{d}$, $\hat{x}$ – координаты протона. Волоконные функции старционарных состояний $\psi_n^*(x)$ вычислены в [17]. Оценка степени точности результатов расчетов по формуле (16) будет проводиться путем сопоставления с данными экспериментов по измерению спектров тангенса угла диэлектрических потерь [15]:

$$\mathrm{tg}\delta(\omega, T) = \frac{\sigma_{pr}}{\omega\varepsilon_0 \,\mathrm{Re}\left[\hat{\varepsilon}(\omega, T)\right]} + \frac{\mathrm{Im}\left[\hat{\varepsilon}(\omega, T)\right]}{\mathrm{Re}\left[\hat{\varepsilon}(\omega, T)\right]} \,. \qquad (17)$$

В (17) σ_{pr} – коэффициент электропроводности, обусловленной сквозным движеним протонов в диэлектрике (ток проводимости) [14].

3. Численное исследование квантово-механической модели диэлектрических потерь

Численные расчеты температурных спектров тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta_{th}(T)$ [15] выполнялись по формулам (16), (17) и сопоставлялись с результатами экспериментальных измерений в онотском тальке $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ и гипсе $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ в диапазоне температур $T = 50 - 550$ К, при частоте внешнего переменного электрического поля $\nu_1 = 7 \cdot 10^6$ Гц [15]. Толщина кристалла в эксперименте составляла 30 мкм [15].

По результатам численного расчета в низкотемпературной области (50–100 К) в онотском тальке при толщине кристалла d = 30 мкм, частоте переменного поляризующего поля $\nu_1 = 7 \cdot 10^6$ Гц и температуре $T_{\max} = 105$ К проявляется теоретический максимум тангенса угла диэлектрических потерь с амплитудой $\mathrm{tg}\,\delta_{th}^{(\nu_1)}(T_{\max}) \approx 0{,}5 \cdot 10^{-4}$, обусловленный туннельным (квантовым) движением релаксаторов (протонов) с энергией активации $U_0 = 0{,}045$ эВ. В гипсе соответственно максимум такого рода выявлен также теоретически, при тех же внешних условиях ($\nu_1 = 7 \cdot 10^6$ Гц; d = 30 мкм), но при температуре $T_{\max} = 97$ К, с амплитудой $\mathrm{tg}\,\delta_{th}^{(\nu_1)}(T_{\max}) \approx 0{,}9 \cdot 10^{-4}$ и энергией активации $U_0 = 0{,}05$ эВ.

Далее, на основании формул (16), (17), варьированием толщины кристаллического слоя от 30 мкм до 3 нм установлены смещения низкотемпературных ($T_{\max} = 50 - 100$ К) теоретических максимумов $\mathrm{tg}\,\delta(\nu_1, T_{\max})$ для онотского талька и гипса в сторону сверхнизких температур ($T_{\max} = 4 - 25$ К) и резким падением амплитуд максимумов на три-четыре порядка, как показано в табл. 1, 2. Так, для кристалла онотского талька $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ с уменьшением толщины слоя от 30 мкм до 3 нм максимум тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta_{th}^{(\nu_1)}(T_{\max})$ смещается от низких (105 К) в сторону сверхнизких температур (22 К), а ампли-

туда максимума уменьшается от $0,5\cdot10^{-4}$ до $0,39\cdot10^{-8}$. В гипсе $CaSO_4\cdot0,5H_2O$, с уменьшением толщины кристалла от 30 мкм до 3 нм, максимум $\mathrm{tg}\,\delta_{th}^{(\nu_1)}(T_{\max})$ смещается от 97 К к 15 К с возрастанием амплитуды от $0,9\cdot10^{-4}$ при 30 мкм до $0,86\cdot10^{-8}$ при 3 нм.

Такого же рода эффекты исследованы в [15], где наблюдались аномальные смещения низкотемпературных ($T_{\max}=50-100$ К) теоретических максимумов плотности термостимулированного тока деполяризации $J_{th}(T_{\max})$ в сторону сверхнизких температур ($T_{\max}=4-25$ К) с резким возрастанием амплитуд на три-четыре порядка, при уменьшении толщины кристалла от 30 мкм до 3 нм. В качестве объектов исследования рассматривались кристаллы природного флогопита $KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ и химически чистого халькантита $CuSO_4\cdot5H_2O$ [15].

Как и в [15], обнаруженные эффекты наноразмерного состояния КВС будем объяснять вырождениями квазидискретного энергетического спектра $E_n^{(0)}$ низкотемпературных релаксаторов (протонов) [18], двигающихся в области температур $T\approx50-100$, в основном за счет туннельных переходов через потенциальный барьер и распределенных по уровням энергии $E_{n,s}^{(0)}$ энергетического спектра с зонной структурой (S – номер уровня энергии N-й энергетической зоны) [18] в соответствии с квантовой статистикой Больцмана [18], с энергиями активации $U_0=(0,05\div0,1)$ эВ и статически усредненным коэффициентом прозрачности, равным $\left\langle D^{(0)}\left(U_0;\,E_n^{(0)}\right)\right\rangle\approx0,1\div0,3$, что является достаточно большим числом для такой массивной (в сравнении с электронами) частицы. Поскольку в [21] установлено, что туннельные переходы протонов в КВС продолжают определенным образом сказываться на временах релаксации КВС и в области достаточно высоких температур (150 – 550 К), протон можно определить как основной носитель заряда в КВС и как квантовую частицу, двигающуюся в широком диапазоне полей (10 – 1000 МВ/м) и температур (50 – 550 К).

Таблица 1 / Table 1

Температурные максимумы тангенса диэлектрических потерь в онотском тальке, рассчитанные при частоте поляризующего поля $\nu_1 = 7\cdot10^6$ Гц, при различных толщинах кристаллических слоев

Temperature maxima of the dielectric loss tangent in Onot talc, calculated at the frequency of the polarizing field $\nu_1 = 7\cdot10^6$ Hz, at different thicknesses of the crystal layers

Толщина слоя, нм	Амплитуды и температурные положения теоретических максимумов $\mathrm{tg}\,\delta(\nu_1, T_{\max})$				
30000	$0,5\cdot10^{-4}$ (105)	$2,5\cdot10^{-3}$ (160)	$3,23\cdot10^{-3}$ (220)	$4,25\cdot10^{-3}$ (265)	$4,5\cdot10^{-3}$ (310)
3000	$0,4\cdot10^{-4}$ (96)	$2,2\cdot10^{-3}$ (157)	$2,14\cdot10^{-3}$ (219)	$4,25\cdot10^{-3}$ (265)	$4,5\cdot10^{-3}$ (310)
300	$0,53\cdot10^{-4}$ (88)	$2,4\cdot10^{-3}$ (146)	$1,17\cdot10^{-3}$ (215)	$4,25\cdot10^{-3}$ (265)	$4,5\cdot10^{-3}$ (310)
30	$4,6\cdot10^{-6}$ (50)	$6,8\cdot10^{-6}$ (127)	$1,05\cdot10^{-3}$ (207)	$4,25\cdot10^{-3}$ (265)	$4,5\cdot10^{-3}$ (310)
3	$0,39\cdot10^{-8}$ (22)	$5,8\cdot10^{-7}$ (103)	$0,54\cdot10^{-3}$ (190)	$3,3\cdot10^{-3}$ (259)	$4,4\cdot10^{-3}$ (308)

Таблица 2 / Table 2

Температурные максимумы тангенса диэлектрических потерь в гипсе, рассчитанные при частоте поляризующего поля $\nu_1 = 7 \cdot 10^6$ Гц, при различных толщинах кристаллических слоев

Temperature maxima of the dielectric loss tangent in a cast calculated at the frequency of the polarizing field $\nu_1 = 7 \cdot 10^6$ Hz, at different thicknesses of the crystal layers

Толщина слоя, нм	Амплитуды и температурные положения теоретических максимумов $\mathrm{tg}\,\delta(\nu_1, T_{\max})$				
30000	$0{,}9 \cdot 10^{-4}$ (97)	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$ (145)	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$ (210)	$4{,}25 \cdot 10^{-3}$ (270)	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$ (320)
3000	$0{,}3 \cdot 10^{-4}$ (89)	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$ (142)	$3{,}3 \cdot 10^{-3}$ (209)	$4{,}25 \cdot 10^{-3}$ (270)	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$ (320)
300	$0{,}1 \cdot 10^{-4}$ (80)	$0{,}4 \cdot 10^{-3}$ (138)	$2{,}9 \cdot 10^{-3}$ (200)	$4{,}25 \cdot 10^{-3}$ (270)	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$ (320)
30	$1{,}6 \cdot 10^{-6}$ (47)	$7{,}4 \cdot 10^{-6}$ (130)	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$ (190)	$4{,}25 \cdot 10^{-3}$ (267)	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$ (320)
3	$0{,}86 \cdot 10^{-8}$ (15)	$3.4 \cdot 10^{-7}$ (102)	$5{,}1 \cdot 10^{-3}$ (183)	$3{,}3 \cdot 10^{-3}$ (264)	$4{,}4 \cdot 10^{-3}$ (317)

В нанометровых слоях КВС (1–10 нм), несмотря на существенное сокращение полного числа потенциальных ям в модели N_W на три-четыре порядка (в сравнении с микрометровыми (1–10 мкм)), из-за снижения расчетных энергий активации протонов $U_0 \approx (0{,}01 \div 0{,}05)$ эВ, когда $\left\langle D^{(0)}\left(U_0; E_n^{(0)}\right)\right\rangle \approx 0{,}5 \div 0{,}7$ [18], ширины расщеплений $\Delta E_n = \dfrac{4E_0^{(0)}}{\pi}\sqrt{D^{(0)}\left(U_0; E_n^{(0)}\right)} \cdot \cos\left(\dfrac{\pi}{N_W + 1}\right)$ [18] уровней энергии $E_n^{(0)}$ изолированной потенциальной ямы возрастают от $\Delta E_n \approx (0{,}00001 \div 0{,}0001)$ эВ до $\Delta E_n \approx (0{,}001 \div 0{,}01)$ эВ. Тогда статистически усредненные по уровням энергии $E_{n,s}^{(0)}$ энергетических зон $E_{n,s}^{(0)} = E_n^{(0)} + \dfrac{2E_0^{(0)}}{\pi}\sqrt{D\left(U_0; E_n^{(0)}\right)} \cdot \cos\left(\dfrac{\pi s}{N_W + 1}\right)$, $s = 1, 2, 3, \ldots, N_W$, энергии [18], квантовые прозрачности достигают значений $\left\langle D\left(U_0;\, E_{n,s}^{(0)}\right)\right\rangle \approx 0{,}8 \div 0{,}9$ и процесс перемещения протона по линии водородной связи можно считать чисто квантовым с вероятностями переходов решетки $a \approx 10^{-10}$ при ширине потенциального барьера $\delta_0 = (0{,}85 \div 1) \cdot 10^{-10}$ м, в силу приближенной формулы $U_0 = \dfrac{m\omega_0^2\delta_0^2}{8}$ [24], где m – масса протона [17–22], расчетная линейная частота колебаний протона в потенциальной яме равна $\nu_0 = \dfrac{\omega_0}{2\pi} \approx (0{,}52 \div 1{,}15) \cdot 10^{13}$ Гц, а минимальная энергия частицы в изолированной потенциальной яме $E_0^{(0)} = (0{,}01 \div 0{,}03)$ эВ. Таким образом, в потенциальную яму с барьером высотой $U_0 \approx (0{,}01 \div 0{,}05)$ эВ попадает только один уровень энергии $E_0^{(0)}$, расщепляющей под действием внутреннего кристаллического

поля в энергетичесую зону. $E_{0,s}^{(0)} \approx E_0^{(0)} + \frac{2E_0^{(0)}}{\pi}\sqrt{D\left(U_0; E_0^{(0)}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi s}{11}\right)$, $s = 1, 2, 3, \ldots, 10$, с квантовой прозрачностью $D^{(0)}\left(U_0;\, E_0^{(0)}\right) \approx 0,75 \div 0,8$ и шириной расщепления $\Delta E_0^{(0)} = \frac{4E_0^{(0)}}{\pi}\sqrt{D\left(U_0;\, E_0^{(0)}\right)} \approx (0,011 \div 0,034)$ эВ, сравнимой с величиной самого уровня энергии $E_0^{(0)}$. Тогда статистический усредненный (в пределах 0-й зоны) коэффициент квантовой прозрачности достигает значений $\left\langle D\left(U_0; E_{0,s}^{(0)}\right)\right\rangle \approx 0,8 \div 0,9$.

Для сравнения, в микрометровых слоях КВС (1–10 мкм) расчетные значения энергий активации $U_0 = (0,05 \div 0,1)$ эВ дают минимальные энергии частицы в изолированной потенциальной яме $E_0^{(0)} = (0,002 \div 0,003)$ эВ. В этом случае в потенциальную яму попадает $n_{\max} = (25 \div 35)$ уровней энергии $E_0^{(0)}$, $E_1^{(0)}, \ldots,$ $E_{n_{\max}}^{(0)}$, расщепляющихся в энергетические зоны с квантовыми прозрачностями $D^{(0)}\left(U_0;\, E_0^{(0)}\right) \approx 0,0001 \div 0,0002$, $D^{(0)}\left(U_0; E_{n_{\max}}^{(0)}\right) \approx 0,11 \div 0,25$ и ширинами расщеплений равными $\Delta E_0^{(0)} = \frac{4E_0^{(0)}}{\pi}\sqrt{D\left(U_0; E_0^{(0)}\right)} \approx (2,55 \div 5,4) \cdot 10^{-5}$ эВ, $\Delta E_{n_{\max}}^{(0)} =$ $= \frac{4E_0^{(0)}}{\pi}\sqrt{D\left(U_0; E_{n_{\max}}^{(0)}\right)} \approx (0,00085 \div 0,0019)$. Тогда статистически усредненные (в пределах 0-й и $n_{\max}$-й зон) коэффициенты квантовой прозрачности принимают значения $\left\langle D\left(U_0;\, E_{0,s}^{(0)}\right)\right\rangle \approx (1,35 \div 2,85) \cdot 10^{-5}$, $\left\langle D^{(0)}\left(U_0;\, E_{n_{\max},s}^{(0)}\right)\right\rangle \approx 0,1 \div 0,3$.

В общем, нами показано, что сокращение толщины кристаллического слоя КВС от 1–10 мкм до 1–10 нм обусловливает снижение расчетных энергий активации протонов от $U_0 = (0,05 \div 0,1)$ эВ, при $\nu_0 \approx (1,02 \div 1,05) \cdot 10^{12}$ Гц, до $U_0 \approx (0,01 \div 0,05)$ эВ, при $\nu_0 \approx (0,52 \div 1,15) \cdot 10^{13}$ Гц, и на этом фоне скорость вероятности квантового туннелирования протонов (с энергиями, распределенными в пределах 0-й зоны) $W_{tunn}(T) = \frac{\nu_0}{2}\left\langle D\left(U_0; E_{0,s}^{(0)}\right)\right\rangle$ возрастает от $(1,35 \div 2,85) \cdot 10^7$ до $(0,416 \div 1,035) \cdot 10^{13}$.

Расчет *стационарных* квантово-механических коэффициентов диффузии $D_{diff}^{quant}(T) = a^2 \times W_{tunn}(T)$ и подвижности $\mu_{mob}^{quant}(T) = 2a\frac{W_{tunn}(T)}{E_{pol}(t)}\eta(t)$, где $\eta(t) = \Lambda\frac{|\Delta U(t)|}{U_0} < 1$, $|\Delta U(t)| = \frac{qE_{pol}(t)a}{2}$, $\Lambda = \frac{\pi\delta_0\sqrt{m}}{\hbar\sqrt{2}}\sqrt{U_0}$ [21], $E_{pol}(t)$ – напряженность однородного электрического поля, q – заряд протона [22], показал, что обозначенные выше сокращения толщин кристаллических слоев приводят к воз-

растанию *амплитуд* функций $D_{diff}^{quant}(T)$, $\mu_{mob}^{quant}(T)$ в точках расчетных температурных максимумов $T_{\max,1}$, $T_{\max,2}$ в $\varsigma \approx \dfrac{\left\langle D^{(0)}\left(U_0; E_{n_{\max},s}^{(0)}\right)\right\rangle\Big|_{T\to T_{\max,2}}}{\left\langle D\left(U_0; E_{0,s}^{(0)}\right)\right\rangle\Big|_{T\to T_{\max,1}}} \cong 10^5$ раз,

где $T_{\max,1} \approx (50 \div 100)$ К, при d = 1 – 10 мкм и $T_{\max,1} \approx (1 \div 25)$ К, при d = 1 – 10 нм.

Численный расчет теоретических температурных спектров тангенса угла диэлектрических потерь будем проводить при частоте поляризующего поля $\nu_1 = \dfrac{\omega_1}{2\pi} = 7 \cdot 10^6$ Гц [15] с учетом (17), при коэффициенте электропроводности диэлектрика σ_{pr} [15], согласно формуле

$$\operatorname{tg}\delta_{th}^{(\nu_1)}(T) = \frac{1}{\operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T)\right)}\left[\frac{\sigma_{pr}}{2\pi\nu_1\varepsilon_0} + \operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T)\right)\right]. \qquad (18)$$

Далее, при варьировании толщины кристалла от 30 мкм до 3 нм для онотского талька и гипса возникают все те же эффекты смещений низкотемпературных ($T_{\max,1} = 50 - 100$ К) теоретических максимумов $\operatorname{tg}\delta_{th}^{(\nu_1)}(T_{\max,1})$ в сторону сверхнизких температур ($T_{\max,2} = 4 - 25$ К). Падения амплитуд смещенных максимумов $\operatorname{tg}\delta_{th}^{(\nu_1)}(T_{\max,2})$, в сравнении с исходными максимумами $\operatorname{tg}\delta_{th}^{(\nu_1)}(T_{\max,1})$, на три-четыре порядка (табл. 1, 2) объясняется, по результатам численных расчетов, прежде всего существенным возрастанием значений вещественной компоненты комплексной диэлектрической проницаемости (16): $\dfrac{\operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,1})\right)}{\operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,2})\right)} \approx$ $\approx (0,00008 \div 0,0001)$ – на 4 порядка. При этом изменения мнимой компоненты оказываются незначительными: $\dfrac{\operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,2})\right)}{\operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,1})\right)} \approx (0,89 \div 1)$.

Тем не менее, несмотря на малые значения электрической проводимости исследуемых материалов (слюды, кристаллогидраты) $\dfrac{\sigma}{2\pi\nu_1\varepsilon_0} << \operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T)\right)$, аномально низкие значения преобразованных расчетных данных по тангенсу угла потерь $\operatorname{tg}\delta_{th}^{(\nu_1)}(T_{\max,2}) \approx \dfrac{\operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,2})\right)}{\operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,2})\right)} \cong 10^{-8}$ позволяют утверждать о переходе диэлектрика наноразмерной крупности (в расчетах толщина диэлектрика принималась, как и в [23], равной d = 3–30 нм) вблизи температуры $T_{\max,2} \cong 4 - 25$ К в состояние квазисегнетоэлектрической фазы [24], характеризуемой аномально высокими значениями вещественной компоненты $\operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,2})\right) \approx (2 \div 3) \cdot 10^6$ при $\operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,2})\right) \approx (1,4 \div 2,7) \cdot 10^{-2}$. Для кристалла толщиной 3–30 мкм вблизи

температуры $T_{\max,1} = 50 - 100$ К, когда $\mathrm{Re}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,1})\right) \approx (1,5 \div 2,8) \cdot 10^2$, $\mathrm{Im}\left(\hat{\varepsilon}(\nu_1, T_{\max,1})\right) \approx (1,38 \div 2,54) \cdot 10^{-2}$, данный эффект не наблюдается и диэлектрик реагирует на электрическое поле стандартным образом.

Физический механизм обнаруженных закономерностей можно объяснить перестройкой водородной подрешетки в КВС за счет аномально-высоких значениий квантовой прозрачности для протонов $\varsigma \approx \dfrac{\left\langle D^{(0)}\left(U_0; E^{(0)}_{n_{\max},s}\right)\right\rangle\Big|_{T \to T_{\max,2}}}{\left\langle D\left(U_0; E^{(0)}_{0,s}\right)\right\rangle\Big|_{T \to T_{\max,1}}} \cong 10^5$, обусловливающей квантовую нелинейную поляризацию[18].

4. Научно-практическая значимость результатов исследования

На настоящее время накоплен достаточно большой объем экспериментальных данных по применению протонных полупроводников и диэлектриков (ППД), в основном в области электрохимических технологий и физикохимии (при разработке твердотельных электролитов (перовскиты, ортопериодаты и бипериодаты щелочных металлов) [4–9]. При этом приложений данного явления в области теоретической электротехники и физической электроники не так много. Актуальными являются теоретические разработки, направленные на приложения квантовой кинетической теории протонной проводимости и поляризации [16–18] к вопросам микроэлектроники (полевые транзисторы, туннельные и резонансные диоды и др. [25]) и кванттовой теории высокотемпературной сверхпроводимости [26].

Полуэмпирические исследования миграции адсорбированных протонов по поверхности однослойных углеродистых нанотрубок [27] не являются законченными из-за отсутствия строгого теоретического обоснования: 1) связи между конфигурацией поверхности трубки и доминирующим физическим механизмом переноса протонов (туннельный или термически активируемый перенос протонов через потенциальный барьер); 2) температурной зависимости вероятности туннельных переходов протонов; 3) формы потенциального рельефа и энергии активации для протонов. Методы квантовой кинетической теории, основы которой заложены авторами [28, 29], позволят более детально, на более строгом теоретическом уровне, с помощью аппарата матрицы плотности рассмотреть квантовый механизм туннельного переноса протонов в наноразмерных материалах с высокой протонной проводимостью.

Результаты исследований, в перспективе, найдут применение в области микроэлектроники и нелинейной оптики, в частности при исследованиях влияния на нелинейные оптические процессы второго порядка (генерация второй гармоники, параметрическая генерация и усиление света, смешение частот, электрооптический эффект), нелинейностей более высокого порядка (эффект самовоздействия лазерного излучения), что актуально для техники фемптосекундных лазеров [30].

Научно-практическая значимость развиваемых в данной статье методов состоит в разработке единых алгоритмов для современного программно-аппаратного обеспечения, позволяющего не только анализировать, но и прогнозировать с высокой степенью точности и результаты научных и производственных экспериментов [31–36].

Выводы

1. Методами квазиклассической кинетической теории и нерелятивистской квантовой теории исследованы влияния параметров поляризующего поля (частота, амплитуда ЭДС) и температуры на механизм диффузионного туннельного переноса ионов водорода (протонов) в потенциальном поле кристаллической решетки, возмущенной поляризующим полем (квантовая диффузионная поляризация) в кристаллах с водородными связями (КВС).

2. Расчет равновесной матрицы плотности для ансамбля основных релаксаторов (ионов водорода) проводился из решения уравнения Лиувилля (3), совместно со стационарным уравнением Шрёдингера, в котором не учитывалось протон-протонное и протон-фононное взаимодействие, а оператор гамильтона для фононной подсистемы принимался числовой константой и вычислялся компьютерным методом, как параметр сравнения теории с экспериментом. Гамильтон протонной подсистемы строился для модели идеального протонного газа, находящегося в равновесии с ионной подсистемой кристаллической решетки, а *невозмущенный* статистический оператор протонной подсистемы записывался с помощью квантовой статистики Больцмана (4).

3. Построено нелинейное квантовое кинетическое уравнение протонной релаксации (7), решаемое совместно с операторным уравнением Пуассона (10) методом конечных разностей для модели блокирующих электродов (8), (11).

4. Выполнен расчет измеряемой в эксперименте величины поляризации диэлектрика (14) путем полного квантово-механического усреднения оператора поляризации (13), с помощью аппарата матрицы плотности (статистической матрицы). На этой основе рассчитаны теоретические спектры комплексной диэлектрической проницаемости (16), вычисляемой в широком диапазоне варьирования параметров полей (100 кВ/м – 1000 МВ/м) и температур (0–1500 К).

5. Записано выражение для расчета тангенса угла диэлектрических потерь (17), вычисляемого с учетом электропроводности, обусловленной сквозным движением протонов в диэлектрике.

6. На теоретическом уровне обнаружены размерные эффекты в КВС, проявляющиеся в смещениях *низкотемпературных* (50–100 К) максимумов *тангенса угла диэлектрических потерь* в сторону сверхнизких температур (4–25 К) с уменьшением амплитуд максимумов на три-четыре порядка, в случае сокращении толщины кристаллического слоя от 1–10 мкм до 1–10 нм. Этот эффект объясняется изменениями конфигурации дискретного энергетического спектра протонов, когда при толщине пленки КВС 1–10 нм энергия активации *низкотемпературных* релаксаторов снижается до 0,01–0,03 эВ (против 0,05–0,1 эВ при 1–10 мкм), и для уровней энергии, попадающих в изолированную потенциальную яму, проявляются аномально высокие квантовые прозрачности потенциального барьера (0,8–0,9). Таким образом, в нанопленках КВС вблизи сверхнизких температур (4–25 К) диэлектрик из-за перестройки структуры водородной подрешетки переходит в квазисегнетоэлектрическое состояние, характеризуемое также *аномально* высокими значениями вещественной компоненты КДП (2,5–3,5 млн).

ЛИТЕРАТУРА

1. Non-linear polarizing effects in dielectrics with hydrogen bonds / V.A. Kalytka, M.V. Korovkin, A.D. Mekhtiev, A.V. Yurchenko // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, N 4. – P. 757–769. – DOI: 10.1007/s11182-018-1457-8.

2. Induced superconductivity in the quantum spin Hall edge / S. Hart, H. Ren, T. Wagner, P. Leubner, M. Mühlbauer, C. Brüne, H. Buhmann, L.W. Molenkamp, A. Yacoby // Nature Physics. – 2014. – Vol. 10. – P. 638–643. – DOI: 10.1038/nphys3036.
3. Photonic simulation of topological excitations in metamaterials / W. Tan, Y. Sun, H. Chen, S.-Q. Shen // Scientific Reports. – 2014. – Vol. 4. – P. 3842. – DOI: 10.1038/srep03842.
4. **Wells B.M., Zayats A.V., Podolskiy V.A.** Nonlocal optics of plasmonic nanowire metamaterials // Physical Review B. – 2014. – Vol. 89. – P. 035111. – DOI: 10.1103/PhysRevB.89.035111.
5. Purcell effect in Hyperbolic Metamaterial Resonators / A.P. Slobozhanyuk, P. Ginzburg, D.A. Powell, I. Iorsh, A.S. Shalin, P. Segovia, A.V. Krasavin, G.A. Wurtz, V.A. Podolskiy, P.A. Belov, A.V. Zayats // Physical Review B. – 2015. – Vol. 92. – P. 195127. – DOI: 10.1103/PhysRevB.92.195127.
6. Photonic topological insulators / A.B. Khanikaev, S. Hossein Mousavi, W.-K. Tse, M. Kargarian, A.H. MacDonald, G. Shvets // Nature Materials. – 2013. – Vol. 12. – P. 233–239. – DOI: 10.1038/nmat3520.
7. Temperature-dependent optical properties of plasmonic titanium nitride thin films / H. Reddy, U. Guler, Zh. Kudyshev, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev, A. Boltasseva // ACS Photonics. – 2017. – Vol. 4, N 6. – P. 1413–1420. – DOI: 10.1021/acsphotonics.7b00127.
8. Nonlocal effects in transition hyperbolic metamaterials / B. Wells, Zh.A. Kudyshev, N. Litchinitser, V.A. Podolskiy // ACS Photonics. – 2017. – Vol. 4, N 10. – P. 2470–2478. – DOI: 10.1021/acsphotonics.7b00690.
9. **Антонова А.М., Воробьев А.В., Ляликов Б.А.** К выбору материалов для нетрадиционной тепловой изоляции оборудования ТЭС и АЭС // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докладов 14 Всероссийской научно-технической конференции, 9–11 декабря 2008 г. – Томск, 2008. – С. 59–62.
10. Плотность и содержание воды в кристаллах триглицинсульфата / О.Б. Яценко, И.Г. Чудотворцев, Ж.Д. Стеханова, С.Д. Миловидова, О.В. Рогазинская // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2002. – № 2. – С. 117–121.
11. Свойства нанопористого оксида алюминия с включениями триглицинсульфата и сегнетовой соли / О.В. Рогазинская, С.Д. Миловидова, А.С. Сидоркин, В.В. Чернышев, Н.Г. Бабичева // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, № 7. – С. 1430–1432.
12. Three-terminal ferroelectric synapse device with concurrent learning function for artificial neural networks / Y. Kaneko, Y. Nishitani, H. Tanaka, M. Ueda, Y. Kato, E. Tokumitsu, E. Fujii // Journal Applied Physics Reviews. – 2012. – Vol. 111. – P. 124108. – DOI: 10.1063/1.4729915.
13. Ferroelectric-gate field effect transistor memories: device physics and applications / ed. by B-E. Park, H. Ishiwara, M. Okuyama, Sh. Sakai, S-M. Yoon. – Dordrecht: Springer, 2016. – 347 p. – (Topics in applied physics; vol. 131).
14. Non-linear electro-physical phenomena in dielectrics with a complicated crystal structure / V.A. Kalytka, A.V. Bashirov, A.D. Mekhtiev, A.V. Yurchenko // Russian Physics Journal. – 2020. – Vol. 63, N 2. – P. 282–289. – DOI: 10.1007/s11182-020-02033-3.
15. **Kalytka V.A, Korovkin M.V.** Proton conductivity. – Germany: Lap lambert Academic Publishing, 2015. – 180 p.
16. **Kalytka V.A., Korovkin M.V.** Quantum effects at a proton relaxation at low temperatures // Russian Physics Journal. – 2016. – Vol. 59, N 7. – P. 994–1001. – DOI: 10.1007/s11182-016-0865-x.
17. Зонная структура энергетического спектра и волновые функции протона в диэлектриках с протонной проводимостью / В.А. Калытка, З.К. Баймуханов, А.И. Алиферов, А.Д. Мехтиев // Доклады АН ВШ РФ. – 2017. – № 2 (35). – С. 18–31. – DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-18-31.
18. Математическое описание квантовой туннельной поляризации в протонных полупроводниках и диэлектриках / В.А. Калытка, А.И. Алиферов, А.Д. Мехтиев, Т.Ю. Нико-

нова // Доклады АН ВШ РФ. – 2018. – № 3 (40). – С. 7–25. – DOI: 10.17212/1727-2769-2018-3-7-25.

19. **Калытка В.А.** Разработка схемы численного расчета параметров нелинейных электрофизических процессов методом минимизации функции сравнения // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. – 2018. – № 3. – С. 68–77. – DOI: 10.17238/issn2226-8812.2018.3.68-77.
20. Methods of theoretical researches the properties of electrotechnical materials class of dielectrics with hydrogen bonds / V.A. Kalytka, A.V. Bashirov, A.V. Taranov, G.G. Tatkeyeva, Y.G. Neshina, Y.A. Sidorina // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2019. – Vol. 16, N 7. – P. 2799–2804. – DOI: 10.1166/jctn.2019.8130.
21. **Калытка В.А.** Математическое описание нелинейной релаксационной поляризации в диэлектриках с водородными связями // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 71–83. – DOI: 10.18287/2541-7525-2017-23-3-71-83.
22. Quantum-mechanical model of thermally stimulated depolarization in layered dielectrics at low temperatures / V.A. Kalytka, M.V. Korovkin, P.Sh. Madi, B.K. Magauin, A.V. Kalinin, Y.A. Sidorina // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1843. – DOI: 10.1088/1742-6596/1843/1/012011.
23. Dimensional effects in nanosized layers under establishing polarization in hydrogen-bonded crystals / M.P. Tonkonogov, T.A. Kuketaev, K.K. Fazylov, V.A. Kalytka // Russian Physics Journal. – 2005. – Vol. 48, N 11. – P. 1110–1119.
24. Электрические свойства корундо-циркониевой керамики / Ю.М. Анненков, А.С. Ивашутенко, И.В. Власов, А.В. Кабышев // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 35–38.
25. **Абрикосов А.А.** Резонансное туннелирование в высокотемпературных сверхпроводниках // Успехи физических наук. – 1998. – Т. 168, № 6. – С. 683–695. – DOI: 10.3367/UFNr.0168.199806i.0683.
26. Прыжковый перенос дырок в керамических образцах $CuCrO_2$, легированного магнием / В.Г. Кытин, В.А. Кульбачинский, Д.Ю. Кондратьева, А.В. Павликов, А.Н. Григорьев, А.С. Манкевич, И.Е. Корсаков // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2018. – № 1. – Ст. 1810501. – С. 1–5.
27. Моделирование протонного транспорта в ортоиодной и ортотеллуровой кислотах и их солях / Т.С. Зюбина, Г.В. Шилов, Ю.А. Добровольский, Л.С. Леонова, А.М. Мебель // Электрохимия. – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 414–424.
28. Компоненты тензора нелинейных восприимчивостей третьего порядка нелинейно-оптических кристаллов KDP, DKDP и $LiNbO_3$ / И.А. Кулагин, Р.А. Ганеев, Р.И. Тугушев, А.И. Ряснянский, Т. Усманов // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 7. – С. 657–662.
29. **Белоненко М.Б.** Особенности нелинейной динамики лазерного импульса в фоторефрактивном сегнетоэлектрике с водородными связями // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25, № 3. – С. 255–258.
30. **Струков Б.А., Леванюк А.П.** Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1995. – 301 с.
31. **Хуснулина А.Л., Воскобойникова О.Б.** Автоматизированная система сбора и визуализации технологических данных в производстве полупроводниковых приборов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 100–110. – DOI: 10.25205/1818-7900-2017-15-3-100-110.
32. **Кротов К.В.** Градиентный метод формирования динамических расписаний обработки данных в конвейерной системе при различных моментах времени их поступления // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2016. – Т. 14, № 1. – С. 39–60.
33. Патент 2348045 Российская Федерация. Многофункциональное устройство для исследования физико-технических характеристик полупроводников, диэлектриков и электроизоляционных материалов / Тимохин В.М.; Патентообладатель: ФГБОУ ВПО

«Российская морская государственная академия имени адмирала Ф.Ф. Ушакова». – № 2007116909/28; заявл. 04.05.2007; опубл. 27.02.2009, Бюл. № 6.
34. Минимизация времени простоя процессов при их миграции в облачном хостинге / П.О. Тихомиров, П.В. Емельянов, Н.С. Плотник, А.В. Зырянов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 112–120.
35. **Иванов В.Н.** Численные методы исследования механических систем с дополнительными связями // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2015. – Т. 31, № 4. – С. 16–27.
36. **Солодушкин А.И., Кибиткин В.В., Плешанов В.С.** Модифицированный алгоритм расчета поля векторов смещений для оценки деформации // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318, № 5. – С. 16–27.

QUANTUM PROPERTIES OF DIELECTRIC LOSSES IN NANOMETER LAYERS OF SOLID DIELECTRICS AT ULTRA-LOW TEMPERATURES

Kalytka V.A.[1], Aliferov A.I.[2], Korovkin M.V.[3,4], Mehtiyev A.D.[4,5], Madi P.Sh.[1,4]
[1] *Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan*
[2] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*
[3] *Tomsk State University, Tomsk, Russia*
[4] *Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*
[5] *S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan*

Using the methods of quasi-classical kinetic theory, continuum electrodynamics, and non-relativistic quantum theory, we construct and study the quantum kinetic equation of proton relaxation, which, together with the Poisson operator equation describes the mechanism of diffusion tunneling transport of hydrogen ions (protons) in the potential field of a crystal lattice perturbed by a polarizing field (quantum diffusion polarization) in crystals with hydrogen bonds. Using the apparatus of the density matrix (statistical matrix), by complete quantum-mechanical averaging of the polarization operator, studies are carried out of the experimental value of the polarization of the dielectric, as a function of the parameters of the external electric field (amplitude, frequency of electromotive force) and temperature. When calculating the equilibrium density matrix for an ensemble of basic relaxers (hydrogen ions), the proton-proton and proton-phonon interactions are not taken into account, and the Hamilton operator for the phonon subsystem is assumed to be a numerical constant for a given crystal under given experimental conditions (calculated by computer method as a parameter for comparing the theory with the experiment). The influence of the phonon subsystem on the kinetics of the relaxation process is reduced to a weak spatially homogeneous force field acting on protons moving in the field of the main forces of hydrogen bonds. The Hamilton of the proton subsystem is constructed for the model of an ideal proton gas in equilibrium with the ionic subsystem of the crystal lattice, and the equilibrium statistical operator of the proton subsystem is written using the Boltzmann quantum statistics. Theoretically, the size effects are found to be manifested in shifts of the low-temperature (50–100 K) maxima of the dielectric loss angle tangent towards ultra-low temperatures (4–25 K) with a decrease in the amplitudes of the maxima by 3-4 orders of magnitude, with a reduction in the thickness of the crystal layer from 1–10 microns to 1–10 nm. The effect of anomalous displacements of low-temperature maxima, which is explained by the abnormally high quantum transparency of the potential barrier for protons (0.8-0.9) in thin films of a crystal with hydrogen bonds (1-10 nm), causes, near the temperatures of the shifted maxima of dielectric losses (4–25 K), a quasi-ferroelectric state, which is also characterized by abnormally high values of the real component of the complete dielectric permittivity (2.5–3.5millions).

Keywords: crystals with hydrogen bonds; nonlinear quantum polarization; proton tunneling in hydrogen-bonded crystals; quantum transparency of the potential barrier for protons; ensemble of non-interacting protons; ferroelectrics with hydrogen bonds; quasi-ferroelectric state.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-14-33

REFERENCES

1. Kalytka V.A., Korovkin M.V., Mekhtiev A.D., Yurchenko A.V. Non-linear polarizing effects in dielectrics with hydrogen bonds. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 757–769. DOI: 10.1007/s11182-018-1457-8.
2. Hart S., Ren H., Wagner T., Leubner P., Mühlbauer M., Brüne C., Buhmann H., Molenkamp L.W., Yacoby A. Induced superconductivity in the quantum spin Hall edge. *Nature Physics*, 2014, vol. 10, pp. 638–643. DOI: 10.1038/nphys3036.
3. Tan W., Sun Y., Chen H., Shen S.-Q. Photonic simulation of topological excitations in metamaterials. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, p. 3842. DOI: 10.1038/srep03842.
4. Wells B.M., Zayats A.V., Podolskiy V.A. Nonlocal optics of plasmonic nanowire metamaterials. *Physical Review B*, 2014, vol. 89, p. 035111. DOI: 10.1103/PhysRevB.89.035111.
5. Slobozhanyuk A.P., Ginzburg P., Powell D.A., Iorsh I., Shalin A.S., Segovia P., Krasavin A.V., Wurtz G.A., Podolskiy V.A., Belov P.A, Zayats A.V. Purcell effect in Hyperbolic Metamaterial Resonators. *Physical Review B*, 2015, vol. 92, p. 195127. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.195127.
6. Khanikaev A.B., Hossein Mousavi S., Tse W.-K., Kargarian M., MacDonald A.H., Shvets G. Photonic topological insulators. *Nature Materials*, 2013, vol. 12, pp. 233–239. DOI: 10.1038/nmat3520.
7. Reddy H., Guler U., Kudyshev Zh., Kildishev A.V., Shalaev V.M., Boltasseva A. Temperature-dependent optical properties of plasmonic titanium nitride thin films. *ACS Photonics*, 2017, vol. 4, no. 6, pp. 1413–1420. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b00127.
8. Wells B., Kudyshev Zh.A., Litchinitser N., Podolskiy V.A. Nonlocal effects in transition hyperbolic metamaterials. *ACS Photonics*, 2017, vol. 4, no. 10, pp. 2470–2478. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b00690.
9. Antonova A.M., Vorob'ev A.V., Lyalikov B.A. [To the choice of materials for non-traditional thermal insulation of TPP and NPP equipment]. *Energetika: ekologiya, nadezhnost', bezopasnost': materialy dokladov 14 Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Materials of the fourteenth All-Russian Scientific and Technical Conference "Energy: Ecology, Reliability, Safety"], Tomsk, 9–11 December, 2008, pp. 59–62. (In Russian).
10. Yacenko O.B., Chudotvortsev I.G., Stekhanova G.D., Milovidova S.D., Rogasinskaya O.V. Plotnost' i soderzhanie vody v kristallakh triglitsinsul'fata [Densuty and contents of water in tryglycinsulfate crystals]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2002, no. 2, pp. 117–121.
11. Rogazinskaya O.V., Milovidova S.D., Sidorkin A.S., Chernyshev V.V., Popravko N.G. Svoistva nanoporistogo oksida alyuminiya s vklyucheniyami triglitsinsul'fata i segnetovoi soli [Properties of nanoporous aluminum oxide with triglycine sulfate and rochelle salt inclusions]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 2009, vol. 51, no. 7, pp. 1430–1432. (In Russian).
12. Kaneko Y., Nishitani Y., Tanaka H., Ueda M., Kato Y., Tokumitsu E., Fujii E. Three-terminal ferroelectric synapse device with concurrent learning function for artificial neural networks. *Journal Applied Physics Reviews*, 2012, vol. 111, p. 124108. DOI: 10.1063/1.4729915.
13. Park B-E., Ishiwara H., Okuyama M., Sakai Sh., Yoon S-M., eds. *Ferroelectric-gate field effect transistor memories*: *device physics and applications*. Dordrecht, Springer, 2016. 347 p.
14. Kalytka V.A., Bashirov A.V., Mekhtiev A.D., Yurchenko A.V. Non-linear electro-physical phenomena in dielectrics with a complicated crystal structure. *Russian Physics Journal*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 282–289. DOI: 10.1007/s11182-020-02033-3.

15. Kalytka V.A., Korovkin M.V. *Proton conductivity*. Germany, Lap lambert Academic Publishing, 2015. 180 p.
16. Kalytka V.A., Korovkin M.V. Quantum effects at a proton relaxation at low temperatures. *Russian Physics Journal*, 2016, vol. 59, no. 7, pp. 994–1001. DOI: 10.1007/s11182-016-0865-x.
17. Kalytka V.A., Baimukhanov Z.K., Aliferov A.I., Mekhtiev A.D. Zonnaya struktura energeticheskogo spektra i volnovye funktsii protona v dielektrikakh s protonnoi provodimost'yu [Zone structure of energy spectrum and wave functions of proton in proton conductivity dielectrics]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 2 (35), pp. 18–31. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-18-31.
18. Kalytka V.A., Aliferov A.I., Mekhtiev A.D., Nikonova T.Yu. Matematicheskoe opisanie kvantovoi tunnel'noi polyarizatsii v protonnykh poluprovodnikakh i dielektrikakh [Mathematical description of quantum tunneling polarization in proton semiconductors and dielectrics]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 3 (40), pp. 7–25. DOI: 10.17212/1727-2769-2018-3-7-25.
19. Kalytka V.A. Razrabotka skhemy chislennogo rascheta parametrov nelineinykh elektrofizicheskikh protsessov metodom minimizatsii funktsii sravneniya [Investigating the scheme of numerical calculation the parameters of non-linear electrophysical processes by minimizing comparison function method]. *Prostranstvo, vremya i fundamental'nye vzaimodeistviya = Space, time, and fundamental interactions*, 2018, no. 3, pp. 68–77. DOI: 10.17238/issn2226-8812.2018.3.68-77.
20. Kalytka V.A., Bashirov A.V., Taranov A.V., Tatkeyeva G.G., Neshina Y.G., Sidorina Y.A. Methods of theoretical researches the properties of electrotechnical materials class of dielectrics with hydrogen bonds. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2019, vol. 16, no. 7, pp. 2799–2804. DOI: 10.1166/jctn.2019.8130.
21. Kalytka V.A. Matematicheskoe opisanie nelineinoi relaksatsionnoi polyarizatsii v dielektrikakh s vodorodnymi svyazyami [Mathematical description of non-linear relaxation polarization in dielectrics with hydrogen bonds]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya = Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 71–83. DOI: 10.18287/2541-7525-2017-23-3-71-83.
22. Kalytka V.A., Korovkin M.V., Madi P.Sh., Magauin B.K., Kalinin A.V., Sidorina Y.A. Quantum-mechanical model of thermally stimulated depolarization in layered dielectrics at low temperatures. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1843. DOI: 10.1088/1742-6596/1843/1/012011.
23. Tonkonogov M.P., Kuketaev T.A., Fazylov K.K., Kalytka V.A. Dimensional effects in nanosized layers under establishing polarization in hydrogen-bonded crystals. *Russian Physics Journal*, 2005, vol. 48, no. 11, pp. 1110–1119.
24. Annenkov Yu.M., Ivashutenko A.S., Vlasov I.V., Kabishev A.V. Elektricheskie svoistva korundo-tsirkonievoi keramiki [Electrical properties of corundum-zirconium ceramics]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 35–38.
25. Abrikosov A.A. Rezonansnoe tunnelirovanie v vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikakh [Resonant tunneling in high-T_c superconductors]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 1998, vol. 168, no. 6, pp. 683–695. DOI: 10.3367/UFNr.0168.199806i.0683. (In Russian).
26. Kytin V.G., Kulbachinskii V.A., Kondratieva D.Yu., Pavlikov A.V., Grigoriev A.N., Mankevich A.S., Korsakov I.E. Pryzhkovyi perenos dyrok v keramicheskikh obraztsakh $CuCrO_2$, legirovannogo magniem [Hopping transport of holes in $CuCrO_2$ ceramic samples doped with magnesium]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta = Moscow University Physics Bulletin*, 2018, no. 1, art. 1810501, pp. 1–5.

27. Zubina T.S., Shilov G.V., Dobrovol'skii Yu.A., Leonova L.S., Mebel' A.M. Modelirovanie protonnogo transporta v ortoiodnoi i ortotellurovoi kislotakh i ikh solyakh [Modeling of proton transport in orthoiodic and orthotelluric acids and their salts]. *Elektrokhimiya = Electrochemistry*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 414–424.
28. Kulagin I.A., Ganeev R.A., Tugushev R.I., Rasnianskii A.I., Usmanov T. Komponenti tenzora nelineinih vospriimchivostei tretego poriiadka nelineino-opticheskih kristallov KDP,DKDP и $LiNbO_3$ [Components of the third-order nonlinear susceptibility tensors in KDP, DKDP and LiNbO3 nonlinear optical crystals]. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 2004, vol. 34, no. 7, pp. 657–662. (In Russian).
29. Belonenko M.B. Osobennosti nelineinoi dinamiki lazernogo impul'sa v fotore-fraktivnom segnetoelektrike s vodorodnymi svyazyami [Features of nonlinear dynamics of a laser pulse in a photorefractive ferroelectric with hydrogen bonds]. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 1998, vol. 25, no. 3, pp. 255–258. (In Russian).
30. Strukov B.A., Levanyuk A.P. *Fizicheskie osnovy segnetoelektricheskikh yavlenii v kristallakh* [Physical basis of ferroelectric phenomena in crystals]. *Moscow,* Nauka Publ., 1995. 301 p.
31. Khusnullina A.L., Voskoboynikova O.B. Avtomatizirovannaya sistema sbora i vi-zualizatsii tekhnologicheskikh dannykh v proizvodstve poluprovodnikovykh priborov [Automated system of collection and visualization of technological data in production of semiconductor devices]. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 100–110. DOI: 10.25205/1818-7900-2017-15-3-100-110.
32. Krotov K.V. Gradientnyi metod formirovaniya dinamicheskikh raspisanii obrabotki dannykh v konveiernoi sisteme pri razlichnykh momentakh vremeni ikh postupleniya [A gradient method for generating dynamic schedules for processing data in a pipeline system at different points in time of their receipt]. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 39–60.
33. Timokhin V.M. *Mnogofunktsional'noe ustroistvo dlya is-sledovaniya fiziko-tekhnicheskikh kharakteristik poluprovodnikov, dielektrikov i elektro-izolyatsionnykh materialov* [Multifunction device to analyse physical-and-chemical properties of semiconductors, dielectrics and insulating materials]. Patent RF, no. 2348045, 2009.
34. Tikhomirov P.O., Emelyanov P.V., Plotnik N.S., Zirianov A.V. Minimizatsiya vremeni prostoya protsessov pri ikh migratsii v oblachnom khostinge [Minimizing the downtime of processes during their migration to cloud hosting]. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer science*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 112–120.
35. Ivanov V.N. Chislennye metody issledovaniya mekhanicheskikh sistem s dopolnitel'nymi svyazyami [Numerical methods for the study of mechanical systems with additional constraints]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of the Perm University. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science*, 2015, T. 31, №4, c. 16–27.
36. Ivanov V.N. Chislennye metody issledovaniya mekhanicheskikh sistem s dopolnitel'nymi svyazyami // *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika*. – 2015. – T. 31, № 4. – S. 16–27.
37. Solodushkin A.I., Kibitkin V.V., Pleshanov V.S. Modifitsirovannyi algoritm rascheta polya vektorov smeshchenii dlya otsenki deformatsii [A modified algorithm for calculating the displacement vector field for strain estimation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 48–51.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Калытка Валерий Александрович – родился в 1976 году, канд. физ.-мат. наук (01.04.07 – физика конденсированного состояния), доктор PhD (по направлению 6D060400 – физика), доцент, доцент кафедры энергетических систем Карагандинского технического университета. Область научных интересов: теоретическая и математическая физика; физика твердого тела; физика диэлектриков; физика конденсированного состояния. Опубликовано более 170 научных работ, в том числе 3 монографии и 3 патента на изобретение. (Адрес: 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, д. 56. E-mail: valerii.kalytka@gmail.com).

Kalytka Valery Aleksandrovich (b. 1976) – Candidate of Sciences (Phys.&Math. – Condensed Matter Physics), Doctor of Philosophy (Phys.), associate professor in Physics, associate professor at “Power engineering systems” department in Karaganda technical university (KTU). His research interests are currently focused on Theoretical and Mathematical Physics, Solid State Physics, Physics of Dielectrics and Physics of Condensed Media. He is author of 170 scientific papers, including 3 monographs and 3 Patents for the Invention. (Address: 56, Nursultan Nazarbayev Av., Karaganda, 100027 Republic of Kazakhstan. E-mail: valerii.kalytka@gmail.com).

Алиферов Александр Иванович – родился в 1956 году, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Область научных интересов: ресурсосберегающие электротехнологии. Опубликовано более 200 научных трудов, в том числе 6 монографий. (Адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: aliferov@corp.nstu.ru).

Aliferov Alexander Ivanovich (b. 1956) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department "Automated Electrotechnological Installations" of the Novosibirsk State Technical University (NSTU). Research interests: resource-saving electrical technologies. More than 200 scientific papers, including 6 monographs, have been published. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: aliferov@corp.nstu.ru).

Коровкин Михаил Владимирович – родился в 1952 году, д-р физ.-мат. наук (01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков), профессор кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений (ГРНМ) Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Область научных интересов: физика твердого тела; физика диэлектриков; физика конденсированного состояния; физические методы исследования минералов; геофизика и геология. Опубликовано более 180 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: mvk@tpu.ru).

Korovkin Mikhail Vladimirovich (b. 1952) – Doctor of Sciences (Phys.&Math. – physics of semiconductors and dielectrics), Professor of the Department of Geology and Development of Oil Fields of the Institute of Natural Resources of the National Research Tomsk Polytechnic University. Research interests: solid state physics; physics of dielectrics; condensed matter physics; physical methods of mineral research; geophysics and geology. More than 180 scientific papers have been published. (Address: 30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: mvk@tpu.ru).

Мехтиев Али Джаванширович – родился в 1972 году, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации электрооборудования Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. Научный сотрудник Национального исследовательского Томского политехнического университета. Область научных интересов: энергетика, телекоммуникация, машиностроение, металлургия, возобновляемые источники энергии. Опубликовано 362 научные работы. (Адрес: 010011, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, пр. Женис, д. 62. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Mehtiyev Ali Djavanshirovich (b. 1972) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, department of Electrical Equipment Operation, Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin. Researcher at the National Research Tomsk Polytechnic University. His research interests are currently focused on energy, telecommunications, mechanical engineering, metallurgy, renewable energy sources. He is author of 362 scientific papers. (Address: 62, Zhenis Av., Nur-Sultan, 010011, Republic of Kazakhstan. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Мади Перизат Шаймуратовна – родилась в 1980 году, магистр электроэнергии, старший преподаватель кафедры энергетических систем Карагандинского технического университета. Аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета. Область научных интересов: энергетика, телекоммуникация, оптика, фотоника. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, д. 56. E-mail: perizat1@mail.tpu).

Madi Perizat Shaimuratovna (b. 1980) – Master of Electricity, Senior Lecturer of the Department of Energy Systems, Karaganda Technical University. Post-graduate student of the National Research Tomsk Polytechnic University. Research interests: energy, telecommunications, optics, photonics. He is author of 10 scientific papers. (Address: 56, Nursultan Nazarbayev Av., Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan. E-mail: perizat1@mail.tpu).

Статья поступила 11 июня 2021 г.
Received June 11, 2021

To Reference:

Kalytka V.A., Aliferov A. I., Korovkin M.V., Mehtiyev A.D., Madi P.Sh. Kvantovye svoistva dielektricheskikh poter' v nanometrovykh sloyakh tverdykh dielektrikov pri sverkhnizkikh temperaturakh [Quantum properties of dielectric losses in nanometer layers of solid dielectrics at ultra-low temperatures]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 2 (51), pp. 14–33. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-14-33.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 апрель–июнь № 2 (51)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 519.8

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ДАННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБЛАЧНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В.И. Мейкшан[1], Н.Б. Тесля[2]
[1] *Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики*
[2] *Сибирский университет потребительской кооперации*

Преимущества использования облачных технологий очевидны, их применение расширяется, что определяет неуклонный рост спроса. Особенную актуальность облачные вычисления приобрели для крупных компаний, работающих в сфере интернет-услуг, ритейла, логистики и генерирующих большие объемы деловой и прочей информации. Применение облачных технологий позволяет организовать совместное потребление ресурсов, решить проблемы хранения и передачи весомых объемов данных. Потребительская кооперация России относится к таким крупным, территориально распределенным организациям, активно формирующим собственную цифровую экосистему. Вопрос хранения и обработки данных для организаций потребительской кооперации очень актуален. При этом цены у поставщиков облачных услуг существенно различны, и требуется решать задачу минимизации затрат на хранение и передачу значительных объемов данных. Для выбора оптимальной схемы хранения данных у нескольких поставщиков облачных сервисов при разных технико-экономических параметрах пакета предоставляемых услуг (максимальный объем хранилища, стоимость выделяемых ресурсов) рассматривается применение метода линейного программирования. Математическая модель включает в себя уравнение расходов по хранению и передаче данных с рядом ограничений по объему хранилища, объему данных и их сохранности. В качестве программного инструмента, позволяющего выполнить численные расчеты, выбран Microsoft Excel в сочетании с надстройкой «Поиск решения». В соответствии с математической моделью установлены условие минимизации величины затрат на облачное хранение и необходимые ограничения. Исходные данные задачи заданы для трех центров формирования данных, определенных размеров хранилищ у пяти провайдеров облачных услуг и условных цен на услуги хранения и передачи информации. Расчеты затрат выполнены в нескольких вариантах: без оптимизации, с решением оптимизационной задачи, а также при повышении цен у поставщиков облачных сервисов. Результаты расчетов подтверждают необходимость решения задачи минимизации затрат на облачные услуги для корпоративных клиентов. Представленную модель можно расширить под любые условия затрат, а также для разных сфер применения облачных сервисов.

Ключевые слова: облачные технологии, облачные вычисления, облачный сервис, облачное хранилище, хранение данных, математическая модель оптимизации затрат, линейное программирование, симплекс-метод, потребительская кооперация, потребительские общества.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-34-42

Введение

Согласно исследованиям делового портала TAdviser [1] в 2020 г. на российском рынке наблюдался взрывной спрос на облачные сервисы, и он продолжает расти. Крупнейшими поставщиками облачных услуг для корпоративной сферы являются всемирно известные компании Amazon, Microsoft, Google, а также рос-

© 2021 В.И. Мейкшан, Н.Б. Тесля

сийские провайдеры МТС, КРОК и другие. В России продукция лидеров «облачного» рынка наиболее востребована в сфере интернет-услуг, телекоммуникаций, в розничной торговле, в секторе транспорта и логистики, в банковской сфере.

В сферу деятельности российской потребительской кооперации, представляющей собой социально-ориентированную экосистему с чрезвычайно разветвленной структурой, также входят торговля, закупки, логистика, заготовки, общепит и др. Следовательно, в применении облачных технологий для потребительских обществ и их союзов, представленных в 71 регионе России, заложен высокий потенциал для развития.

Облачные вычисления являются основой концепции совместного потребления информационных технологий и ресурсов. Обычно использованием облачных хранилищ решают проблему дистанционного хранения и обработки больших объемов данных без приобретения и обслуживания дорогостоящего оборудования, лицензий на программное обеспечение.

Существует множество схем ценообразования для облачных услуг, которые предлагают провайдеры. Чаще всего основу тарифа составляют стоимость хранения данных (на почасовой основе или за месяц) и исходящий трафик (скачивание данных). При этом увеличение объема данных приводит к увеличению стоимости облачных услуг. Однако при наличии довольно большого рынка облачных услуг и различия в стоимости этих услуг потребителям целесообразно решать задачу минимизации затрат на облачное хранение-передачу данных.

Хранение и обмен большими объемами информации актуальны для потребительской кооперации, особенно при взаимодействии Центросоюза, главного координирующего органа, с районными потребсоюзами, география которых представлена от Мурманска до Камчатки. Последние годы огромное внимание уделяется созданию цифровой кооперативной экосистемы. Активно проводимые процессы цифровизации способствуют существенному увеличению объема информации, поэтому вопрос снижения издержек по операциям с данными очень актуален.

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим математическую модель и численные результаты ее реализации по оптимизации затрат при хранении данных с помощью облачных сервисов. Один из подходов к решению рассматриваемой задачи предложен ранее в работах [3–5] для создания киберинфраструктуры, обеспечивающей хранение и интеграцию данных для системы государственного мониторинга водных ресурсов [2].

1. Постановка задачи

Целью исследования является реализация математической модели, основанной на методе линейного программирования, для минимизации затрат при хранении и передаче облачных данных.

Установим релевантные факторы и условия для создания математической модели оптимизации затрат. Предполагается, что задан конечный набор N гетерогенных источников данных, причем ожидаемый объем данных от i -го источника $(i=\overline{1,N})$ равен ν_i. Поступающие данные планируется накапливать в облачных хранилищах нескольких провайдеров. Из совокупности M поставщиков облачных сервисов каждый j-й провайдер $(j=\overline{1,M})$ может предоставить хранилище данных стоимостью C_j за единицу данных при максимальном объеме хранилища, не превышающем V_i. Затраты на передачу единицы данных от i-го источника

$(i=\overline{1,N})$ до хранилища для *j*-го провайдера $(j=\overline{1,M})$ оцениваются величиной a_{ij}. Задача состоит в том, чтобы найти оптимальное распределение $\{x_{ij} : i=\overline{1,N}; j=\overline{1,M}\}$, где x_{ij} – объем данных, которые относятся к *i*-му источнику и будут размещаться в хранилище *j*-го провайдера.

Для решения поставленной задачи используем метод линейного программирования. Он широко применяется для решения управленческих задач, которые связаны с оптимизацией, минимизацией затрат и получением экономии.

Общая стоимость затрат (S) включает в себя расходы на хранение (S_1) и затраты на передачу (S_2) данных:

$$S = S_1 + S_2 = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} x_{ij}C_j + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} x_{ij}a_{ij} .$$

Отсюда вытекает следующая математическая формулировка оптимизационной задачи:

$$S = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} (C_j + a_{ij})x_{ij} \to \min. \quad (1)$$

Определим ряд дополнительных ограничений:

1) объем данных от i-го источника, размещаемых у *j*-го провайдера, не может быть отрицательным, т. е.

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i=\overline{1,N}; j=\overline{1,M}); \quad (2)$$

2) все данные, которые порождаются i-м источником, должны сохраняться в полном объеме, т. е.

$$\sum_{j=1}^{M} x_{ij} = \nu_i \quad (i=\overline{1,N}); \quad (3)$$

3) общий объем данных, которые можно разместить у *j*-го провайдера, не должен превышать емкости его хранилища, т. е.

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ij} = V_j \ (j=\overline{1,M}) . \quad (4)$$

Аналогичная по смыслу задача сформулирована в [3–5] как задача бинарного линейного программирования. В этом случае блок данных от каждого источника считается неделимым элементом, и схема их распределения становится менее гибкой. Кроме того, при такой постановке получается задача, которая относится к NP-полным задачам, и ее решение сопряжено с существенными вычислительными сложностями. К примеру, стандартные алгоритмы линейного программирования приходится использовать в сочетании с методом ветвей и границ.

В отличие от этого задача (1)–(4) принадлежит к классу транспортных задач линейного программирования. В арсенале современной вычислительной математики имеются эффективные и быстродействующие методы точного решения подобных задач, причем многие из этих методов доведены до программной реализации и входят в состав различных пакетов прикладных программ.

2. Результаты исследования

В качестве программного обеспечения для реализации модели оптимизации затрат выбрано офисное приложение MS Excel с использованием надстройки «Поиск решения».

Считаем, что информация, предназначенная для облачного хранения, формируется в трех региональных центрах (источниках данных, которые расположены в разных регионах России): центр А, центр Б и центр В. Минимальная единица тарификации имеет определенный физический объем, обычно 1 ГБ. Для примера объемы данных для облачного хранения распределяются между источниками следующим образом: центр А – 300 ГБ, центр Б – 500 ГБ, центр В – 200 ГБ.

Поскольку именно затраты на передачу данных будут существенно различаться у разных провайдеров для выбранных центров, находящихся в разных регионах страны, то стоимость хранения у всех поставщиков облачных хранилищ для расчетов установим постоянную и одинаковую, равную одной условной денежной единице (у. д. е.) за единицу тарификации в месяц. Стоимость передачи данных за единицу у разных провайдеров (их имена представлены исключительно для удобства восприятия информации) для цели представления методологического подхода взяты произвольно (табл. 1). Подобная информация предоставляется поставщиками услуг.

Таблица 1 / Table 1

Стоимость передачи данных у различных провайдеров для региональных центров
The cost of data transmission from different providers for regional centers

Центр	Объем данных, ГБ	Стоимость передачи единицы данных у поставщиков, у. д. е. за 1 ГБ				
		Amazon	Google	Microsoft	МТС	КРОК
А	300	17	7	11	15	14
Б	500	12	9	16	12	12
В	200	14	8	9	7	15

Возможное решение поставленной задачи выбора поставщиков облачных услуг для хранения данных без оптимизации затрат представлено в табл. 2. При этом условия, заданные математической моделью, выполняются. Так, максимальный объем размещения данных в хранилищах не превышает максимальные объемы облачных хранилищ у поставщиков.

Для оптимизации затрат в MS Excel используем функцию «Поиск решения» для линейной задачи симплекс-методом. Симплекс-метод применяется для итерационного решения системы уравнений в области допустимых решений до тех пор, пока целевая функция не достигнет оптимального значения. Выбираем условие минимизации целевой функции (суммарной величины затрат на облачное хранение). Задаем ограничения, определенные в математической модели затрат: неотрицательные значения объемов данных, сохранение объемов данных в полном объеме, отсутствие превышения объема данных емкости хранилища поставщика облачных услуг.

В результате найденного решения объемы хранящихся данных будут автоматически распределены между поставщиками облачных хранилищ в соответствии с ограничениями, как представлено в табл. 3.

Таблица 2 / Table 2

Распределение данных между поставщиками и расчет затрат центров на облачный сервис без оптимизации затрат

Distribution of data between suppliers and calculation of the cost of cloud service centers without cost optimization

Центр	Объем данных, ГБ	Поставщики облачных технологий				
		Amazon	Google	Microsoft	МТС	КРОК
А	300	290	0	0	0	10
Б	500	0	150	350	0	0
В	200	0	0	0	100	100
Итого у поставщика, ГБ		**290**	**150**	**350**	**100**	**110**
Максимальный объем хранилища поставщика, ГБ		290	165	470	162	270
Стоимость хранения 1 ГБ, у. д. е.		1	1	1	1	1
Центр	Всего ГБ	Стоимость передачи данных, у. д. е. за 1 ГБ				
А	300	17	7	11	15	14
Б	500	12	9	16	12	12
В	200	14	8	9	7	15
Расчет затрат на облачные услуги, у. д. е.						
Затраты на передачу	14 220	4930	1350	5600	700	1640
Затраты на хранение	1000	290	150	350	100	110
Всего затрат	**15 220**	5220	1500	5950	800	1750

Таблица 3 / Table 3

Результат оптимизации затрат на использование облачных сервисов с минимизацией искомой функции

The result of optimizing the cost of using cloud services while minimizing the desired function

Центр	Объем данных, ГБ	Поставщики облачных хранилищ				
		Amazon	Google	Microsoft	МТС	КРОК
А	300	0	165	135	0	0
Б	500	290	0	0	0	210
В	200	0	0	38	162	0
Итого у поставщика, ГБ		**290**	**165**	**173**	**162**	**210**
Максимальный объем хранилища поставщика, ГБ		290	165	470	162	270
Стоимость хранения 1 ГБ, у. д. е.		1	1	1	1	1
Центр	Объем данных, ГБ	Стоимость передачи данных, у. д. е. за 1 ГБ				
А	300	17	7	11	15	14
Б	500	12	9	16	12	12
В	200	14	8	9	7	15
Расчет затрат на облачные услуги, у. д. е.						
Затраты на передачу	10 116	3480	1155	1827	1134	2520
Затраты на хранение	1000	290	165	173	162	210
Всего затрат	**11 116**	3770	1320	2000	1296	2730

Для подтверждения работоспособности реализации математической модели в MS Excel выполним оптимизацию затрат при увеличении стоимости передачи

данных. Для этого увеличим стоимость передачи данных для четырех из пяти поставщиков облачных хранилищ. Стоимость передачи данных для хранилища с самым большим объемом (470 ГБ) оставим без изменений (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Оптимизация затрат после увеличения стоимости передачи данных у поставщиков облачных технологий

Cost optimization after increasing the cost of data transmission from cloud providers

Центр	Объем данных, ГБ	Поставщики облачных технологий				
		Amazon	Google	Microsoft	МТС	КРОК
А	300	0	0	300	0	0
Б	500	203	165	132	0	0
В	200	0	0	38	162	0
Итого у поставщика, ГБ		**203**	**165**	**470**	**162**	**0**
Максимальный объем хранилища поставщика, ГБ		290	165	470	162	270
Стоимость хранения 1 ГБ, у. д. е.		1	1	1	1	1
Центр	Объем данных, ГБ	Стоимость передачи данных, у. д. е. за 1 ГБ				
А	300	34	14	11	30	28
Б	500	24	18	16	24	24
В	200	28	16	9	14	30
Расчет затрат на облачные услуги, у. д. е.						
Затраты на передачу	15 864	4872	2970	5754	2268	0
Затраты на хранение	1000	203	165	470	162	0
Всего затрат	**16 864**	5075	3135	6224	2430	0

3. Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что без оптимизации затраты на облачные услуги могут оказаться достаточно высоки. Так, при обычном подходе, согласно расчетам (см. табл. 2), суммарные затраты на хранение и передачу данных из облачного хранилища составят 15 220 у. д. е. Применение симплекс-метода для минимизации суммарных затрат на облачные услуги провайдеров (см. табл. 3) показало, что по сравнению с первым вариантом (см. табл. 2) получена экономия финансовых затрат почти на 27 %. При этом величина суммарных затрат на облачное хранение в результате оптимизации составила 11 116 у. д. е.

После увеличения у провайдеров стоимости передачи данных в два раза наблюдается перераспределение данных по хранилищам поставщиков (см. табл. 4). Как и предполагалось, наибольший объем данных передан поставщику, у которого стоимость передачи данных не изменилась. Благодаря использованию метода суммарная стоимость затрат после распределения составила 16 864 у. д. е., т. е. затраты увеличились по сравнению со вторым вариантом (см. табл. 3) на 52 % при стопроцентном увеличении тарифов большинства провайдеров. При этом отметим, что в случае хранения данных по увеличенным тарифам в первоначальном распределении (см. табл. 2) затраты на облачные услуги составят 19 405 у. д. е., что приведет к удорожанию облачных услуг на 75 %.

Таким образом, полученные результаты свидетельствует о том, что модель оптимизации затрат при принятых ограничениях сформирована корректно. Следовательно, для решения задачи минимизации затрат облачного хранения метод линейного программирования применять целесообразно, особенно при наличии многих переменных (стоимости услуг, центров данных, числа провайдеров).

Заключение

Область применения и возможности облачных технологий очень велики. Хранение и обмен данными с использованием облачных сервисов актуальны для корпоративных клиентов, особенно для структурно разветвленных и территориально распределенных. Преимущества облачных технологий необходимо в полной мере применять для потребительской кооперации, так как ее объем информационных данных, охватывающих различные экономические и социальные сферы (торговлю, образование, науку, здравоохранение и т. д.) весьма велик, а центры формирования этих данных расположены по всей территории России.

При использовании облачных сервисов необходимо грамотно подходить к выбору не только надежных провайдеров, но и к расчетам затрат на использование их услуг. Необходимо определиться с объемами хранения, поставщиками, тарифами облачных хранилищ. Эффективность модели особенно очевидна при выборе нескольких провайдеров с разными тарифами и при наличии многих центров генерации данных. Применение модели позволит без особого труда оптимизировать затраты на использование облачных хранилищ с помощью общераспространенного офисного приложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. TAdviser. Государство. Бизнес. ИТ: web-сайт. – URL: http://www.tadviser.ru (дата обращения: 29.06.2021).
2. Information-centric systems for supporting decision-making in watershed resource development / M. Mocanu, L. Vacariu, R. Drobot, M. Muste // 19th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS). – Bucharest, Romania, 2013. – P. 611–616.
3. **Negru C., Pop F., Cristea V.** Cost optimization for data storage in public clouds: a user perspective // Proceedings of 13th International Conference on Informatics in Economy. – Bucharest, Romania, 2014.
4. Budget constrained selection of cloud storage services for advanced processing in datacenters / C. Negru, F. Pop, O.C. Marcu, M. Mocanu, V. Cristea // 14th International Conference-Networking in Education and Research (RoEduNet NER). – Craiova, Romania, 2015. – P. 158–162.
5. Cost-aware cloud storage service allocation for distributed data gathering / C. Negru, F. Pop, M. Mocanu, V. Cristea, A. Hangan, L. Vacariu // IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR). – Cluj Napoca, Romania, 2016. – P. 1–5.

SELECTION OF OPTIMAL DATA PLACEMENT USING CLOUD INFRASTRUCTURE

Meikshan V.I.[1], Teslya N.B.[2]
[1] *Siberian States University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk, Russia*
[2] *Siberian University of Consumer Cooperation, Novosibirsk, Russia*

Benefits of using cloud technology are obvious, their application is expanding, as a result, it determines the steady growth of demand. Cloud computing has acquired particular relevance for large companies connected with Internet services, retailing, logistics that generate large volume of business and other information. The use of cloud technologies allows organizing the joint consumption of resources, solving the problems of storing and transferring significant amounts of data. Russian consumer cooperation refers to large territory distributed organizations actively forming their own digital ecosystem. The issue of data storing and processing for consumer cooperation organizations is very relevant. At the same time, the prices of cloud service providers are

significantly different and require solving the problem of minimizing the cost of storing and transferring significant amounts of data. The application of the linear programming method is considered to select the optimal data storage scheme for several cloud service providers having different technical and economic parameters of the package (maximum amount of storage, cost of allocated resources). Mathematical model includes the equation of costs for data storing and transferring and restrictions on the amount of storage, the amount of data and its safety. Software tool that allows to perform numerical calculations is selected Microsoft Excel in combination with the "search for solutions" add-on. In accordance with the mathematical model, the conditions for minimizing the amount of cloud storage costs and the necessary restrictions are established. Initial data are set for three data forming centers, storages of certain size for five cloud service providers and nominal price for information storage and transmission. Calculations of expenses are performed in several variants: without optimization, with the solution of the optimization problem, with price increase by cloud service providers. Results of the calculations confirm the necessity to solve the problem of minimizing the cost of cloud services for corporate clients. The presented model can be expanded for any cost conditions as well as for different areas of cloud applications.

Key words: cloud technologies, cloud calculation, cloud service, cloud storage, data storage, mathematical model, optimization of expenses, linear programming, simplex method, consumer cooperation, consumer organizations.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-34-42

REFERENCES

1. TAdviser. Goverment. Business. IT: website. (In Russian). Available at: http://www.tadviser.ru (accessed 29.06.2021).
2. Mocanu M., Vacariu L., Drobot R., Muste M. Information-centric systems for supporting decision-making in watershed resource development. *19th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*, Bucharest, Romania, 2013, pp. 611–616.
3. Negru C., Pop F., Cristea V. Cost optimization for data storage in public clouds: a user perspective. *Proceedings of 13th International Conference on Informatics in Economy*, Bucharest, Romania, 2014.
4. Negru C., Pop F., Marcu O.C., Mocanu M., Cristea V. Budget constrained selection of cloud storage services for advanced processing in datacenters. *14th International Conference-Networking in Education and Research (RoEduNet NER)*, Craiova, Romania, 2015, pp. 158–162.
5. Negru C., Pop F., Mocanu M., Cristea V., Hangan A., Vacariu L. Cost-aware cloud storage service allocation for distributed data gathering. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, Cluj Napoca, Romania, 2016, pp. 1–5.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мейкшан Владимир Иванович – родился в 1949 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматической электросвязи Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов: качество функционирования и надежность мультисервисных сетей связи, распределенные информационные системы, управление сетями связи. Опубликовано более 180 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86. E-mail: meikshanvi@gmail.com).

Meikshan Vladimir Ivanovich (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Professor of the Automatic Electrical Communication Department in the Siberian States University of Telecommunications and Information Sciences. His research interests are currently focused on on dependability and performance of multiservice networks, distributed information systems and telecommunication networks management. He is author of over 180 scientific papers. (Address: 86, Kirova St., Novosibirsk, 630102, Russia. E-mail: meikshanvi@gmail.com).

Тесля Наталья Борисовна – родилась в 1971 году, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой информатики, Сибирский университет потребительской кооперации. Область научных интересов: информационные системы и технологии. Опубликовано 58 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 26. E-mail: teslnb@sibupk.onmicrosoft.com).

Teslya Natalia Borisovna (b. 1971) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science, Siberian University of Consumer Cooperation. His research interests are currently focused on Information systems and technologies. He is author of 58 scientific papers. (Address: 26, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: teslnb@sibupk.onmicrosoft.com).

Статья поступила 30 мая 2021 г.
Received May 30, 2021

To Reference:

Meikshan V.I., Teslya N.B. Vybor optimal'nogo razmeshcheniya dannykh pri ispol'zovanii oblachnoi infrastruktury [Selection of optimal data placement using a cloud infrastructure]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 2 (51), pp. 34–42. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-34-42.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 апрель–июнь № 2 (51)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.316.722.025

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ С ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ В НАКОПИТЕЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ*

А.В. Удовиченко, В.Г. Токарев, Е.В. Гришанов, С.В. Кучак
Новосибирский государственный технический университет

В статье предложено согласующее устройство между аккумуляторной батареей и инвертором напряжения в системах накопления электрической энергии на базе реверсивного преобразователя постоянного напряжения в постоянное с улучшенными массогабаритными и стоимостными показателями. К литий-ионным аккумуляторным батареям предъявляются жесткие требования их эксплуатации. Разряд таких батарей не должен превышать их трехкратную емкость (*C*), тогда как заряд ограничен 0,5*C*, при этом в зарядном токе не должно присутствовать низкочастотных пульсационных составляющих. Эти требования возможно осуществить с помощью предлагаемого согласующего устройства, особенностью которого являются меньшие габариты и стоимость, что достигается за счет блока дросселей. В статье предложен расчет схемы преобразователя и приведены результаты моделирования, полученные в среде имитационного моделирования Psim (the PowerSim environment). Проведена экономическая оценка преобразователя.

Ключевые слова: регулятор, система накопления, аккумулятор, дроссель, пульсация тока.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-43-52

Введение

В настоящее время существует проблема недостатка генерационных мощностей. Зачастую она вызвана увеличением энергопотребления потребителя. В свою очередь ухудшает ситуацию низкое качество потребляемой электрической энергии. Последствиями данной проблемы может стать износ оборудования электростанций и систем распределения, увеличение количества аварийных ситуаций и даже выход из строя оборудования электростанций. Решить эту проблему можно, в том числе за счет введения механизмов распределенной энергетики. Сюда можно отнести распределенную генерацию, управляемую нагрузку и системы накопления энергии (СНЭ), обладающие не только функцией бесперебойной подачи энергии, но и функцией улучшения качества электрической энергии (статический компенсатор). Введение СНЭ с соответствующими алгоритмами в энергосистему позволит повысить качество потребляемой электрической энергии, это подавление высокочастотных пульсаций токов и напряжений, компенсация реактивной мощности, а также ограничение скорости нарастания и сброса мощности нагрузки, введение дополнительных мощностей и собственно накопление энергии в периоды низкой загруженности энергосистемы.

Накопители электрической энергии на базе полупроводниковых преобразователей, работающие в сетях переменного тока 0,4 кВ, позволяют повысить качество потребляемой электрической энергии, снизить расходы на электроэнергию, выровнять график энергопотребления. Накопление в ночное время с учетом

* Настоящее исследование финансировалось за счет гранта Президента Российской Федерации по исследовательскому проекту № МК-2204.2020.8.

© 2021 А.В. Удовиченко, В.Г. Токарев, Е.В. Гришанов, С.В. Кучак

тарифных ставок, которые меньше в это время суток, и разряд накопителя в дневное время также позволит сэкономить денежные средства потребителю ЭЭ [1, 2].

Распространенным типом СНЭ являются накопители с аккумуляторными батареями (АБ). Основными типами АБ являются свинцово-кислотные, никель-кадмиевые и литий-ионные аккумуляторы. При этом литий-ионные аккумуляторы являются наиболее перспективными, так как обладают наибольшей энергоемкостью (100–190 Вт · ч/кг) по сравнению с конкурентами 30 и 60 Вт · ч/кг, соответственно глубокими циклами заряда/разряда (до 70–80 %), отсутствием эффекта памяти. В свою очередь данные АБ крайне критичны к качеству зарядного и разрядного тока, что должно учитываться при разработке конструкции зарядного устройства. Однако следует учесть, что инвертор напряжения топологии Н-мост, в составе накопителя электрической энергии формирующий переменный ток, не может обеспечить предъявляемых требований к качеству зарядно-разрядного тока.

Аккумуляторы заслужили высокую популярность благодаря стационарности, модульности и отсутствию движущихся деталей. Данные достоинства позволяют размещать накопители на их основе в помещениях и на подвижных объектах, формировать системы накопления от единиц ватт-часов до единиц мегаватт-часов.

Как уже было сказано ранее, наиболее перспективными на рынке энергетической сферы и обладающими высокими темпами развития типом аккумуляторов являются литий-ионные аккумуляторы. Благодаря использованию материалов с низким классом токсичности, замене взрывоопасного металлического лития на его соли и применению графитового покрытия анодных пластин данная технология занимает одно из ведущих мест по безопасности среди вторичных источников тока. Преимуществами литий-ионных элементов являются низкая величина внутреннего сопротивления (85–135 мОм · А · ч), высокая циклостойкость (2000–3000 циклов), а также возможность быстрого заряда током до 1*C*, где *C* – номинальная емкость аккумулятора [3]. Среди недостатков литий-ионных аккумуляторов выделяются недопустимость заряда при отрицательных температурах, критичность к высоким температурам, а также нелинейность зарядной характеристики при достижении высоких степеней заряда. Проявление данных недостатков минимизируется применением систем контроля батареи (BMS), отслеживающих состояние каждой ячейки (напряжение, температура, ток) и управляющих режимами работы батареи.

Подавляющее число потребителей используют электрическую энергию в виде переменного тока. Поскольку аккумуляторная батарея является источником постоянного тока, необходимым элементом системы накопления энергии является инверторный полупроводниковый преобразователь. Особенностью работы однофазных инверторов является наличие на входе пульсаций тока удвоенной частоты относительно первой гармоники выходного напряжения [4]. Таким образом, при работе на частоте 50 Гц частота пульсаций на входе составит 100 Гц.

В свою очередь особенностью большинства аккумуляторов, в том числе и литий-ионных, является значительное увеличение внутреннего сопротивления на диапазоне частот от 1 до 100 Гц относительно частот более 1000 Гц [5]. Увеличению сопротивления соответствует увеличение активных потерь, приводящих к нагреву электродов и уменьшению срока эксплуатации аккумулятора [4, 6, 7]. Для подавления низкочастотных гармоник тока рекомендуется применение согласующих устройств на базе DC/DC преобразователей (постоянного тока). Применение DC/DC преобразователя смещает диапазон пульсаций в область единиц – десятков килогерц, позволяет поддерживать напряжение на входе инвертора на постоянном уровне независимо от состояния заряда аккумуляторной батареи.

Одним из основных элементов такого согласующего устройства является индуктивный реактор. При работе накопителя на электрическую сеть преобразователь должен работать как на разряд батареи на сеть, так и на заряд от сети. В свою очередь, индуктивность должна адекватно соответствовать как нетребовательному к качеству тока высокоамперному режиму разряда (до 3*C*), так и слаботочному заряду со строгими ограничениями по величине пульсаций. Применение единого реактора требует поиска оптимального соотношения его параметров: величины индуктивности, сечения проводника намотки, применяемого сердечника и т. д.

Таким образом, в настоящее время наиболее универсальным, эффективным и перспективным среди сетевых накопителей можно считать накопитель на основе литий-ионной аккумуляторной батареи с согласующим устройством на базе модифицированного DC/DC-преобразователя, где будет применяться разделение индуктивного реактора на зарядную и разрядную ветвь.

Существует значительное число работ, посвященных преобразователям постоянного напряжения в постоянное. Так, например, в [8] предложен повышающий преобразователь. К достоинствам такого преобразователя можно отнести малое количество ключей (по одному транзистору и диоду) и реактивных элементов (два конденсатора и дроссель). Однако данный преобразователь обеспечивает только одностороннюю передачу энергии от источника к нагрузке в повышающем режиме, что не подходит для системы накопления энергии, где требуется заряд батареи и ее разряд, т. е. двусторонняя передача энергии. В работе [9] рассмотрен понижающий преобразователь, который ввиду наличия двух транзисторных ключей может работать в режиме понижающего преобразователя, передавая энергию от источника напряжения к нагрузке в виде аккумуляторной батареи, обеспечивая ее заряд. А также и в повышающем режиме, передавая накопленную в аккумуляторной батарее энергию на входную клемму источника питания в случае, когда входное напряжение меньше требуемого значения или отсутствует. Здесь также к достоинствам можно отнести простую топологию схемы. Однако при использовании указанного преобразователя в системе накопления энергии большой мощности – сотни и тысячи киловатт массогабаритные показатели силового дросселя будут весьма значительны, поскольку токи через него могут достигать сотни ампер, а сечение провода соответственно – от 50 мм и больше.

Следовательно, для создания аккумуляторных накопителей электрической энергии с высокой энергоемкостью, в частности на базе литий-ионных АБ, актуальна разработка специальных устройств согласования между АБ и полупроводниковым преобразователем, обеспечивающих качество зарядно-разрядного тока АБ и обладающих малыми массогабаритными и стоимостными показателями. Применение данного согласующего устройства позволит повысить ресурс использования АБ, количество циклов заряда/разряда, снизить требования к техническому обслуживанию и повысить ремонтопригодность накопителей электрической энергии.

Тем самым задача сводится к разработке согласующего устройства, позволяющего повысить эффективность работы системы накопления электрической энергии с аккумуляторной батареей. За основу такого устройства взят импульсный преобразователь постоянного тока в постоянный [10, 11]. Входной дроссель такого устройства является определяющим как для массогабаритных, так и для стоимостных показателей. Это обусловливается тем, что батарее требуется качественный зарядный ток, позволяющий увеличить ее ресурс, а для этого необходима высокая индуктивность. Рассматривается два режима работы (преобразования уровня напряжения): повышающий (разряд аккумуляторной батареи) и понижающий (заряд аккумуляторной батареи). Предлагается модификация известного импульсного преобразователя, заключающаяся в установке дополнительного дросселя, использование которого требуется в режиме заряда аккумуляторной

батареи. А также предлагается алгоритм включения дополнительного дросселя. Это позволит существенно уменьшить габариты согласующего устройства, поскольку в режиме заряда ток дросселя не превышает 50 % от тока аккумуляторной батареи, выдаваемого аккумуляторной батареей за один час. В свою очередь при разряде аккумуляторной батареи этот дроссель шунтируется и используется уже входной дроссель преобразователя, рассчитанный на трехкратный ток аккумуляторной батареи, выдаваемый за один час эксплуатации.

1. Согласующее устройство аккумулятора с инвертором

На рис. 1 приведена схема предлагаемого устройства.

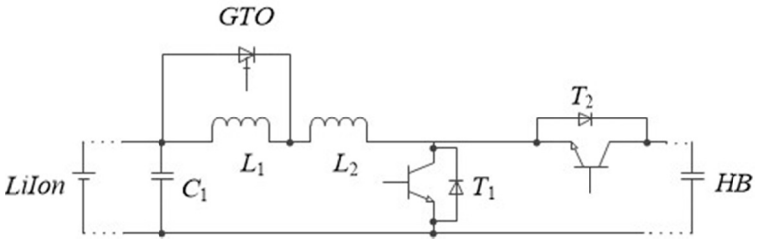

Рис. 1 – Согласующее устройство на базе модифицированного преобразователя постоянного напряжения в постоянное

Fig. 1 – A matching device based on a modified DC-DC converter

Предложенное устройство (рис. 1) содержит два транзисторных ключа, способ управления которыми задает режим работы преобразователя (понижающий или повышающий). Дроссель L_1 задействован только для понижающего режима. При работе в повышающем режиме он шунтируется тиристором GTO. В обоих случаях конденсатор C_1 будет являться высокочастотным фильтром, пропуская только низкочастотную составляющую тока в литий-ионную батарею.

В соответствии с техническим заданием коэффициент гармоник тока и напряжения $(K_г)$ принят за 2 %, частота коммутации ключей T_1 и T_2 $(f_{pwmDCDC})$ принимается равной 5 кГц, коэффициент пульсаций высокочастотной составляющей тока $(K_{n(I)})$ примем равным 3 %, коэффициент пульсаций высокочастотной составляющей напряжения $(K_{n(U)})$ примем равным 5 %, емкость выбранных литий-ионных батарей равна 270 Ач, время заряда АКБ (t_{ch}) составляет 24 часа.

Данное устройство разрабатывалось для СНЭ мощностью 2 МВт. Тогда как в качестве инверторов использовалась модульная система на основе топологии Н-мост. Каждый модуль состоял из АБ, предлагаемого устройства и инвертора. Всего в 2 МВт СНЭ предполагалось 6 модулей, каждый мощностью 360 кВт.

При этом для понижающего режима работы максимальный ток заряда аккумуляторной батареи не должен был превышать 135 А. Индуктивность силового дросселя в DC-DC преобразователе при частоте преобразования 5 кГц и уровне пульсаций в 10 % должна быть не менее 3 мГн. При этом оценочная масса дросселя составляла 5 кг. Для повышающего режима работы максимальный ток разряда аккумуляторной батареи не должен превышать 810 А. Индуктивность силового дросселя в DC-DC преобразователе при частоте преобразования 5 кГц и уровне пульсаций в 10 % должна быть не менее 0,3 мГн. При этом оценочная масса дросселя составила 16 кг. В свою очередь универсальный дроссель как для понижающего, так и для повышающего режима индуктивностью 3 мГн и выдерживающий

ток в 810 А оценивается в 200 кг массы. Таким образом, решение шунтировать дроссель $L1$ позволяет получить значительный выигрыш в массогабаритных показателях преобразователя.

2. Расчет схемы согласующего устройства на базе модифицированного преобразователя постоянного напряжения в постоянное

Максимальная мощность DC-DC преобразователя определяется, исходя из мощности НВ-инвертора:

$$P_b = \frac{S_{\text{НВ}} \cdot \cos(\varphi_{\text{НВ}})}{\eta_{\text{НВ}} \cdot \eta_{\text{DCDC}}} = \frac{1/6 \cdot 2000000 \cdot 1}{0,95 \cdot 0,97} = 361\ 729 \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $S_{\text{НВ}}$ – выходная мощность одного Н-моста, равная 1/6 части всей мощности, равной 2000 000 Вт.

Режим разряда

Предельный входной ток DC-DC примем равным максимально допустимому току разряда батареи $I_b \le 810\,\text{А}$ (270 Ач $\cdot$ 3*C*). В соответствии с ТЗ на СНЭ [12] входное напряжение DC-DC $(U_{b\max})$ является выходным напряжением инвертора и равно 650 В. Число ячеек АКБ (N_b) составляет 204 шт., и минимальное входное напряжение DC-DC $(U_{b\min})$, исходя из разброса напряжений на элементе литий-ионной батареи – 2,5–3,7 В, составит 510 В [13–15]. В свою очередь минимальный входной ток DC-DC составит

$$I_{b\min} = P_b / U_{b\max} = 557\,\text{А}, \quad (2)$$

а максимальный входной составит

$$I_{b\max} = P_b / U_{b\min} = 710\ \text{А}. \quad (3)$$

Режим заряда

Ток заряда принимается равным $I_{ch} = 0,5C = 135\,\text{А}$. Напряжение заряда примем равным выходному напряжению DC-DC $U_{ch\min} = 700\,\text{В}$. При этом требуемое напряжение заряда (U_{ch}), исходя из расчета инвертора, должно быть равно 714 В, тогда как в звене постоянного тока оно уже будет равным 764 В (режим активного выпрямителя $(U_{\text{DC}(AR)})$. Мощность на выходе DC-DC в этом режиме составит

$$P_{ch\max} = U_{\text{DC}(AR)} I_{ch} = 103\ 140 \text{ Вт}. \quad (4)$$

Расчет дросселя в режиме заряда будет определяться как

$$L_{buck} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot t_{\text{вкл.сост}}}{I_{Lbuck} \cdot k_{\text{пульс}}}, \quad (5)$$

где I_{Lbuck} – ток протекающий через дроссель, соответствующий 0,5 от емкости аккумуляторной батареи.

Расчет дросселя в режиме разряда:

$$L_{boost} = \frac{U_{\text{вх}}(U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}})}{(I_{L\text{ср}} + 0,5 I_{L\text{пульс}}) k_{\text{пульс}} f_{PWM} U_{\text{вх}}}, \quad (6)$$

где $I_{L\text{ср}}$ – среднее значение тока, протекающего через дроссель.

3. Результаты моделирования

При моделировании согласующего устройства были приняты следующие начальные условия и допущения.

1. Аккумуляторная батарея упрощенно представлена в виде источника напряжения VDC3 (рис. 2), диапазон напряжений – от 588 до 750 В, сопротивление R_{bat} = 0,05 Ом. Предложенный вариант имеет очень жесткую входную характеристику в режиме заряда по сравнению с реальной аккумуляторной батареей.

2. Емкость конденсатора на стороне аккумуляторной батареи 470 мкФ, емкость конденсатора на стороне Н-моста 2000 мкФ, индуктивность L_d = 2,67 мГн.

3. Частота ШИМ взята равной 4 кГц, период между выборками ADC 50 мкс (частота 20 кГц).

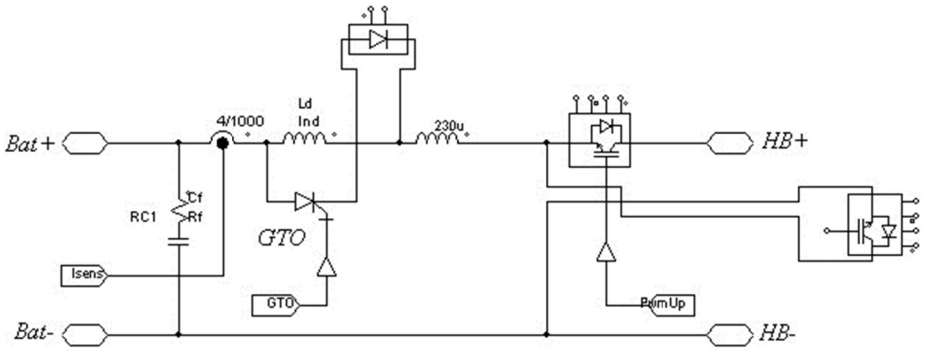

Рис. 2 – Схема силовой части DC-DC преобразователя

Fig. 2 – The circuit of the DC-DC converter power section

Моделирование преобразователя (рис. 2) производилось в ПО PSIM. Было проведено два эксперимента: на заряд батареи и на ее разряд. Осциллограммы для режима заряда и разряда представлены соответственно на рис. 3 и 4.

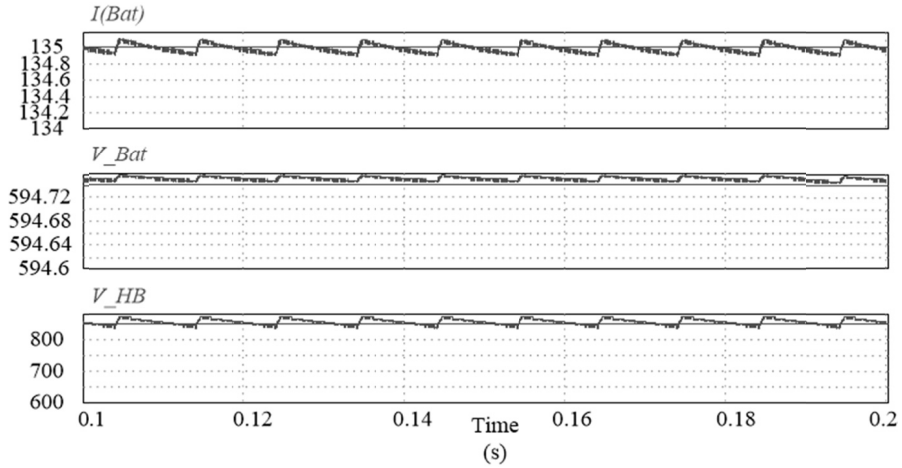

Рис. 3 – Осциллограммы режима заряда, ток батареи, напряжение батареи и напряжение Н-моста (сверху вниз)

Fig. 3 – Waveforms of the charge mode, battery current, battery voltage, and H-bridge voltage (top to bottom)

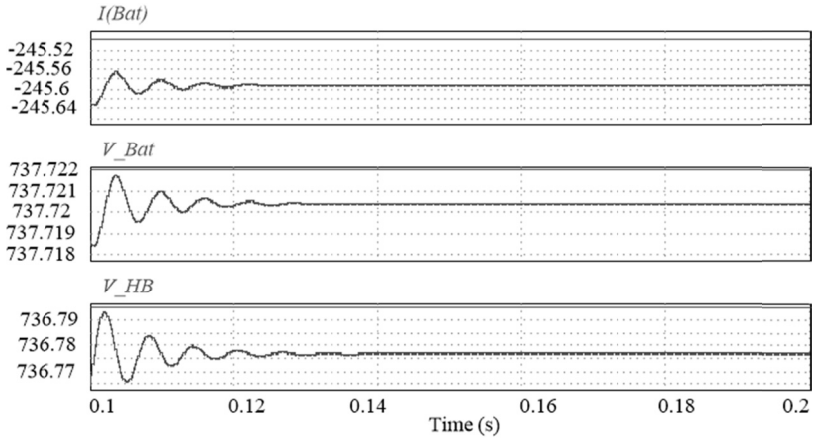

Рис. 4 – Осциллограммы режима разряда, ток батареи, напряжение батареи и напряжение Н-моста (сверху вниз)

Fig. 4 – Oscillograms of the discharge mode, battery current, battery voltage and H-bridge voltage (top to bottom)

Из полученных кривых токов и напряжений видно, что пульсации незначительны и укладываются в требования, предъявленные в ТЗ. Дальнейшим шагом исследований станет оценка работы преобразователя с тепловыми моделями в Matlab Simulink. Но по предварительным расчетам в модуле, мощность которого (как обозначено далее) 360 кВт, на ключах теряется около 2 кВт. В модели предполагается оценить потери не только на ключах, но и в реактивных элементах.

Заключение

1. Предложено согласующее устройство литий-ионной аккумуляторной батареи с Н-мостовым инвертором напряжения на базе модифицированного DC-DC преобразователя. За счет используемых в этой схеме *LC*-фильтров удалось подавить низкочастотную пульсацию зарядного тока. А поскольку преобразователь основан на известной схеме buck-boost [9], возможно осуществить регулирование напряжения до требуемого в СНЭ.

2. За счет разделения дросселя для режима заряда и разряда удалось выиграть в массогабаритных показателях в 5 раз, 18,5 г/кВт против 100 г/кВт.

3. В работе приведена методика расчета предлагаемой схемы, в частности упор сделан на силовой дроссель.

4. Кроме того, была произведена стоимостная оценка, результаты которой приведены в таблице. Выигрыш оценивается в 30 % в сравнении со схемой с одним дросселем.

Транзисторы (DC-DC, 5 на Н-мост)	Количество для 6 Н-мостов	Сумма
SKM300GA12V	60	146,49 руб/кВт
Драйверы (DC-DC)		
SKHI 22B R	30	64,68 руб/кВт
Дроссель (3 мГн, 3*C*, при *f* = 5000 Гц)	30	1 333,26 руб/кВт
Дроссель (0,3 мГн, 3*C*, при *f* = 5000 Гц)	30	550,935 руб/кВт
Дроссель (3 мГн, 0,5*C*, при *f* = 5000 Гц)	30	364,275 руб/кВт
Конденсаторы	180	18 руб/кВт (ориентировочно)
ИТОГО		34 663,064 руб/кВт

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dybko M.A., Brovanov S.V.** Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters // 2015 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, 2015. – P. 415–421.
2. Тарифы на электрическую энергию. – URL: https://www.nskes.ru/pomoshch-i-spravka/tarify/tarify-na-elektricheskuyu-energiyu/ (дата обращения: 30.06.2021).
3. Лиотех. Литий-ионные аккумуляторы. – Новосибирск, 2017. – URL: http://liotech.ru/newsection7159 (дата обращения: 30.06.2021).
4. **Park J.-H., Jeong H.-G., Lee K.-B**. Output current ripple reduction algorithms for home energy storage systems // Energies. – 2013. – Vol. 6. – P. 5552–5569.
5. BU-907: testing lithium-based batteries // Battery University. – 2019. – September 30. – URL: https://batteryuniversity.com/article/bu-907-testing-lithium-based-batteries (accessed: 30.06.2021).
6. **Ale Ahmad A., Abrishamifar A., Samadi S.** Low-frequency current ripple reduction in front-end boost converter with single-phase inverter load // IET Power Electronics. – 2012. – Vol. 5 (9). – P. 1676–1683.
7. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems / A.J. Ruddell, A.G. Dutton, H. Wenzl, C. Ropeter, D.U. Sauer, J. Merten, C. Orfanogiannis, J.W. Twidell, P. Vezin // Journal of Power Sources. – 2002. – Vol. 112. – P. 531–546.
8. Patent US 7180275, B 2 G 05 F 1/62, H 02 M 3/156. DC-DC high frequency boost converter / Stefan Reithmaier. – N 11/115,524; date of patent 20.02.2007.
9. Patent “US 5414341, A H 02 M 3/10, G 05 F 1/563, H 02 M 3/158 S. DC-DC converter operable in an asyncronous or syncronous or linear mode / Alan E. Brown. – N 163,477; date of patent 09.05.1995.
10. State of charge control of the, mixed-type battery energy storage system, based on the modular multilevel converter / A. Dudin, T. Ellinger, J. Petzoldt, O. V. Nos // 17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Erlagol, Russia, 2016. – P. 395–400.
11. Создание высокотехнологичного производства систем бесперебойного питания и накопления электрической энергии большой мощности (грант, 218 постановление, НИОКТР, N02.G25.31.0194 от 27 апреля 2016 г.).
12. **Keil P.**, **Jossen A.** Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life – an experimental study with different 18650 high-power cells // Journal of Energy Storage. – 2016. – Vol. 6. – P. 125–141.
13. **Zinoviev G., Udovichenko A.** The calculating program method of the integrated indicator of grid electromagnetic compatibility with consumers combination of non-sinusoidal currents / 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, 2017. – P. 481–484.
14. Mathematical models for analysis of electromagnetic processes in thyristor circuits of AC voltage regulators / A.V. Udovichenko, E.V. Grishanov, S.V. Brovanov, M.A. Dybko // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, Russia, 2018. – P. 6403–6409.

DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE ACCUMULATOR BATTERY WITH A VOLTAGE INVERTER IN THE ELECTRIC ENERGY STORAGE UNIT

Udovichenko A.V., Tokarev V.G., Grishanov E.V., Kuchak S.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article proposes a matching device between an accumulator battery and a voltage inverter in electric energy storage systems based on a reversible DC-DC converter with improved weight, size and cost indicators. Lithium-ion batteries are subject to tough operational requirements. The discharge of such batteries is not recommended to exceed their three-fold capacity (C), while the charge is limited to 0.5C, and low-frequency ripple components should not be present in the charging current. These requirements can be fulfilled with the help of the proposed matching device which is characterized by smaller dimensions and cost achieved due to the choke unit.

The article proposes the calculation of the converter circuit and presents the simulation results obtained in the Psim simulation environment (the PowerSim environment). An economic assessment of the converter has been carried out.

Keywords: regulator, storage system, battery, choke, current ripple.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-43-52

REFERENCES

1. Dybko M.A., Brovanov S.V. Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters. *2015 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Erlagol, 2015, pp. 415–421.
2. *Tarify na elektricheskuyu energiyu* [Electricity tariffs]. Available at: https://www.nskes.ru/pomoshch-i-spravka/tarify/tarify-na-elektricheskuyu-energiyu/ (accessed 30.06.2021).
3. *Liotekh. Litii-ionnye akkumulyatory* [Lithium-ion batteries]. Novosibirsk, 2017. Available at: http://liotech.ru/newsection7159 (accessed 30.06.2021).
4. Park J.-H., Jeong H.-G., Lee K.-B. Output current ripple reduction algorithms for home energy storage systems. *Energies*, 2013, vol. 6, pp. 5552–5569.
5. BU-907: testing lithium-based batteries. *Battery University*, 2019, September 30. Available at: https://batteryuniversity.com/article/bu-907-testing-lithium-based-batteries (accessed: 30.06.2021).
6. Ale Ahmad A., Abrishamifar A., Samadi S. Low-frequency current ripple reduction in frontend boost converter with single-phase inverter load. *IET Power Electronics*, 2012, vol. 5 (9), pp. 1676–1683.
7. Ruddell A.J., Dutton A.G., Wenzl H., Ropeter C., Sauer D.U., Merten J., Orfanogiannis C., Twidell J.W., Vezin P. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 112, pp. 531–546.
8. Reithmaier S. *DC-DC high frequency boost converter*. Patent US, no. 7180275, 2007.
9. Brown A.E. *DC-DC converter operable in an asyncronous or syncronous or linear mode*. Patent US, no. 5414341, 1995.
10. Dudin A., Ellinger T., Petzoldt J., Nos O. V. State of charge control of the, mixed-type battery energy storage system, based on the modular multilevel converter. *17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM*, Erlagol, Russia, 2016, pp. 395–400.
11. Creation of high-tech production of uninterruptible power supply systems and high-power electric energy storage (grant, Resolution 218, R&D, N 02.G25.31.0194 of April 27, 2016). (In Russian).
12. Keil P., Jossen A. Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life – an experimental study with different 18650 high-power cells. *Journal of Energy Storage*, 2016, vol. 6, pp. 125–141.
13. Zinoviev G., Udovichenko A. The calculating program method of the integrated indicator of grid electromagnetic compatibility with consumers combination of non-sinusoidal currents. *2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Novosibirsk, 2017, pp. 481–484.
14. Udovichenko A.V., Grishanov E.V., Brovanov S.V., Dybko M.A. Mathematical models for analysis of electromagnetic processes in thyristor circuits of AC voltage regulators. *2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Russia, 2018, pp. 6403–6409.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Удовиченко Алексей Вячеславович – родился в 1987 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: энергоэффективные регуляторы переменного напряжения, плавный пуск двигателей, силовая электроника. Опубликовано 44 научных работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).

Udovichenko Aleksey Vyacheslavovich (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), an associate professor at the Electronics and Electrical Engineering Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy-efficient AC voltage regulators, soft-start of engines, and power electronics. He is the author of 44 research papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).

Токарев Вадим Геннадьевич – 1967 года рождения, старший преподаватель кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Автор 5 научных работ. Область научных интересов: фильтры активной мощности, преобразователи источников напряжения, системы автоматизации и цифровая обработка сигналов. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: v.tokarev@corp.nstu.ru).

Tokarev Vadim Gennadievich (b. 1967) – He is a senior lecturer at the Computer Engineering Department, Novosibirsk State Technical University. He is a co-author of 5 research papers. His research interests include active power filters, voltage source converters, automation systems, and digital signal processing. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: v.tokarev@corp.nstu.ru).

Гришанов Евгений Валерьевич – 1988 года рождения, канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета, автор 11 научных работ. Область научных исследовательских интересов в настоящее время сосредоточена на системах генерации на основе NPC. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: e.grishanov@corp.nstu.ru).

Grishanov Evgeny Valerievich (b.1988) – Candidate of Sciences (Eng.). He is an associate professor at Computer Engineering Department, Novosibirsk State Technical University. He is the author of 11 research papers. His research interests are currently focused on generation systems based on NPC. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: e.grishanov@corp.nstu.ru).

Кучак Сергей Викторович – получил степень магистра электроники и микроэлектроники в Новосибирском государственном техническом университете, Россия, в 2014 году, старший преподаватель НГТУ. Область научных интересов: разработка устройств автономного питания. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru).

Kuchak Sergey Viktorovich received a Master's degree in Electronic and microelectronic from the Novosibirsk State Technical University, Russia, in 2014. Currently he is a senior lecturer at NSTU, Russia. His research interests include development of autonomic power supply devices. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru).

Статья поступила 27 мая 2021
Received May 27 2021

To Reference:

Udovichenko A.V., Tokarev V.G., Grishanov E.V., Kuchak S.V. Razrabotka effektivnogo soglasuyushchego ustroistva akkumulyatornoi bata-rei s invertorom napryazheniya v nakopitele elektricheskoi energii [Development of an effective accumulator battery with a voltage inverter in the electric energy storage unit]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 2 (51), pp. 43–52. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-43-52.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 апрель–июнь № 2 (51)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.337

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Н.И. Щуров, П.А. Бахолдин, Д.А. Бахолдин
Новосибирский государственный технический университет

При создании системы электромагнитного гашения колебаний необходимым является учет параметров транспортного средства и условий эксплуатации, таких как качество дорожного полотна, тип транспортного средства и его массогабаритные показатели. Для определения энергетических параметров на различных участках дорожного полотна была разработана математическая имитационная модель транспортного средства. В качестве среды программирования для создания имитационной модели была выбрана среда графического программирования MATLAB Simulink. Проведен ряд опытов с применением различных параметров транспортного средства, типов дорожного полотна в рамках существующих ездовых циклов. Результаты моделирования позволяют получить базовые расчетные характеристики электромагнитного гасителя колебаний выбранного транспортного средства, на основе которых будет производиться дальнейший расчет линейного электромагнитного гасителя колебаний. Зависимость энергоэффективности системы определялась при использовании транспортного средства на дорогах, имеющих различный индекс ровности дорожных покрытий.

Ключевые слова: электромагнитный гаситель колебаний, имитационное моделирование, международный индекс ровности дорожных покрытий, энергоэффективность.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-53-62

Введение

Подвеска транспортного средства, как один из ключевых компонентов, выполняет ряд задач, таких как устойчивость и управляемость авто, маневренность и обеспечение плавности хода. Подвеска включает в себя упругие элементы, гасители колебаний и направляющие. В настоящее время получили распространение механические, гидравлические и пневматические гасители колебаний. Одним из современных видов автомобильных подвесок является так называемая, электромагнитная подвеска, в которой электропривод может выполнять роль как упругого элемента, так и демпфера. Данный тип подвески может быть выполнен с применением гасителей колебаний различной конструкции, при этом возможность рекуперации энергии, затраченной на преодоление неровностей путевой структуры, позволяет повысить общую энергетическую эффективность транспортного средства

1. Имитационная модель пассивной подвески

Для определения требований к системе управления электромагнитной подвеской была создана имитационная математическая модель транспортного средства. Определение параметров модели необходимо начать с разработки имитационной модели пассивной подвески и впоследствии модернизировать имеющуюся модель в активную. Под пассивной подвеской в данном случае следует понимать возможность работы подвески только как гасителя колебаний с изменяемыми характеристиками.

© 2021 Н.И. Щуров, П.А. Бахолдин, Д.А. Бахолдин

Математическая модель системы управления подвеской относится к имитационным моделям и необходима для создания и упрощения физической модели. Для таких технических систем ради получения аналитической математической модели исследователь вынужден накладывать жесткие ограничения на модель и прибегать к упрощениям. При этом приходится пренебрегать некоторыми особенностями технической системы, что приводит к тому, что математическая модель перестает быть средством изучения сложной системы. [1, 12, 13].

Для создания практичной и функциональной имитационной модели была выбрана среда графического программирования Simulink на основе MATLAB. Данная среда имеет подходящие библиотеки, направленные на создание сложных имитационных моделей различных узлов. Также для контроля оценки результатов данная среда моделирования имеет возможность визуализации объектов при помощи библиотек «Unreal Engine Scenario Simulation».

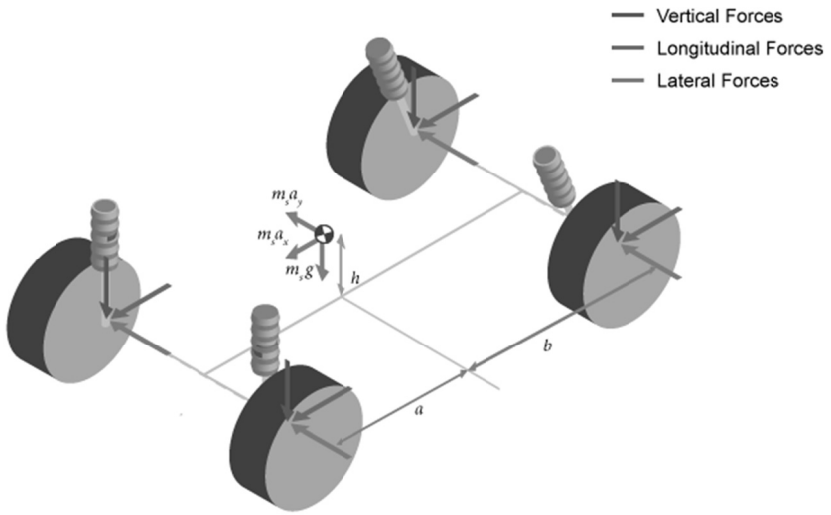

Рис. 1 – Пример визуализации работы имитационной модели подвески транспортного средства в среде «Unreal Engine Scenario Simulation»

Fig. 1 – An example of visualization of the operation of a simulation model of the vehicle suspension in the "Unreal Engine Scenario Simulation" environment

На рис. 1 представлена модель системы подвешивания транспортного средства [2, 3], где имитация неровностей путевой структуры реализована линейными приводами, передающими воздействие на ступицу колеса. Использование специализированных блоков библиотек Vehicle Dynamics Blockset позволяет наиболее точно настроить параметры элементов транспортного средства и учесть все необходимые параметры.

Данная имитационная модель позволяет учитывать взаимодействие и влияние на систему упругого подвешивания различных параметров:

- конструкции рычагов подвески;
- тягового привода;
- тормозной системы;
- различных вариантов загрузки транспортного средства;
- неровностей путевой структуры и уклона;
- маневрирования;
- направления и скорости ветра;
- давления в шинах.

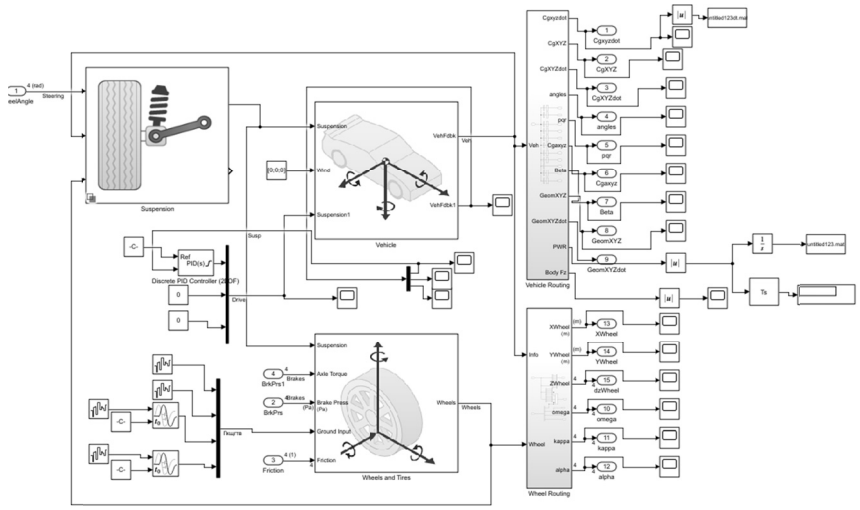

Рис. 2 – Пример взаимодействия универсальных блоков библиотеки Vehicle Dynamics Blockset

Fig. 2 – An example of the interaction of generic blocks of the Vehicle Dynamics Blockset library

Используемые блоки учитывают различные системы упругого подвешивания и влияние стабилизатора поперечной устойчивости.

Имитация колеса и шины

Блок Combined Slip Wheel (рис. 3) реализует продольные и боковые реакции колеса. На основе крутящего момента тягового электродвигателя, тормозных механизмов, параметров дорожного полотна и величины прогиба колеса блок определяет частоту вращения колеса, сопротивление качению, вертикальное перемещение, силы и моменты во всех шести степенях свободы. Данные свойства позволяют изучать резонансные явления в подвеске транспортного средства, возникающие во время движения транспортного средства.

Характеристики дорожного профиля

Для имитации дорожного полотна применялись различные методы.

- Использование параметров неровностей путевой структуры на основе данных, полученных путем сканирования путевой структуры [4].
- Задание неровности путевой структуры на основе статистических данных в соответствии с индексом ровности дороги IRI.

Международный индекс ровности IRI (International Roughness Index), который используют все страны Таможенного союза как в период строительства, так и в период эксплуатации), представляет собой отношение величины суммарного перемещения неподрессоренной массы автомобиля относительно подрессоренной массы к длине участка дороги (м/км или мм/м). Он определяется расчетом в результате моделирования движения по микропрофилю ¼ части эталонного автомобиля со скоростью 80 км/ч [5, 9, 15].

Показатель IRI является логическим развитием понятия ровности по толчкомеру, но не обладает его существенными недостатками – зависимостью показаний толчкомера от особенностей подвески используемого автомобиля.

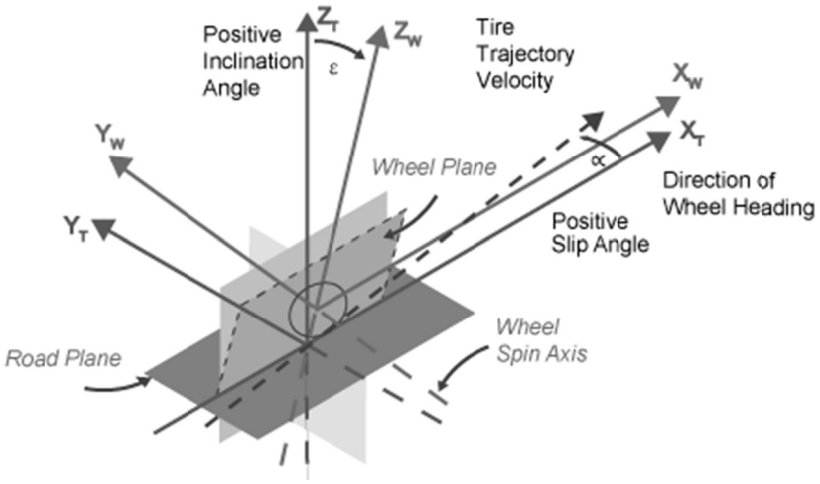

Рис. 3 – Блок Combined Slip Wheel библиотеки Vehicle Dynamics Blockset
Fig. 3 – A Combined Slip Wheel block of the Vehicle Dynamics Blockset library

При измерениях профилометром расчет показателя IRI (м/км или мм/м) осуществляют путем использования программного обеспечения, входящего в состав измерительного оборудования. Пример профиля дорожного полотна, полученного путем сканирования, представлен на рис. 4.

Рис.4 – Пример профиля дорожного полотна, используемого при моделировании
Fig. 4 – An example of a roadbed profile used for modeling

Нормы ровности дорожных покрытий в период строительства, реконструкции или капитального ремонта по шкале IRI в странах Таможенного союза приведены в таблице и на рис. 5.

Таблица 1 / Table 1

Нормы ровности дорожных покрытий в период строительства, реконструкции или капитального ремонта по шкале IRI в странах Таможенного союза

Standards of road pavement evenness during construction, reconstruction or overhaul by the IRI scale in the countries of the Customs Union

№ п/п	Дорожные покрытия. Категории дорог	Допустимые значения IRI (м/км) по странам [источник информации]			
		Казахстан [9, 10]	Россия [10]	Россия [11]	Беларусь [П]
1	Асфальтобетонные и цементобетонные: – дороги I категории; – дороги II и III категорий	 до 2,4 до 3,0	 до 2,2 до 2,2	 до 2,1 до 2,6	 до 1,5 (2,0*) до 2,0
2	Холодный асфальтобетон, черный щебень, каменные материалы, обработанные вяжущими материалами: – дороги III категории; – дороги IV, V и VI категорий	 до 4,2 до 4,6	 до 2,2 до 2,6	 до 4,1 до 4,6	 до 2,0** до 2,5**
3	Щебеночные и гравийные покрытия: – дороги III категории; – дороги IV и V категорий	 до 6,4 до 7,6	 –	 до 6,4 до 6,4	 –

Примечание.

1. В Республике Беларусь нормы ровности дорожных покрытий по шкале IRI в период эксплуатации заданы только для усовершенствованных покрытий.

2. В России требования к ровности дорожных покрытий заданы показателями толчкомера ТХК-2 и ПКРС-2У. Нормативных показателей IRI в период эксплуатации не существует. Они представлены лишь только в проекте документа [5]. Поэтому в левой колонке по России представлены показатели по шкале IRI, полученные через уравнения связи [6].

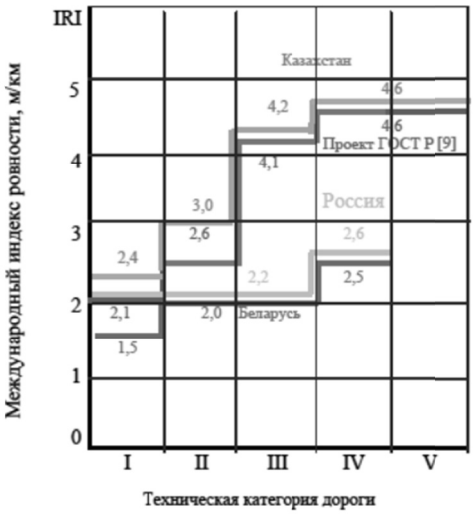

Рис. 5 – Нормы ровности дорожных покрытий в период строительства, реконструкции или капитального ремонта в странах Таможенного союза

Fig. 5 – Standards of road pavement evenness during construction, reconstruction or overhaul in the countries of the Customs Union

Результаты имитационного моделирования

В ходе эксперимента было рассмотрено влияние на выходную мощность и усилие на гасителе колебаний различных параметров транспортного средства и путевой структуры. Также были определены зависимости энергоэффективности гасителя колебаний при различных полных массах транспортного средства.

На основании полученных осциллограмм и последующей обработки данных было получено среднее значение усилия на электромагнитном гасителе колебаний расчетного транспортного средства при движении по дорожному покрытию I и II категории (рис. 6 и 7). Кривая нормального распределения нагрузке на гасителе колебаний представлена на рис. 8.

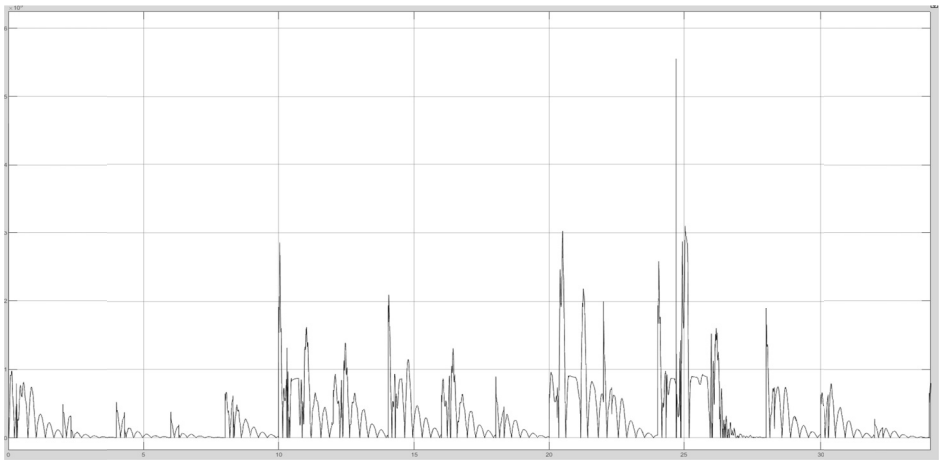

Рис. 6 – Осциллограмма мощности, выделяемой гасителем колебаний

Fig. 6 – An oscillogram of the shock absorber power

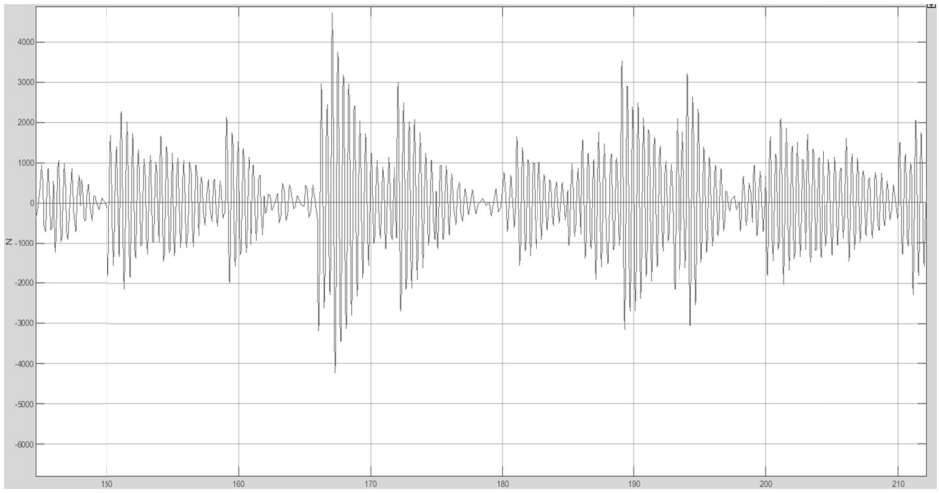

Рис.7 – Фрагмент осциллограммы нагрузки гасителя колебаний

Fig. 7 – An oscillogram fragment of the shock absorber load

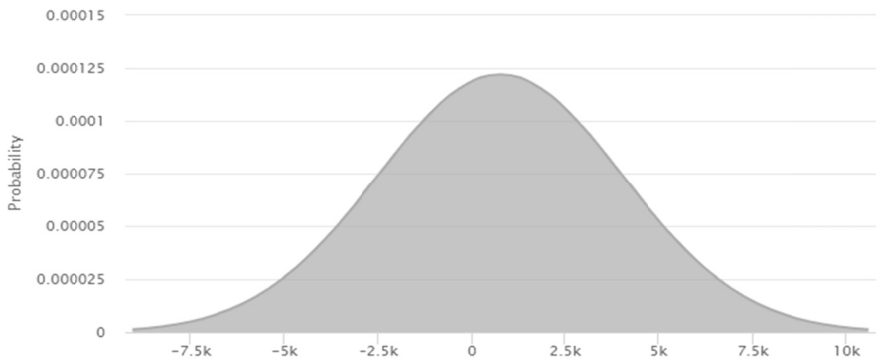

Рис. 8 – Кривая нормального распределения нагрузки на гасителе
Fig. 8 – A normal load distribution curve on the damper

На рис. 9 виден практически линейный рост поглощаемой гасителем колебаний мощности в диапазоне скоростей от 35 до 110 км/ч.

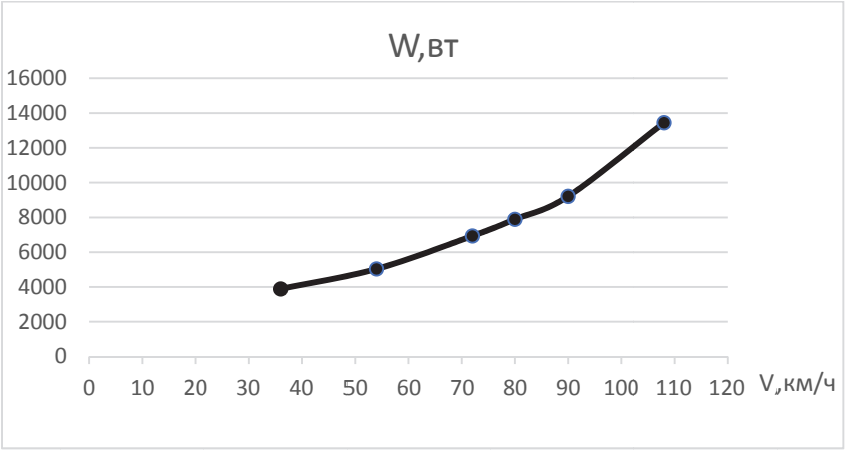

Рис. 9 – Зависимость мощности на амортизаторе от скорости движения
Fig. 9 – Shock absorber power dependence on the movement speed

Разработанная имитационная математическая модель электромагнитного гасителя колебаний позволяет обработать как статистические показатели неровности дорожного полотна, так и данные, полученные путем трехмерного сканирования реального участка пути.

Заключение

На основании результатов моделирования можно оценить выходные характеристики пассивного гасителя с точки зрения величины усилия и выделяемой мощности.

На основании проведенных экспериментов были получены необходимые значения мощности при различных скоростях движения транспортного средства.

На основании полученных осциллограмм и последующей обработки данных было получено среднее значение усилия на электромагнитном гасителе колебаний расчетного транспортного средства при движении по дорожному покрытию I и II категории.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Causemann P.** Moderne Schwingungsdämpfung // Automobiltechnische Zeitung. – 2003. – N 105. – P. 1072–1079.
2. Vehicle Body 6DOF: 6DOF rigid vehicle body to calculate translational and rotational motion. – URL: https://ch.mathworks.com/help/releases/R2018a/vdynblks/ref/vehiclebody6dof.html (accessed: 30.06.2021).
3. Unreal Engine Scenario Simulation. – URL: https://ch.mathworks.com/help/driving/unreal-engine-scenario-simulation.html (accessed: 30.06.2021).
4. **Доморозов А.Н., Нгуен В.Н.** Анализ методов диагностирования технического состояния систем подвесок АТС на современных вибростендах // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2010.– № 5 (45). – С. 131–134.
5. **Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б.** Математические модели систем транспортных средств: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 2018. – 100 с.
6. **Рязанцев В.И., Альсаламех Б.** Стабилизация вертикальной реакции дороги на колесо при движении по периодическому профилю дороги // Известия МГТУ «МАМИ». – 2016. – № 4 (30). – С. 57–65.
7. Active suspension system of one-wheel car models using the sliding mode control with VSS observer / T. Yoshimura, S. Matumura, M. Kurimoto, J. Hino // International Journal of Vehicle Autonomous Systems. – 2002. – Vol. 1 (1). – P. 133–152.
8. ГОСТ 30412–96. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий. – Дата введ. 1997-01-01. – М.: Минстрой России, 1996.
9. СТ РК 1219–2003. Государственный стандарт Республики Казахстан. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий / Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации Министерства индустрии и торговли РК. – Астана: Госстандарт, 2003. – 23 с.
10. ПР РК 218-35–04. Инструкция по контролю качества и приемке работ при строительстве и ремонте автомобильных дорог / Министерство индустрии и торговли Республики Казахстан, Комитет по делам строительства. – Астана, 2004. – 176 с.
11. ПР РК 218-03–02. Инструкция по оценке ровности дорожных покрытий толчкомером / Минтранском Республики Казахстан. – Астана, 2003. – 40 с.
12. **Blundell R., Chen X., Kristensen D.** Semi-nonparametric IV estimation of shape-invariant engel curves // Econometrica. – 2007. – Vol. 75, N 6. – P. 1613–1669.
13. ОДН 218.0.006–2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. Отраслевые дорожные нормы / Минтранс РФ, Росавтодор. – М., 2002. – 137 с.
14. **Shchurov N.I., Bakholdin N.I.** The active electromagnetic suspension of vehicle // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. – Novosibirsk, Russia, 2018. – P. 399–401. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545214.
15. **Bakholdin N.I., Shchurov N.I., Rozhkova M.V.** Determination of energy regeneration electromagnetic suspension of the autonomous vehicle // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. – Novosibirsk, Russia, 2018. – P. 48–51. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546226.

ENERGY PARAMETERS OF THE VEHICLE ELECTROMAGNETIC SHOCK ABSORBER

Shchurov N.I., Bakholdin P.A., Bakholdin D.A.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The creation of an electromagnetic shock absorber system is necessary taking into account such parameters of the vehicle and operating conditions as the quality of the roadway, the grades, and the weight and size of the vehicle. A mathematical simulation model of the vehicle was developed to determine energy indicators in various road sections. The MATLAB Simulink

programming environment was chosen to create the most practical and functional simulation model. A number of experiments were carried out using various parameters of the vehicle, types of roadways and driving cycles. Simulation results allow obtaining basic characteristics of electromagnetic damper of the selected vehicle, on the basis of which a linear electromagnetic damper shock absorber will be calculated. System energy efficiency was determined when using a vehicle on roads having a different road surface evenness index.

Keywords: electromagnetic shock absorber, simulation modeling, international road surface evenness index, energy efficiency.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-53-62

REFERENCES

1. Causemann P. Moderne Schwingungsdämpfung. *Automobiltechnische Zeitung*, 2003, no. 105, pp. 1072–1079.
2. Vehicle Body 6DOF: 6DOF rigid vehicle body to calculate translational and rotational motion. Available at: https://ch.mathworks.com/help/releases/R2018a/vdynblks/ref/vehiclebody6dof.html (accessed 30.06.2021).
3. Unreal Engine Scenario Simulation. Available at: https://ch.mathworks.com/help/driving/unreal-engine-scenario-simulation.html (accessed 30.06.2021).
4. Domorozov A.N., Nguyen V.N. Analiz metodov diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya sistem podvesok ATS na sovremennykh vibrostendakh [Analysis of methods for diagnosing the technical state of automatic telephone exchange suspension systems on modern vibration stands]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2010, no. 5 (45), pp. 131–134.
5. Zhileikin M.M., Kotiev G.O., Sarach E.B. *Matematicheskie modeli sistem transportnykh sredstv* [Mathematical models of vehicle systems]. Moscow, MSTU Publ., 2018. 100 p.
6. Ryazantsev V.I, Al'salameh B. Stabilizatsiya vertikal'noi reaktsii dorogi na koleso pri dvizhenii po periodicheskomu profilyu dorogi [Stabilization of the vertical reaction of the road to the wheel when moving along the periodic profile of the road]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2016, no. 4 (30), pp. 57–65. (In Russian).
7. Yoshimura T., Matumura S., Kurimoto M., Hino J. Active suspension system of one-wheel car models using the sliding mode control with VSS observer. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 2002, vol. 1 (1), pp. 133–152.
8. GOST 30412–96. *Dorogi avtomobil'nye i aerodromy. Metody izmerenii nerovnostei osnovanii i pokrytii* [State standard 30412–96. Methods for measuring unevenness of substrates and coatings]. Moscow, Minstroi Rossii Publ., 1996.
9. ST RK 1219–2003. *Gosudarstvennyi standart Respubliki Kazakhstan. Dorogi avtomobil'nye i aerodromy. Metody izmerenii nerovnostei osnovanii i pokrytii* [State standard of the Republic of Kazakhstan. Automobile roads and airfields. Methods for measuring unevenness of substrates and coatings]. Astana, Gosstandart Publ., 2003. 23 p.
10. PR RK 218-35-04. *Instruktsiya po kontrolyu kachestva i priemke rabot pri stroitel'stve i remonte avtomobil'nykh dorog* [Instruction on quality control and works acceptance when construction and repair of the car roads]. Astana, 2004. 176 p.
11. PR RK 218-03-02. *Instruktsiya po otsenke rovnosti dorozhnykh pokrytii tolchkomerom* [Instructions for assessing the flatness of road surfaces with a pusher]. Astana, 2003. 40 p.
12. Blundell R., Chen X., Kristensen D. Semi-nonparametric IV estimation of shape-invariant engel curves. *Econometrica*, 2007, vol. 75, no. 6, pp. 1613–1669.
13. ODN 218.0.006–2002. *Pravila diagnostiki i otsenki sostoyaniya avtomobil'nykh dorog. Otraslevye dorozhnye normy* [Rules for diagnostics and assessment of the state of highways. Industry road standards]. Moscow, 2002. 137 p.
14. Shchurov N.I., Bakholdin N.I. The active electromagnetic suspension of vehicle. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering*, Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 399–401. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545214.
15. Bakholdin N.I., Shchurov N.I., Rozhkova M.V. Determination of energy regeneration electromagnetic suspension of the autonomous vehicle. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering*, Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 48–51. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546226.

16. Bakholdin D.A. [On the calculation of the storage capacity of an electric bus]. *Nauchno-tekhnicheskii progress: aktual'nye i perspektivnye napravleniya budushchego*: sbornik materialov 7 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. In 2 vol. [The scientific and technical progress: the current and perspective future directions: collection of materials of the 7th international scientific-practical conference. In 2 vol. Vol. 2], Kemerovo, March 6, 2018, pp. 98–100. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Щуров Николай Иванович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических комплексов, НГТУ. Область научных интересов: энергосберегающие технологии на электрическом транспорте. Имеет более 160 публикаций (Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, д. 20. E-mail: schurov@corp.nstu.ru).

Schurov Nikolay Ivanovich (b. 1947) – Doctorr of Sciences (Eng.), Head of the Department "Electrotechnical Units" of Novosibirsk State Technical University; Highly experienced in the field of engineering; Area of expertise is electrotechnics and electric transport; the author of many scientific papers (Address: 20, K. Markx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: schurov@corp.nstu.ru).

Бахолдин Павел Андреевич – родился в 1993 году, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Проходит обучение на факультете мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Защитил магистерскую диссертацию по теме «Комбинированная энергоустановка маршрутного такси на базе автомобиля "Газель"» в 2017 г. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: baholdin@ngs.ru).

Bakholdin Pavel Andreevich (b. 1993) – postgraduate student of "Electrotechnical Units" department of Novosibirsk State Technical University. Currently, his research interests are aimed at developing an energy-efficient vehicle suspension. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: baholdin@ngs.ru).

Бахолдин Дмитрий Андреевич – родился в 1991 году, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Проходит обучение на факультете мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Защитил магистерскую диссертацию по теме «Электрическая силовая установка легкого летательного аппарата самолетного типа» в 2019 г. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: baholdin@ngs.ru).

Bakholdin Dmitry Andreevich (b. 1991) – postgraduate student of "Electrotechnical Units" department of Novosibirsk State Technical University. Currently, his research interests are aimed at developing an energy efficient vehicle with energy storage devices. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: baholdin@ngs.ru).

Статья поступила 24 мая 2021 г.
Received May 24, 2021

To Reference:

Shchurov N.I., Bakholdin P.A., Bakholdin D.A. Energeticheskie pokazateli elektromagnitnogo gasitelya kolebanii transportnogo sredstva [Energy parameters of the vehicle electromagnetic shock absorber]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 2 (51), pp. 53–62. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-53-62.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Выпуск 2 (51) апрель–июнь 2021

Выпускающий редактор *И.П. Бровановa*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 19.07.2021. Выход в свет 21.07.2021. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 5,6. Печ. л. 4,0. Изд. № 136. Заказ № 638. Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

16+

Индекс журнала в Роспечати
82961