ISSN 1727-2769

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 4 (53)
ОКТЯБРЬ–ДЕКАБРЬ
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 октябрь–декабрь № 4 (53)

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. Email: 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 | October – December | № 4 (53)

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. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2021

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2021 октябрь–декабрь № 4 (53)

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Орлова Н.Б., Куркин М.И.
Переход Пайерлса в линейной цепочке
обменно связанных спинов 7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Бузук И.В., Кривецкий А.В., Рентеев В.А.
Анализ патентной активности российских разработчиков
в области техники прецизионных измерений.....15

Захлебин А.С.
Метод обработки материалов аэрофотосъемки
для построения геопривязанного ортофотоплана местности
с телевизионной камеры беспилотного летательного
аппарата DJI Phantom 4 Pro 26

Проценко Н.В., Малозёмов Б.В., Дмитриева Ю.В., Кузнецов С.А.
Необходимость выявления и патентования перспективных решений в области электрического транспорта 36

Шевченко А.Ф., Честюнина Т.В., Топорков Д.М., Вяльцев Г.Б.
Двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием 49

PROCEEDINGS OF RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES

2021 October – December № 4 (53)

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Orlova N.B., Kurkin M.I.
Peierles transition in a linear chain of exchange related spins 7

TECHNICAL SCIENCES

Buzuk I.V., Krivetsky A.V., Renteev V.A.
Analysis of the patent activity of russian developers
in the field of precision measurement technology.....15

Zakhlebin A.S.
A method of processing aerial photography materials for building
a georeferenced orthomosaic of the terrain from a television
camera of the unmanned aerial vehicle DJI Phantom 4 Pro.....26

Protsenko N.V., Malozyomov B.V., Dmitrieva Yu.V., Kuznetsov S.A.
The need to identify and patent promising solutions in the field of electric transport 36

Shevchenko A.F., Chestyunina T.V., Toporkov D.M., Vyaltcev G.B.
Motors with electromagnetic reduction of rotation frequency with switched magnetization 49

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 октябрь–декабрь № 4 (53)

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 537.611.45

ПЕРЕХОД ПАЙЕРЛСА В ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПОЧКЕ ОБМЕННО СВЯЗАННЫХ СПИНОВ

Н.Б. Орлова[1], М.И. Куркин[2]
[1] *Новосибирский государственный технический университет*
[2] *Институт физики металлов УрО РАН*

В работе рассчитывается потеря устойчивости антиферромагнитного состояния вещества относительно перехода Пайерлса в рамках новой модели магнитных подрешеток. В новой модели магнитных подрешеток в отличие от предыдущей модели подрешеток Андерсона–Займана антиферромагнитное упорядочение спинов обеспечивается слабым влиянием магнитной анизотропии. Магнитная анизотропия подавляет обменное смешивание при достаточно большом количестве спинов в подрешетке $N > 10^5$. Переход Пайерлса заключается в деформации в линейной цепочке атомов, а именно сближение соседних атомов, при которой период кристаллической решетки увеличивается вдвое. При сближении атомов обменное взаимодействие устанавливается только между парой ближайших атомных спинов. Исходя из новой модели магнитных подрешеток установлено, что антиферромагнитное подрешеточное состояние периодической цепочки спинов неустойчиво относительно перехода в состояние Пайерлса. При переходе в состояние «спин-пайерлс» спины соседних атомов будут упорядочены антипараллельно, но выделенного направления упорядочения спинов нет и невозможно ввести понятие магнитных подрешеток. Обнаруживаются такие магнитные состояния по экспоненциальной зависимости магнитной восприимчивости от обратной температуры. Электронный магнетизм в этом состоянии определяется атомным диамагнетизмом, если частоты теплового движения малы по сравнению с обменной частотой.

Ключевые слова: антиферромагнетики, магнитные подрешетки, обменное взаимодействие, переход Пайерлса.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-7-14

Введение. Новая модель подрешеток

Одним из успехов квантовой теории считается описание фазовых переходов с температурами упорядочения спинов электроном, превышающих 100 К. Это упорядочение обусловлено обменным взаимодействием, которое отсутствует в классической физике [1]:

$$V_{ex} = \sum_{jk} J(\vec{r}_j - \vec{r}_k)(\vec{s}_j \vec{s}_j). \tag{1}$$

где $J(\vec{r}_j - \vec{r}_k)$ – обменные параметры взаимодействия между $\vec{s}_j$ и $\vec{s}_k$ спинами на атомах с координатами $\vec{r}_j$ и $\vec{r}_k$. Обменное взаимодействие состоит из двух частей

$$V_{ex} = V_{ex}^{zz} + V_{ex}^{\pm}. \tag{2}$$

Первое слагаемое отвечает за магнитное упорядочение

$$V_{ex}^{zz} = \sum_{j,k} J(\vec{r}_j - \vec{r}_k) s_j^z s_k^z. \tag{3}$$

Работа выполнена в рамках государственного задания РАН (тема № 0120146333).

© 2021 Н.Б. Орлова, М.И. Куркин

Второе слагаемое отвечает за обменное смешивание спинов

$$V_{ex}^{\pm} = \frac{1}{2}\sum_{j,k} J(\vec{r}_j - \vec{r}_k)(s_j^+ s_k^- - s_j^- s_k^+), \tag{4}$$

здесь $s_j^{\pm} = s_j^x \pm i s_j^y$. Операторы s_j^z и $s_j^{\pm}$ определяются матрицами Паули [1]. Если параметры $J(\vec{r}_j - \vec{r}_k) < 0$, то наинизшее собственное значение оператора V_{ex} (1) соответствует ферромагнитному упорядочению спинов с волновой функцией Ψ_F и максимальной *z*-проекцией полного спина:

$$\left\langle \Psi_F \middle| S^z \middle| \Psi_F \right\rangle = \left\langle \Psi_F \middle| \sum_{j=1}^{N} s_j^z \middle| \Psi_F \right\rangle = \frac{N}{2}. \tag{5}$$

При этом *z*-проекция спина каждого электрона также максимальна:

$$\left\langle \Psi_F \middle| s_j^z \middle| \Psi_F \right\rangle = \frac{1}{2}. \tag{6}$$

Если наибольшие по абсолютной величине параметры $J(\vec{r}_j - \vec{r}_k) > 0$, то наинизшему собственному значению V_{ex} (1) может соответствовать антиферромагнитное упорядочение с волновой функцией Ψ_{AF} и нулевым полным спином:

$$\left\langle \Psi_F \middle| S^z \middle| \Psi_F \right\rangle = 0. \tag{7}$$

Для описания антиферромагнитного упорядочения в пространственно периодической решетки спинов обычно используется гипотеза спиновых подрешеток. К такой подрешетке относят группу спинов с ферромагнитным упорядочением. В самом простом варианте описания антиферромагнитного состояния используется структура двух подрешеток:

$$\left\langle \Psi_{AF} \middle| S_1^z \middle| \Psi_{AF} \right\rangle = \left\langle \Psi_{AF} \middle| \sum_{j=1}^{N} s_j^z \middle| \Psi_{AF} \right\rangle = \frac{N}{2}; \tag{8}$$

$$\left\langle \Psi_{AF} \middle| S_2^z \middle| \Psi_{AF} \right\rangle = \left\langle \Psi_{AF} \middle| \sum_{k=1}^{N} s_k^z \middle| \Psi_{AF} \right\rangle = -\frac{N}{2}. \tag{9}$$

Однако точная собственная функция оператора V_{ex} (1)

$$V_{ex}\Psi_{AF} = E_{AF}\Psi_{AF} \tag{10}$$

не может удовлетворять условиям (8)–(9) из-за слагаемого $V_{ex}^{\pm}$ (2) в обменном взаимодействии (1). Дело в том, что действие операторов $s_j^+ s_k^-$ и $s_j^- s_k^+$ на волновые функции пары спинов $\psi_{j,1/2}\psi_{k,-1/2}$ и $\psi_{j,-1/2}\psi_{k,+1/2}$:

$$\begin{aligned} s_j^- s_k^+ \psi_{j,1/2}\psi_{k,-1/2} &= \psi_{j,-1/2}\psi_{k,1/2}, \\ s_j^+ s_k^- \psi_{j,-1/2}\psi_{k,1/2} &= \psi_{j,1/2}\psi_{k,-1/2}, \end{aligned} \tag{11}$$

эквивалентно обмену местами этих спинов. Такого типа обменное смешивание спинов подрешеток $\vec{S}_1$ (8) и $\vec{S}_2$ (9) разрушает в них ферромагнитный порядок. Андерсону [2] и Займану [3] удалось упростить оператор V_{ex} (1) так, что приближенное решение (10) смогло удовлетворить модифициронным условиям (8), (9) для трехмерного упорядочения:

$$\left\langle \Psi_{AF} \middle| S_1^z \middle| \Psi_{AF} \right\rangle = -\left\langle \Psi_{AF} \middle| S_2^z \middle| \Psi_{AF} \right\rangle = -\frac{N}{2}(1-\Delta) \tag{12}$$

с величиной квантового сокращения спинов подрешеток $\Delta \approx 0{,}1$. Однако в [4] удалось найти точные решения уравнения (10) для V_{ex} с параметрами $J(\vec{r}_j - \vec{r}_k)$ специального вида. Оказалось, что эти точные решения удовлетворяют условиям:

$$\left\langle \Psi_{AF} \middle| S_{1,2}^z \middle| \Psi_{AF} \right\rangle = 0, \tag{13}$$

соотвествующим полной неопределенности в ориентациях спинов $\vec{s}_{j,k}$:

$$\left\langle \Psi_{AF} \middle| s_{j,k}^z \middle| \Psi_{AF} \right\rangle = 0\ . \tag{14}$$

В [4] предложена новая модель спиновых подрешеток, отличная от модели Андерсона и Займана. В этой модели магнитная анизотропия V_{an}, ориентирующая спины $\vec{s}_{j,k}$ относительно осей кристаллической решетки [1, 5], оказалась способной обеспечить антиферромагнитный подрешеточный порядок спинов. Решение уравнения

$$(V_{ex} + V_{an})\Psi_{AF} = (E_{AF} + \delta E_{an})\Psi_{AF} \tag{15}$$

смогло удовлетворить разложениям вида

$$\left\langle \Phi_{AF} \middle| s_j^z \middle| \Phi_{AF} \right\rangle = -\left\langle \Phi_{AF} \middle| s_k^z \middle| \Phi_{AF} \right\rangle = -\frac{1}{2}(1 - \varepsilon + \lambda\varepsilon^2 + \ldots) \lhd \tag{16}$$

при условии

$$\varepsilon = \frac{H_E}{H_A N} << 1, \tag{17}$$

где $H_E \approx 10^7$ Э – обменное поле; $H_A < 10^3$ Э – поле магнитной анизотропии; N – число спинов в каждой из подрешеток $\vec{S}_{1,2}$ (8) и (9), которое в [4] является параметром теории и может достигать макроскопических значений $\left(N >> H_E / H_A\right)$.

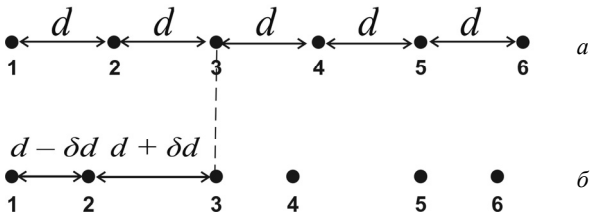
С новой моделью связаны дополнительные возможности при описании магнитных свойств антиферромагнетиков. В частности, тепловое разрушение спинов подрешеток $\vec{S}_{1,2}$ (8) и (9) до нулевых значений при температуре $(T = T_N)$ обеспечивает значительные отклонения от закона Кюри–Вейса выше температуры Нееля T_N [6]. Далее, неравенство $V_{an}/V_{ex} \approx H_A/H_E << 1$ обеспечивает малость смещений δE_{an} (15) в спектре оператора $\left(V_{ex} + V_{an}\right)$. В то же время сравнение формул (12) и (14) указывает на значительное различие волновых функций Ψ_{AF} (10)

и Φ_{AF} (15). Квантовая теория [1] допускает такое различие, поскольку спектр изотропного оператора V_{ex} (1) вырожден, а V_{an} снимает вырождение. Однако V_{an} не единственное возмущение, влияющее на вырождение в спектре V_{ex}. В этой статье обсуждается другое такое возмущение, с которым связан так называемый переход Пайерлса [7].

Переход Пайерлса

Переходом Пайерлса принято называть деформацию линейной периодической цепочки атомов, обеспечивающую удвоение периода (см. рисунок). Представленная на рисунке деформация цепочки атомов первоначально была предложена для описания перехода металл–диэлектрик при половинном заполнении зоны проводимости. При удвоении периода зона проводимости делится пополам и между подзонами раскрывается полоса запрещенных энергий. При половинном заполнении исходной зоны нижняя подзона оказывается полностью заполненной, а верхняя – полностью пустой. Это соответствует энергетическому спектру электронов в диэлектрике. Понижение потолка нижней подзоны обеспечивает уменьшение кинетической энергии электронов, которое перекрывает энергия деформации цепочки E_{deff}. При $\delta d << d$ энергия E_{deff} может быть записана в виде

$$E_{deff} = Q\left(\frac{\delta d}{d}\right)^2. \tag{18}$$



Деформация линейной периодической цепочки атомов, определяющая переход Пайерлса:

а – исходная цепочка спинов с периодом *d*; *б* – цепочка после перехода с периодом 2*d*.

Deformation of a linear periodic chain of atoms, which determines the Peierls transition:

a – is an initial chain of spins with a period *d*; *б* – is a chain after the transition with a period of 2*d*

В диэлектрической цепочке атомов зона проводимости полностью заполнена, поэтому после перехода Пайерлса заполненными оказываются обе подзоны. В результате уменьшение кинетической энергии электронов нижней подзоны компенсируется увеличением этой энергии электронов верхней подзоны. Однако возникает другая возможность потери устойчивости цепочки, если ее атомы имеют нескомпенсированные спины, связанные с обменным взаимодействием V_{ex} (1). Эту возможность мы продемонстрируем, сравнив обменные энергии E_a удвоенной элементарной ячейки до деформации Пайерлса и E_b элементарной ячейки после такой деформации.

Для упрощения расчетов мы используем несколько приближений.

(i) При оценке E_a для подрешеточного состояния будем пренебрегать энергией анизотропии δE_{an} по сравнению с E_{ex} в (13), учитывая соотношение

$$\delta E_{an}/E_{ex} = H_A/H_E < 10^{-4}.$$

(ii) Используем приближение ближайших соседей для обменного взаимодействия V_{ex} (1):

$$J(\vec{r}_j - \vec{r}_k) = J(d) \quad \text{при } \left|\vec{r}_j - \vec{r}_k\right| = d,$$

$$J(\vec{r}_j - \vec{r}_k) = 0 \quad \text{при } \left|\vec{r}_j - \vec{r}_k\right| > d.$$

(iii) Учтем, что спины $\vec{s}_j$ и $\vec{s}_k$ в подрешеточном состоянии ведут себя в нулевом приближении как классические векторы. Это следует из формулы (14), связывающий квантовые состояния этих спинов с параметром ε. Это позволяет при вычислении обменной энергии учитывать в операторе V_{ex} (1) только слагаемое V_{ex}^{zz}.

С учетом упрощений (i)–(iii) для обменной энергии E_a одноэлектронных спинов $\vec{s}_3$ и $\vec{s}_4$ (рисунок *а*) получается выражение

$$E_a = V_{ex}(2,3) + V_{ex}(3,4) + V_{ex}(4,5) = 3V_{ex}(3,4) = \frac{3}{4}J(d) \tag{19}$$

Эта величина соответствует обменной энергии спинов в удвоенной элементарной ячейке на рисунке *а*. При вычислении обменной энергии, соответствующий спинам в элементарной ячейке деформированной цепочки (рисунок *б*), состояние спинов $\vec{s}_3$ и $\vec{s}_4$ будем описывать волновой функцией

$$\psi_- = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\psi_{3,1/2}\psi_{4,-1/2} - \psi_{3,-1/2}\psi_{4,1/2}\right). \tag{20}$$

На это состояние квантовые свойства спинов влияют радикально, поэтому их обменная энергия E_b определяется обоими слагаемыми V_{ex}^{zz} и $V_{ex}^{\pm}$ в V_{ex} (1) и описывается формулой

$$E_b = -\frac{3}{4}J(d - \delta d). \tag{21}$$

Это состояние получило название «спин-Пайерлс» [8, 9]. Полному спину пары $\vec{s}_3$ и $\vec{s}_4$ соответствует квантовое число $S = 0$:

$$\left\langle \psi_- \middle| \left(\overrightarrow{s_3} + \overrightarrow{s_4}\right) \middle| \psi_- \right\rangle = S(S+1) = 0, \tag{22}$$

что обеспечивает отсутствие обменного взаимодействия между парами (1, 2), (3, 4) и т. д. Это позволяет при записи обменной энергии E_b (21) ограничиться спинами, расположенными в элементарной ячейке деформированной цепочки (рисунок *б*). В отсутствие деформации $(\delta d \neq 0)$ $E_a = E_b$. Деформация $(\delta d \neq 0)$ снимает это вырождение. Если принять, что с уменьшением d обменный параметр $J(d)$ растет:

$$J(d - \delta d) = J(d) + P\frac{\delta d}{d} + \ldots$$

т. е. коэффициент $P > 0$, то переход Пайерлса понижает обменную энергию:

$$\delta E_{ex} = E_b - E_a = -\frac{3}{4}J(d-\delta d) + \frac{3}{4}J(d) = -\frac{3}{4}P\frac{\delta d}{d} < 0 . \quad (23)$$

Полное изменение энергии цепочки спинов, учитывающее энергию деформации δE_{deff} (18):

$$\delta E\left(\frac{\delta d}{d}\right) = \delta E_{ex} + \delta E_{def} = -\frac{3}{4}P\frac{\delta d}{d} + Q\left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 \quad (24)$$

достигает минимального значения

$$\delta E_{\min} = -\frac{9}{64}\frac{P^2}{Q} = -\Delta < 0 \quad (25)$$

при равновесном значении

$$\frac{\delta d}{d} = \frac{3}{8}\frac{P}{Q} . \quad (26)$$

Величина Δ (25) имеет смысл энергии связи в парах, формирующих состояние «спин-Пайерлса». Нулевое значение полного спина пары $S = 0$ (22) означает, что магнитные свойства такого состояния определяются диамагнетизмом электронов атомов цепочки, если тепловая энергия kT связана с Δ неравенством:

$$kT << \Delta . \quad (27)$$

Энергия связи спинов в парах Δ (25) обеспечивает экспоненциальную температурную зависимость «спин-Пайерлс» антиферромагнетиков:

$$\chi(T) \sim \exp\left(\frac{\Delta}{kT}\right). \quad (28)$$

По этой зависимости они были обнаружены экспериментально [8, 9].

Заключение

Гипотеза спиновых подрешеток (8) и (9) позволяет описать свойства подавляющего большинства антиферромагнетиков [5]. Новая модель формирования этих подрешеток связывает их существование с условием (17), содержащим три параметра H_A, H_E и N. Структуре спин-Пайерлс соответствует значение $N = 1$, обеспечивающее условие (14), соответствующее полной неопределенности в ориентации каждого спина. Такой тип антиферромагнетиков без выделенных направлений для подрешеток, т. е. без подрешешеток, почти не обсуждается в литературе по магнетизму (см. например [5]). Тем не менее к нему относятся спиновые цепочки Холдейа [10], теоретическое описание которых отмечено Нобелевской премией в 2016году.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Квантовая механика (нерелятивистская теория). – Изд. 6-е, испр. – М.: Физматлит, 2004. – 800 с.
2. **Anderson P.W.** An approximate quantum theory of the antiferromagnetic ground state // Physical Review. – 1952. – Vol. 86 (5). – P. 694–701.

3. **Ziman J.M.** Antiferromagnetism by the Spin Wave Method II: Magnetic Properties // Proceedings of the Physical Society. Section A. – 1952. – Vol. A 65 (7). – P. 548–556.
4. **Kurkin M.I.**, **Orlova N.B.** An approximate quantum theory of the antiferromagnetic ground state // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 474. – P. 287–295.
5. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков / Е.А. Туров, А.В. Колчанов, В.В. Меньшенин, И.Ф. Мирсаев, В.В. Николаев. – М.: Физматлит, 2001. – 367 с.
6. **Орлова Н.Б., Куркин М.И.** Проблемы теории магнитной восприимчивости антиферромагнетиков выше температуры Нееля, связанные с приближением молекулярного поля // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2019. – № 4. – С. 44–53.
7. **Peierls I**. Zur theorie des diamagnetismus von leitungselektronen // Zeitschrift für Physik. – 1933. – Vol. 80. – P. 763–791.
8. **Васильев А.Н.** Спин-Пайерлс // Природа. – 1997. – № 12. – С. 33–43.
9. **Hase M., Terasaki I., Uchinokura K.** Observation of the spin-Peierls transition in linear Cu^{2+} (spin-1/2) chains in an inorganic compound $CuGeO_2$ // Physical Review Letters. – 1993. – Vol. 70 (23). – P. 3651–3654.
10. **Haldane F.D.M.** Nonlinear field theory of large-spin heisenberg antiferromagnets: semiclassically quantized solitons of the one-dimensional easy-axis Néel state // Physical Review Letters. – 1983. – Vol. 50 (15). – P. 1153–1156.

PEIERLES TRANSITION IN A LINEAR CHAIN OF EXCHANGE RELATED SPINS

Orlova N.B.[1], Kurkin M.I.[2]
[1] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*
[2] *Institute of Metal Physics UrB RAS, Ekaterinburg, Russia*

The loss of stability of the antiferromagnetic state of matter respective to the Peierls transition is calculated in the framework of a new model of magnetic sublattices. In this new model, in contrast to the Anderson-Ziman sublattice model, the antiferromagnetic spin ordering is provided by a weak influence of magnetic anisotropy. Magnetic anisotropy suppresses exchange mixing with a sufficiently large number of spins in the sublattice $N > 10^5$. The Peierls transition consists in the deformation in a linear chain of atoms, namely the convergence of neighboring atoms, at which the period of the crystal lattice increases by factor of two. When atoms approach, exchange interaction is established between a pair of nearest atomic spins only. Based on the new model of magnetic sublattices, the antiferromagnetic sublattice state of the periodic chain of spins is found to be unstable respective to the transition to the Peierls state. During the transition to the "spin-Peierls" state, the spins of neighboring atoms will be ordered antiparallelly, but since there is no preferred direction of spin ordering, it is impossible to introduce the concept of magnetic sublattices. Such magnetic states can be suggested from the exponential dependence of the magnetic susceptibility on the reciprocal temperature. The electrons magnetism in this state is determined by the atomic diamagnetism if the frequencies of thermal motion are small compared to the exchange frequency.

Keywords: antiferromagnets, magnetic sublattices, exchange interaction, Peierls transition.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-7-14

REFERENCES

1. Landau L.D., Lifshits E.M. *Kvantovaya mekhanika (nerelyativistskaya teoriya)* [Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory]. 6th ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 800 p.
2. Anderson P.W. An approximate quantum theory of the antiferromagnetic ground state *Physical Review*, 1952, vol. 86 (5), pp. 694–701.
3. Ziman J.M. Antiferromagnetism by the Spin Wave Method II: Magnetic Properties. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 1952, vol. A 65 (7), pp. 548–556.
4. Kurkin M.I., Orlova N.B. An approximate quantum theory of the antiferromagnetic ground state. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 474, pp. 287–295.

5. Turov E.A., Kolchanov A.B., Men'shenin V.V., Mirsaev I.F., Nikolaev V.V. *Simmetriya i fizicheskie svoistva antiferromagnetikov* [Symmetry and physical properties of antiferromagnets]. Fizmatlit Publ., 2001. 367 p.
6. Orlova N.B., Kurkin M.I. Problemy teorii magnitnoi vospriimchivosti anti-ferromagnetikov vyshe temperatury Neelya, svyazannye s priblizheniem molekulyarnogo polya [The problems of the magnetic susceptibility theory of antiferromagnetics above the Néel temperature related to the molecular field approximation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 4, pp. 44–53.
7. Peierls I. Zur theorie des diamagnetismus von leitungselektronen. *Zeitschrift für Physik*, 1933, vol. 80, pp. 763–791.
8. Vasil'ev A.N. Spin-Paierls [Spin- Peierls]. *Priroda*, 1997, no. 12, pp. 33–43. (In Russian).
9. Hase M., Terasaki I., Uchinokura K. Observation of the spin-Peierls transition in linear Cu^{2+} (spin-1/2) chains in an inorganic compound $CuGeO_2$. *Physical Review Letters*, 1993, vol. 70 (23), pp. 3651–3654.
10. Haldane F.D.M. Nonlinear field theory of large-spin heisenberg antiferromagnets: semiclassically quantized solitons of the one-dimensional easy-axis Néel state. *Physical Review Letters*, 1983, vol. 50 (15), pp. 1153–1156.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Орлова Наталья Борисовна – родилась в 1982 году, канд. физ.-мат. наук, доцент, физико-технический факультет, НГТУ. Область научных интересов: физика твердого тела, физика магнитных явлений. Опубликовано 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: n.b.orlova@corp.nstu.ru).

Orlova Natalia Borisovna (b. 1982) – PhD, Technical Physics Department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on solid state physics and physics of magnetic phenomena. She is the author of 50 scientific papers. (Address: 20 K. Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail: n.b.orlova@corp.nstu.ru).

Куркин Михаил Иванович – родился в 1938 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики металлов УрО РАН. Область научных интересов: физика твердого тела, физика магнитных явлений. Опубликовано 200 научных работ. (Адрес: 620108, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18. E-mail: kurkin@corp.nstu.ru).

Kurkin Mikhail Ivanovich (b. 1938) – professor, doctor of science (Phys.& Matrh.), chief researcher at the Institute of Metal Physics UrO RAS. His research interests are currently focused on solid physicis and physics of magnetic phenomena. He is the author of 200 scientific papers. (Address: 18 Sofya Kovalevskaya Street, Ekaterinburg, Russia, 620108. E-mail: kurkin@corp.nstu.ru).

Статья поступила 2 ноября 2021 г.
Received November 2, 2021

To Reference:

Orlova N.B., Kurkin M.I. Perekhod Paierlsa v lineinoi tsepochke obmenno svyazannykh spinov [Peierles transition in a linear chain of exchange related spins]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 4 (53), pp. 7–14. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-7-14.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 октябрь–декабрь № 4 (53)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.311.6

АНАЛИЗ ПАТЕНТНОЙ АКТИВНОСТИ РОССИЙСКИХ РАЗРАБОТЧИКОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНИКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

И.В. Бузук[1], А.В. Кривецкий[2], В.А. Рентеев[3]
[1] *Сибирский центр Федерального института промышленной собственности*
[2] *Новосибирский государственный технический университет*
[3] *Федеральный институт промышленной собственности*

Цель исследования – определение востребованности разработок приборов, методов и алгоритмов выполнения прецизионных измерений в различных областях техники и научного эксперимента по активности их регистрации в виде форм интеллектуальной собственности. Рассматриваются динамика числа поданных заявок в Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) и динамика опубликованных охранных документов в области прецизионных измерений, а также представлен анализ распределения опубликованных охранных документов по классам Международной патентной классификации (МПК). Помимо прочего анализ патентов позволяет оценить способы снижения погрешности прецизионных решений.

Научная новизна исследования заключается в использовании статистики патентования существующих технических решений в области прецизионных измерений в качестве обоснования актуальности создания новых решений.

В результате определена устойчивая интенсивность патентования прецизионных решений, указывающая на актуальность выполнения работ в этой области. Анализ способов снижения погрешностей прецизионных измерителей указывает на актуальность способов снижения уровней шумов первичных измерительных преобразователей.

Ключевые слова: прецизионные измерения, патент, анализ патентной активности, малошумящий источник тока/напряжения

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-15-25

Введение

В настоящее время имеется постоянно растущий спрос на прецизионные измерения, который наблюдается в самых разных отраслях экономики.

Под прецизионными измерениями понимают измерения, проводимые с очень высокой точностью, т. е. с весьма малой погрешностью [1].

В большинстве стран мира в настоящее время наблюдается общий рост научных работ в инновационных областях техники [2], в том числе и в области прецизионных методов измерения.

Одним из ключевых показателей, характеризующих уровень научного и технологического развития государства является состояние его патентного рынка. Патентный рынок и перспективы его развития определяются количеством действующих патентов на изобретения и полезные модели, количеством поданных заявок на патенты, что является одной из основных характеристик состояния промышленного развития каждой страны. По мнению специалистов, зарегистрированным изобретениям в недалеком будущем предстоит стать ценным активом, фундаментом новых экономических моделей и высоколиквидных рынков [3].

© 2021 И.В. Бузук, А.В. Кривецкий, В.А. Рентеев

С ростом технического прогресса возрастает и область применения прецизионных измерений. Становятся выше и требования к оценке прецизионности в различных областях техники. Поэтому в настоящее время по-прежнему требуется раскрытие новых способов осуществления прецизионных измерений, создание устройств, позволяющих реализовывать такие методы. Сегодня, с учетом рыночной конкурентной борьбы, значительная роль в сохранении и совершенствовании отечественных разработок в области техники прецизионных измерений должна быть отведена повышению активности сегодняшних и будущих российских изобретателей, от которых напрямую зависит технический прогресс государства. При этом увеличивается необходимость патентной защиты разработанных изобретателями новых технологий от конкурентов.

Для ориентирования в сфере активности российских разработчиков в области техники прецизионных измерений проведен анализ патентной активности России в указанной области. Представлена динамика числа поданных заявок в ФИПС и динамика опубликованных охранных документов в области прецизионных измерений, а также представлен анализ распределения опубликованных охранных документов по классам МПК. Ориентировочная статистика в данной статье представлена по оценочным данным специализированной поисковой системы Patsearch и информационно-поисковой системы ФИПС.

1. Состояние патентной активности российских разработчиков в области техники прецизионных измерений

Количество поданных в ФИПС заявок на изобретения и полезные модели, связанных с областью прецизионных измерений, за последние 5 лет (2016–2020 гг. включительно) показано на рис. 1.

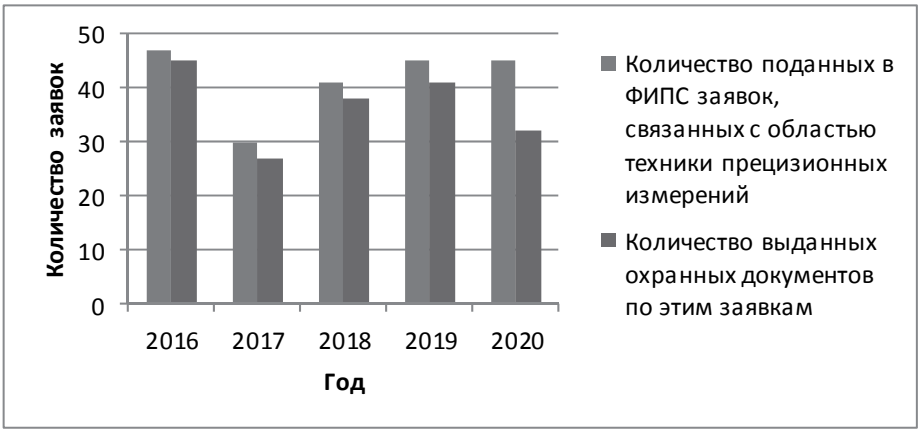


Рис. 1 – Количество поданных в ФИПС заявок и выданных по ним охранных документов, связанных с областью техники прецизионных измерений

Fig. 1 – The number of applications filed with the FIPS and documents of issued titles related to the field of precision measurement technology

Для получения гистограммы, приведенной на рис. 1, был проведен информационный поиск по рубрикам МПК G01 «Измерение; испытание», G05F «Системы регулирования электрических или магнитных величин …» и H03F «Усилители …». В качестве ключевых слов для отбора изобретений и полезных моделей, которые можно отнести к прецизионным измерениям использовались слова «преци-

зионный», «высокоточный», «повышенной точности» с соответствующими усечениями окончаний.

Как видно из рис. 1, количество поданных заявок на изобретения и полезные модели после 2016 года сократилось, после чего в период с 2018 по 2019 год наблюдается постепенное увеличение количества поданных заявок и начиная с 2019 года отмечается сохранение примерно того количества поданных заявок, которое было подано в 2016 году.

В свою очередь в первом полугодии 2021 года (на рис. 1 не показано) была подана уже 31 заявка на изобретения и полезные модели в области прецизионных измерений. Общая динамика подачи заявок в данной области техники позволяет предположить, что количество охранных документов в области техники прецизионных измерений в 2021 году как минимум останется на уровне предыдущих лет.

Анализ патентной активности российских разработчиков (рис. 2) показал, что по количеству выданных патентов на изобретения и полезные модели за период 2016–2021 гг. лидирует ФГБОУ ВО «Донской государственный университет» (ДГТУ), и доля полученных им патентов составляет порядка 7 % от общего количества в рассматриваемой области техники. За ним следуют АО Концерн ЦНИИ «Электроприбор» и ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» (их доля 5 и 3 % соответственно).

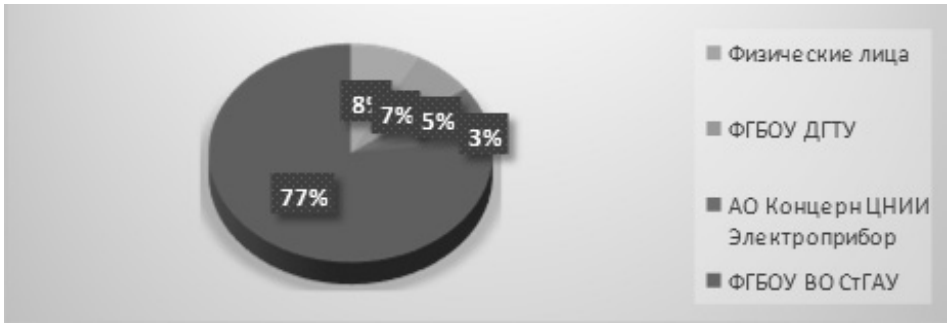


Рис. 2 – Основные обладатели охранных документов за 2016–2021 гг. (в процентах)

Fig. 2 – Main holders of titles of protection for 2016–2021 (in percent)

Донской государственный технический университет специализируется на разработке операционных усилителей и пиковых детекторов. Данная область техники представляется весьма перспективной для инновационных разработок и последующей коммерциализации полученных патентов, однако, к сожалению, по состоянию на сегодняшний день не наблюдается эффективное использование патентов ДГТУ.

2. Основные группы технических решений по прецизионным измерениям

Кроме того, анализ патентной активности российских разработчиков в области техники прецизионных измерений показал, что в качестве обладателей охранных документов за период 2016–2021 гг. представлены более 100 различных патентовладельцев, на долю которых приходится 234 опубликованных охранных документа. В данном случае сложно выделить какую-то приоритетную область патентования, связанную с техникой прецизионных измерений. Распределение запатентованных изобретений и полезных моделей в рассматриваемой области техники по классам МПК показано на рис. 3.

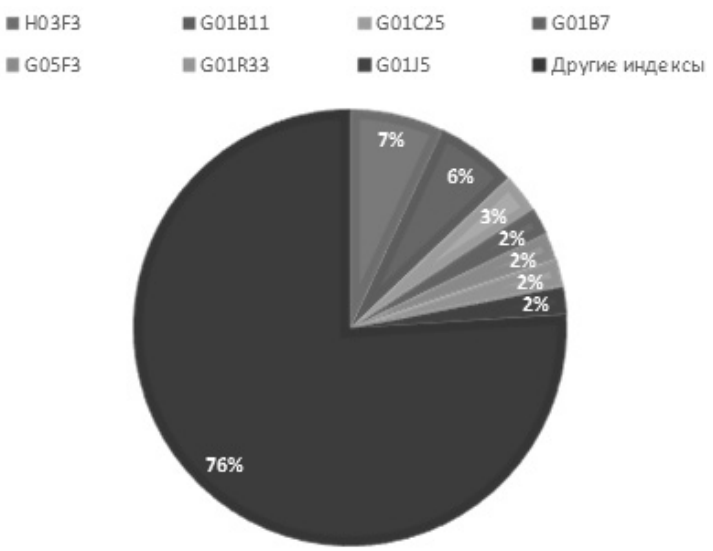


Рис. 3 – Количество охранных документов, распределенных по классу МПК (в процентах)

Fig. 3 – The number of titles of protection distributed by the IPC class (in percent)

Как видно из рис. 3, наибольшее количество опубликованных патентов относится к области физики, а именно классы:

- H03F3 – усилители, имеющие в качестве усилительных элементов электронные или полупроводниковые приборы;
- G01B11 – измерительные устройства, характеризуемые использованием оптических средств;
- G01C25 – калибровка, поверка приборов;
- G01B7 – измерительные устройства, характеризуемые использованием электрических и магнитных средств;
- G05F3 – системы без обратной связи для регулирования электрических величин с помощью неуправляемых элементов или неуправляемых комбинаций из саморегулирующихся элементов;
- G01R33 – устройства для измерения переменных магнитных величин;
- G01J5 – радиационная пирометрия.

Процесс осуществления прецизионных измерений является сложным технологическим процессом. Для измерения нужно сложное измерительное оборудование, а также налаженный процесс. Это определяет основные проблемы процесса проведения прецизионных измерений. При этом непрерывный характер производства и реализации требует срочных конструкторских решений и высокой точности оборудования. Чтобы максимально приблизиться к этой точности, применяют различные метрологические методы. Соответственно при исследовании патентной активности изобретателей в данной области техники представляется целесообразным исследовать несколько групп изобретений (полезных моделей), в зависимости от того, какие объекты, связанные с прецизионной измерительной техникой, патентуются.

При исследовании выявленного массива охранных документов был проведен анализ сущности технических решений по прецизионным измерениям. Они были распределены на три основные группы.

К первой группе относятся решения, в которой охранными документами защищены способы проведения измерений, исследований и т. п. В такой категории патентов раскрываются не устройства как таковые, а показываются методы измерений различных параметров, описываются технологические процессы, обеспечивающие проведение измерений с прецизионной точностью, для реализации которых используются ранее известные из области техники средства, предназначенные для прецизионных измерений.

В качестве примера можно привести решение, представленное в патенте [4], в котором раскрывается процесс прецизионных измерений постоянного или медленно изменяющегося давления, в широком диапазоне рабочих температур, газообразных или жидких веществ. В предложенном способе прецизионного измерения давления калибровку аддитивной и мультипликативной температурных погрешностей проводят при непрерывном измерении напряжений с диагоналей тензомоста отдельно от минимального и максимального значения давления при измерении температуры от минимальной до максимальной рабочей температуры и обратно, а нелинейность преобразователя от давления оценивают при изменении давления в нормальных условиях и крайних точках рабочих температур.

В качестве еще одного примера может быть рассмотрен способ измерения абсолютного расстояния [5], который может найти широкое применение в точном машиностроении и электронной технике. Данный способ измерения включает направление излучения лазерного диода на измеряемый объект, модулирование тока питания лазера определенной частотой, преобразование отраженного от объекта излучения в автодинный сигнал, регистрацию автодинного сигнала, разложение автодинного сигнала в Фурье-спектр. Повышенная таким образом точность измерения позволит контролировать процесс разработки прецизионных устройств в компьютерной технике, в микро- и наноэлектронике.

Доля опубликованных охранных документов в качестве объекта охраны, в которых представлен какой-либо способ, связанный с прецизионными измерениями, от общего числа патентов составляет около 10 %.

Ко второй группе можно отнести такие решения, которые сами по себе не являются устройствами, обеспечивающими прецизионную точность измерений, но являются элементами конструкций таковых устройств. Такие средства способствуют повышению точности процесса прецизионных измерений при их использовании совместно с устройствами, непосредственно осуществляющими такие измерения. К таким средствам относятся: стенды, платформы, направляющие, крепления, опоры и т. п.

Так в патенте [6] точность прецизионных измерений длины и линейных перемещений в реальном масштабе времени достигается за счет конструкторского выполнения направляющей стойки, к которой с помощью кронштейна прикреплено измерительное оборудование, и за счет отсутствия контакта стойки со столиком с базовой поверхностью, установленным на основании посредством трех регулировочных элементов, причем один регулировочный элемент жестко связан с основанием, а два других регулировочных элемента выполнены с возможностью настройки.

В качестве второго примера можно указать платформу устройства прецизионного перемещения, приведенную в патенте [7], относящуюся к измерительной технике. Данная платформа предназначена для линейных подвижек и может быть использована для перемещения небольших и оптически прозрачных компонентов. В данном решении за счет конструктивного выполнения платформы

устраняются негативные колебания в вертикальной плоскости при горизонтальном перемещении платформы, которые характерны для систем крепления винт–гайка. В предложенной конструкции гайка конструктивно выполнена совместно с мембранной муфтой, а второй конец муфты неподвижно прикреплен к движимой платформе.

Количество опубликованных охранных документов, в которых раскрываются решения, являющиеся «сопутствующими» к приборам, связанным с прецизионными измерениями, от общего числа патентов составляет около 7 %.

Третью группу составляют конструкторские решения, которые используют непосредственно в прецизионных измерениях.

Например, в патенте [8] представлен инклинометр, который может быть использован при проведении геофизических исследований в процессе бурения при проводке горизонтальных и наклонно-направленных нефтяных и газовых скважин. Для обеспечения высокой точности измерений в конструкции такого инклинометра используют прецизионный источник опорного напряжения с малым температурным дрейфом.

В патенте [9] раскрыт плотномер для прецизионных измерений жидких сред, повышение точности измерения у которого достигается за счет того, что магнитное поле в приборе создается электромагнитом без магнитопровода и ступенчатым источником тока питания электромагнита, имеющим электрическую связь с блоком вычисления плотности.

В решении [10] представлен акселерометр компенсационного типа, у которого повышается точность измерений за счет компенсации нулевого сигнала, возникающего из-за влияния окружающей температуры и температуры собственного прогрева прибора.

Доля опубликованных охранных документов по решениям, относящимся к третьей группе, превышает 80 % от общего количества полученных патентов, связанных с прецизионными измерениями за последние пять с половиной лет. По всей видимости, это связано с тем, что патенты, полученные на такие решения, могут быть наиболее успешно коммерциализированы, а факт несанкционированного использования патентов сравнительно легко отследить на практике.

3. Изобретательские тенденции в технике прецизионных измерений

Исследование передовых изобретательских тенденций в технике прецизионных измерений показало, что в последнее время во всем мире при разработке прецизионных измерительных устройств, кроме основных характеристик, делается акцент на учет шумовых параметров. Низкий уровень шумов является важнейшим параметром современных измерительных приборов, применяемых на каждом этапе производства полупроводниковых, сверхпроводимых и нанотехнологичных устройств на стадиях от разработки до внедрения.

Например, экспериментально доказано, что микроэлектронные устройства, основывающиеся на эффекте сверхпроводимости, могут быть описаны как макроскопические квантовые объекты. Использование их как базовых элементов для разработки квантового компьютера является актуальной и перспективной задачей. Основу таких объектов составляет сверхпроводниковый квантовый бит (кубит), представляющий собой туннельные контакты Джозефсона, включенные последовательно в замкнутую петлю.

В качестве примера подобных решений можно привести устройство двухполярного малошумящего источника питания [11], разработанное ООО «Альфа», в котором повышение стабильности выходного напряжения устройства осуществ-

ляется за счет устранения влияния импульсных преобразователей на линейный регулятор напряжения и устранения воздействия внешних помех на управляющий сигнал.

Среди отечественных патентообладателей, проявляющих наибольшую активность за последние пять лет вокруг малошумящих источников тока/напряжения, которые могут быть использованы в средствах измерения во всех возможных областях, следует выделить Ставропольский государственный аграрный университет (ФГБОУ ВО Ставропольский государственный аграрный университет), специализирующийся в разработках устройств формирования опорного напряжения с пониженным уровнем шумов, на долю которого приходится около 30 % от общего количества патентов.

Так, например, в патенте [12] раскрыто устройство формирования опорного напряжения, применяемое при создании малошумящих источников стабильного напряжения постоянного тока. Данное решение за счет своего конструктивного выполнения способствует лучшему подавлению шумовой составляющей (особенно в области инфранизких частот) в выходном сигнале по сравнению с известными ранее устройствами аналогичного назначения.

Из последних передовых изобретательских новаций можно выделить высоковольтный стабилизированный источник питания, разработанный в «Кольском научном центре Российской академии наук» [13]. Такой источник питания постоянного тока может быть использован для питания аналитических приборов, требующих регулируемого высокостабильного питающего напряжения. При этом высокое качество питающего напряжения определяется такими параметрами, как низкий уровень пульсаций, малая долговременная и краткосрочная временная нестабильность, малая температурная нестабильность, высокая начальная точность и повторяемость. Такие параметры достигаются за счет применения в источнике питания управляемого источника опорного напряжения, содержащего прецизионный 16-разрядный цифроаналоговый преобразователь и высокостабильный сверхмалошумящий источник опорного напряжения.

Исследования патентного рынка в области прецизионных малошумящих источников тока/напряжения показали, что активность российских разработчиков в этом направлении крайне низкая по сравнению с иностранными разработчиками. Как показал информационный поиск в системе PatSearch, российские изобретатели за последние пять лет запатентовали три решения в данной области техники, в то время как их иностранные коллеги – более 500 подобных решений.

В то же время в ходе анализа опубликованной периодической литературы, в том числе и за рубежом, по теме прецизионных малошумящих источников тока/напряжения за последнее время выявлено наличие публикаций, раскрывающих конструкции малошумящих источников тока/напряжения, которые могут быть применены в прецизионных измерениях, методы осуществления прецизионных измерений с использованием таких источников. При этом они не защищены патентами и стали общедоступными сведениями для ознакомления широкого круга лиц, что может привести к тому, что новейшие разработки в области техники прецизионных измерений, разработанные в России, могут использоваться зарубежными компаниями без заключения лицензионных договоров с разработчиками и соответствующих им выплат.

Авторам статей следует обратить внимание, что в российском патентном законодательстве существует норма, согласно которой раскрытие информации, относящейся к изобретению, автором изобретения, заявителем либо любым получившим от них прямо или косвенно эту информацию лицом, вследствие чего

сведения о сущности изобретения стали общедоступными, не является обстоятельством, препятствующим признанию патентоспособности технического решения при условии, что заявка на выдачу патента на изобретение подана в федеральный орган исполнительной власти по интеллектуальной собственности в течение шести месяцев со дня раскрытия информации (см. п. 3 ст. 1350, 1351 ч. 4 Гражданского кодекса РФ). Поэтому, если разработчик по каким-либо причинам не успел подать заявку на изобретение или полезную модель, однако собирается это сделать, у него еще есть шесть месяцев на подачу данной заявки.

Заключение

Подводя итоги данной статьи, можно сделать вывод об относительной стабильности поступления заявок на изобретения и полезные модели в области, связанной с прецизионными измерениями, за последние 5 лет. Однако с учетом последних тенденций в современной науке и технике можно констатировать, что для эффективного развития данной отрасли в России этого недостаточно. Для того чтобы успешно конкурировать на рынке с иностранными компаниями, российским разработчикам необходимо чаще патентовать свою продукцию и уделить большее внимание патентным исследованиям в области новейших высокоточных измерительных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вятчанин С.П.** Прецизионные измерения // Большая российская энциклопедия. – М., 2015. – Т. 27. – С. 453.
2. Тренды публикационной активности российских исследователей по данным Web of science, Scopus. Вып. 1 / Российский научно-исследовательский институт экономики, политики и права в научно-технической сфере. – М.: IMG Print, 2020. – 60 с.
3. **Chen Z.-H., Zhou Z.-J.** Research on the Evaluation Index System for Patent Financing Capacity of High-tech Enterprises // Advances in Social Science, Education and Humanities Research (ASSEHR). – 2018. – Vol. 181: 4th International Conference on Social Science and Higher Education (ICSSHE 2018). – P. 632–635.
4. Патент 2585486 Российская Федерация, МПК G01L 09/04 (2006/01), G01L 27/00 (2006/01), G12B 7/00 (2006/01), G01D 3/28 (2006/01). Способ измерения давления и калибровки на основе тензомостового интегрального преобразователя давления / О.И. Артемьева, В.В. Моршнев, В.Г. Стахин. – № 2015112380/28; заявл. 07.04.2015; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15.
5. Патент 2738876 Российская Федерация, МПК G01B 11/14 (2006/01), G01S 17/32 (2006/01). Способ измерения абсолютного расстояния / А.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин, А.В. Джафаров. – № 2020117946; заявл. 01.06.2020; опубл. 17.12.2020, Бюл. № 35.
6. Патент 196095 Российская Федерация, МПК G01B 3/22 (2006/01). Устройство для контроля линейных размереов / В.Н. Реутов, Е.В. Реутов, С.К. Елгаев, С.Н. Андреева, С.Д. Щиляев, А.А. Цапалов. – № 2019132083; заявл. 10.10.2019; опубл. 17.02.2020, Бюл. № 5.
7. Патент 204327 Российская Федерация, МПК F16C 29/02 (2006/01). Платформа устройства прецизионного перемещения / А.О. Левченко. – № 2021102860; заявл. 08.02.2021; опубл. 20.05.2021, Бюл. № 14.
8. Патент 204987 Российская Федерация, МПК G01C 9/00 (2006/01), E21B 47/022 (2006/01). Инклинометр / В.М. Иванов, А.П. Судаков. – № 2020142955; заявл. 24.12.2020; опубл. 22.06.2021, Бюл. № 18.
9. Патент 2652647 Российская Федерация, МПК G01N 9/00 (2006/01). Устройство для измерения плотности жидкой среды / А.И. Свиридов, Т.В. Свиридова. – № 2016133709; заявл. 17.08.2016; опубл. 28.04.2018, Бюл. № 06.

10. Патент 2741277 Российская Федерация, МПК G01P 15/13 (2006/01). Акселерометр компенсационного типа / В.Б. Белугин, А.Н. Гусев, И.Ю. Козлов, А.А. Рязанов, А.Ю. Чемоданов, В.А. Шерстнев. – № 2020107219; заявл. 17.02.2020; опубл. 22.01.2021, Бюл. № 03.
11. Патент 174218 Российская Федерация, МПК G05F 1/46 (2006/01). Устройство двухполярного малошумящего источника питания / Н.В. Краснов, А.Г. Монаков, А.Н. Арсеньев. – № 2015151066; заявл. 30.11.2015; опубл. 09.10.2017, Бюл. № 28.
12. Патент 2676755 Российская Федерация, МПК G05F 3/08 (2006/01). Устройство формирования опорного напряжения с пониженным уровнем шумов / С.Н. Бондарь, М.С. Жаворонкова. – № 2018100699; заявл. 10.01.2018; опубл. 11.01.2019, Бюл. № 2.
13. Патент 202966 Российская Федерация, МПК H02M 3/337 (2006/01). Высоковольтный стабилизированный источник питания / В.В. Колобов, М.Б. Баранник, А.В. Гудков. – № 2020139639; заявл. 01.12.2020; опубл. 17.03.2021, Бюл. № 8.

ANALYSIS OF THE PATENT ACTIVITY OF RUSSIAN DEVELOPERS IN THE FIELD OF PRECISION MEASUREMENT TECHNOLOGY

Buzuk I.V.[1], Krivetsky A.V.[2], Renteev V.A.[3]
[1] *Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property, Novosibirsk, Russian Federation*
[2] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*
[3] *Federal Institute of Industrial Property, Moscow, Russian Federation*

The point of the study – to determine the demand for the development of devices, methods and algorithms for performing precision measurements in various fields of technology and a scientific experiment on the activity of their registration as forms of intellectual property. The dynamics of the number of applications filed with the Federal Institute of Industrial Property and the dynamics of published titles of protection in the field of precision measurements are considered, and an analysis of the distribution of published titles of protection by classes of the International Patent Classification is presented. Among other things, the analysis of patents allows you to evaluate ways to reduce the error of precision solutions.

The scientific novelty of the research lies in the use of statistics on patenting the existing technical solutions in the field of precision measurements as a justification for the relevance of creating new solutions.

As a result, a steady intensity of precision solutions patenting was determined, indicating the relevance of work in this area. Analysis of methods for reducing errors of precision meters indicates the relevance of methods for reducing the noise levels of primary measuring transducers.

Keywords: precision measurements, patent, patent activity analysis, low noise current/voltage source

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-15-25

REFERENCES

1. Vyatchanin S.P. Pretsizionnye izmereniya [Precision measurements]. *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya* [Big Russian Encyclopedia]. Moscow, 2015, vol. 27, p. 453.
2. *Trendy publikatsionnoi aktivnosti rossiiskikh issledovatelei po dannym Web of science, Scopus*. Vyp. 1 [Trends in the publication activity of Russian researchers according to Web of science Scopus. Iss. 1]. Russian Research Institute of Economics, Politics and Law in the Scientific and Technical Sphere. Moscow, IMG Print, 2020. 60 p.
3. Chen Z.-H., Zhou Z.-J. Research on the Evaluation Index System for Patent Financing Capacity of High-tech Enterprises. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research (ASSEHR)*, 2018, vol. 181. *4th International Conference on Social Science and Higher Education (ICSSHE 2018)*, pp. 632–635.

4. Artemeva O.I., Morshnev V.V., Stakhin V.G. *Sposob izmereniya davleniya i kalibrovki na osnove tenzomostovogo integral'nogo preobrazovatelya davleniya* [Method for measuring pressure and calibration based on a strain-bridge integral pressure transducer]. Patent RF, no. 2585486, 2015.
5. Skripal' A.V., Dobdin S.Yu., Dzhafarov A.V. *Sposob izmereniya absolyutnogo rasstoyaniya* [Method for measuring absolute distance]. Patent RF, no. 2738876, 2020.
6. Reutov V.N., Reutov E.V., Elgaev S.K., Andreeva S.N., Shchilyaev S.D., Capalov A.A. *Ustroistvo dlya kontrolya lineinykh razmereov.* Patent RF, no. 196095, 2019.
7. Levchenko A.O. *Platforma ustroistva pretsizionnogo peremeshcheniya* [Precision displacement device platform]. Patent RF, no. 204327, 2021.
8. Ivanov V.M., Sudakov A.P. *Inklinometr* [Inclinometer]. Patent RF, no. 204987, 2020.
9. Sviridov A.I., Sviridova T.V. *Ustroistvo dlya izmereniya plotnosti zhidkoi sredy* [A device for measuring the density of a liquid medium]. Patent RF, no. 2652647, 2016.
10. Belugin V.B., Gusev A.N., Kozlov I.Yu., Ryazanov A.A., Chemodanov A.Yu., Sherstnev V.A. *Akselerometr kompensatsionnogo tipa* [Compensation type accelerometer]. Patent RF, no. 2741277, 2020.
11. Krasnov N.V., Monakov A.G., Arsen'ev A.N. *Ustroistvo dvukhpolyarnogo maloshumyashchego istochnika pitaniya* [The device of a bipolar low-noise power source]. Patent RF, no. 174218, 2015.
12. Bondar' S.N., Zhavoronkova M.S. *Ustroistvo formirovaniya opornogo napryazheniya s ponizhennym urovnem shumov* [Reference voltage forming device with low noise level]. Patent RF, no. 2676755, 2018.
13. Kolobov V.V., Barannik M.B., Gudkov A.V. *Vysokovol'tnyi stabilizirovannyi istochnik pitaniya* [High-voltage stabilized power supply]. Patent RF, no. 202966, 2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бузук Игорь Валерьевич – родился в 1975 году, ведущий государственный эксперт по интеллектуальной собственности отдела полезных моделей Сибирского центра, ФГБУ Федеральный институт промышленной собственности. Область научных интересов: патентная экспертиза, измерительная техника. (Адрес: 630015, Россия, Новосибирск, ул. Планетная, 30, корп. 2а. E-mail: novosib09@rupto.ru).

Buzuk Igor Valeryevitch (b. 1975) – a leading state expert on intellectual property at the department of utility models of the Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property. His research interests are currently focused on patent examination and measuring technology. (Address: 30, bldg 2a, Planetnaya Street, Novosibirsk, 630015, Russia. E-mail: novosib09@rupto.ru).

Кривецкий Андрей Васильевич – родился в 1974 году, канд. техн. наук, доцент, кафедры конструирования и технологии РЭС Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрорадиоизмерения. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kriveczkij@corp.nstu.ru).

Krivetsky Andrey Vasylievitch (b. 1974) – PhD (Eng.), associate professor, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electrical- and radiomeasurements. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kriveczkij@corp.nstu.ru).

Рентеев Василий Александрович – родился в 1977 году, заведующий отделом измерительной техники и информационных технологий, ФГБУ Федеральный институт промышленной собственности. Область научных интересов: патентная экспертиза, измерительная техника. Опубликовано две научные работы. (Адрес: 125993, Россия, Москва, Бережковская наб. 30, корп. 1. E-mail: otd2835@rupto.ru).

Renteev Vasiliy Aleksandrovich (b. 1977) – head of the department of measuring and information technologies, Federal Institute of Industrial Property. His research interests are currently focused on patent examination and measuring technology He is the author of 2 scientific papers. (Address: 30, Berezhkovskaya emb., bldg 1, Moscow, 125993, Russia, E-mail: otd2835@rupto.ru).

Статья поступила 8 ноября 2021 г.
Received November 8, 2021

To Reference:

Buzuk I.V., Krivetsky A.V., Renteev V.A. Analiz patentnoi aktivnosti rossiiskikh razrabotchikov v oblasti tekhniki pretsizionnykh izmerenii [Analysis of the patent activity of Russian developers in the field of precision measurement technology]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 4 (53), pp. 15–25. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-15-25.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 октябрь–декабрь № 4 (53)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 528.7

МЕТОД ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОПРИВЯЗАННОГО ОРТОФОТОПЛАНА МЕСТНОСТИ С ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА DJI PHANTOM 4 PRO *

А.С. Захлебин
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

В статье предлагается метод обработки материалов аэрофотосъемки для построения геопривязанного ортофотоплана местности с беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 PRO с ГНСС приемником на борту. Данный метод обработки обеспечивает конечную плановую точность пространственных данных ортофотоплана до 10 см. Такой показатель является достаточным для использования итоговых моделей в землеустроительных, кадастровых, маркшейдерских и других видах работ.

Ключевые слова: аэрофотоснимок, ортофотоплан местности, плотное облако точек, точность, карта высот, выравнивание, проекция.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-26-35

Введение

В настоящее время необходимость в изготовлении геопривязанных ортофотопланов местности резко возросла. Связано это прежде всего с инициативой государственных органов, целью которых является исправление кадастровых и иных ошибок в системе кадастрового учета РФ. В связи с этим есть необходимость создания актуальных карт и топографических планов местности, основой которых являются ортофотопланы местности.

Ортофотоплан местности – полученный в результате аэрофотосъемки или космической съемки фотографический план местности. Ортофотопланы местности имеют точную геодезическую основу. В процессе формирования ортофотоплана аэрофотоснимки преобразуют из центральной проекции в ортогональную.

Также ортофотопланы и цифровые модели местности применяются в маркшейдерском деле [1], проектировании, землеустроительных работах [2, 3], мониторинге и т. д.

Для проведения камеральных работ с целью построения геопрявязанного ортофотоплана местности необходимо иметь полученные в результате авиационных работ аэрофотоснимки, данные спутниковых наблюдений с БПЛА и базовой станции, а также координаты планово-высотного обоснования в заданной системе координат.

Программно-аппаратный комплекс включает в себя программное обеспечение для обработки спутниковых измерений RTKLib. Для фотограмметрической обработки данных используется программное обеспечение Agisoft Metashape [4].

На рис. 1 приведена технологическая схема основных этапов реализации обработки результатов аэрофотосъемки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

© 2021 А.С. Захлебин

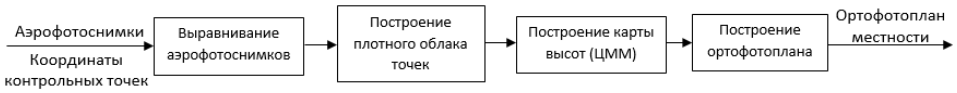


Рис. 1 – Технологическая схема метода обработки результатов аэрофотосъемки

Fig. 1 – Technological scheme of the method for processing the results of aerial photography

1. Выравнивание аэрофотоснимков

На этом этапе определяются положения аэрофотоснимков в системе координат объекта или географической системе координат по элементам внутреннего и внешнего ориентирования снимков [5–7].

Элементы внутреннего ориентирования (рис. 2): f – фокусное расстояние снимка; x_o и y_o – координаты главной точки снимка O.

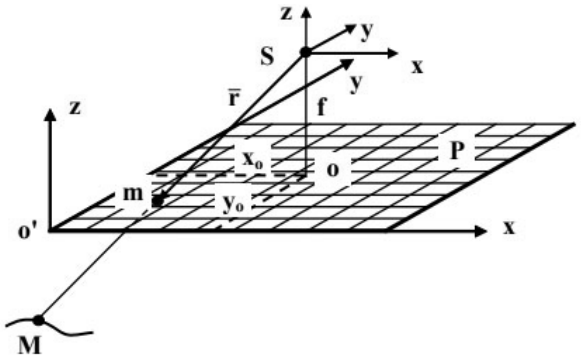


Рис. 2 – Элементы внутреннего ориентирования снимка

Fig. 2 – Elements of interior orientation of images

Точка S является началом системы координат снимка. На кадровом снимке измерение координат точек выполняется системой координат матрицы цифровой фотокамеры $o'xyz$. По элементам внутреннего ориентирования определяется положение центра проекции S в системе координат снимка $o'xyz$. Через эту точку проходят все проектирующие лучи.

С помощью шести элементов внешнего ориентирования определяют положение снимка в пространстве (рис. 3).

Элементы внешнего ориентирования снимка: X_s, Y_s, Z_s – координаты центра проекции S в системе координат объекта $OXYZ$; ω, α, к – углы поворота системы координат снимка $oxyz$ относительно системы координат объекта $OXYZ$.

Координаты точек объекта и их изображений на снимке связаны векторным уравнением, которое называется уравнением коллинеарности:

$$\overline{R} = \overline{R}_S + \overline{R}\,, \tag{1}$$

или в координатной форме:

$$\left.\begin{aligned} X &= X_S + (Z - Z_S)\frac{X'}{Z'} \\ Y &= Y_S + (Z - Z_S)\frac{X'}{Z'} \end{aligned}\right\}, \tag{2}$$

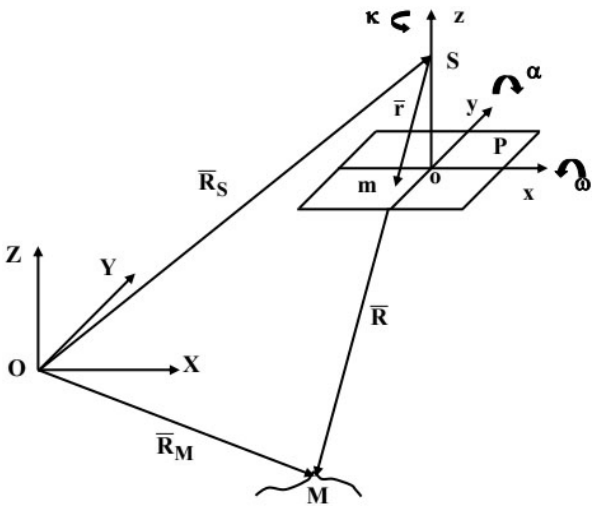


Рис. 3 – Элементы внешнего ориентирования снимков
Fig. 3 – Elements of exterior orientation of images

где X, Y, Z – координаты точки M в системе координат объекта; X_s, Y_s, Z_s – координаты центра проекции S в системе координат объекта; X', Y', Z' – координаты вектора r в системе координат объекта, которые определяются по формуле

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -f \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где A – матрица преобразования координат (матрица направляющих косинусов), элементы c_{ij} которой определяются по значениям угловых элементов внешнего ориентирования снимка ω, α, κ.

С учетом вышесказанного уравнение коллинеарности имеет вид

$$\left.\begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s)\frac{c_{11}(x - x_o) + c_{12}(y - y_o) - c_{13}f}{c_{31}(x - x_o) + c_{32}(y - y_o) - c_{33}f} \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s)\frac{c_{21}(x - x_o) + c_{22}(y - y_o) - c_{23}f}{c_{31}(x - x_o) + c_{32}(y - y_o) - c_{33}f} \end{aligned}\right\}. \tag{4}$$

Координаты точек объекта определяются на формуле (4), если известны элементы внешнего ориентирования и высоты точек [8–9].

В данной работе элементы внешнего ориентирования снимков были известны. Они были получены на этапе авиационных работ, так как на БПЛА установлены геодезический спутниковый приемник и инерциальная система. В результате оптимизации выравнивания аэрофотоснимков полученные данные используют при построении сети фототриангуляции методом независимых связок.

В результате операции уравнивания получается разряженное облако точек (рис. 4) и данные о положении и ориентации аэрофотоснимков. Эти данные используются на дальнейших стадиях построения ортофотоплана местности.

В результате выравнивания и оптимизации центров фотографирования были получены следующие значения СКО на контрольных точках (табл. 1).

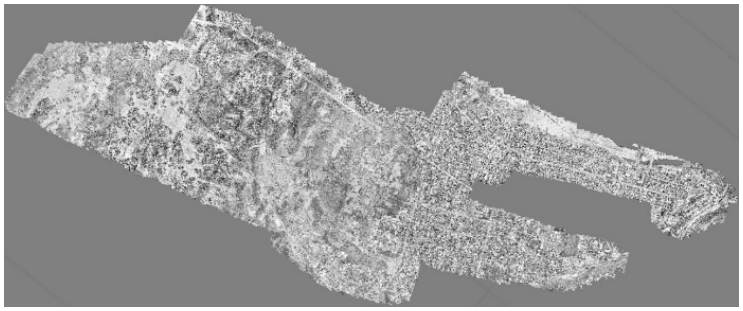


Рис. 4 – Разряженное облако общих точек
Fig. 4 – A sparse common point cloud

Table 1 / Таблица 1

СКО на контрольных точках
RMS errors at control points

Количество контрольных точек	Ошибка *X*, см	Ошибка *Y*, см	Ошибка *Z*, см	Общая, см
63	2,39	2,56	4,31	5,55

Смоделирована ситуация, когда авиационные работы проводились бы на БПЛА без геодезического приемника на борту. Соответственно обработка проводилась без точных значений элементов внутреннего и внешнего ориентирования аэрофотоснимков, а их вычисление происходило по контрольным точкам, которые были переведены в разряд опорных. В табл. 2 представлена оценка влияния количества пунктов планово-высотного обоснования (контрольных точек) на пространственную ошибку модели при обработке материала без точных значений внутренних и внешних элементов аэрофотоснимков.

Table 2 / Таблица 2

Зависимость СКО по контрольным точкам от количества пунктов ПВО
Dependence of RMS error of control points on the number of air defense points

Количество пунктов ПВО	СКО по контрольным точкам *X*, см	СКО по контрольным точкам *Y*, см	СКО по контрольным точкам *Z*, см
60	1,02	1,13	2,73
40	4,13	8,04	7,99
20	14,11	10,21	32,07
10	27,58	34,2	41,78
5	45,17	38,83	50,9
1	90,22	114,04	68,32
0	90,23	114,07	69,01

На рис. 5 приведен график зависимости СКО каждой оси координат от количества использованных в обработке пунктов ПВО.

Из графика (рис. 5) следует, что СКО по контрольным точкам в диапазоне использования пунктов ПВО в качестве опорных от 0 до 10 резко взрастает. И напротив, при большом количестве используемых опорных точек (от 50 до 60) СКО на контрольных точках остается минимальным и не превышает 10 см.

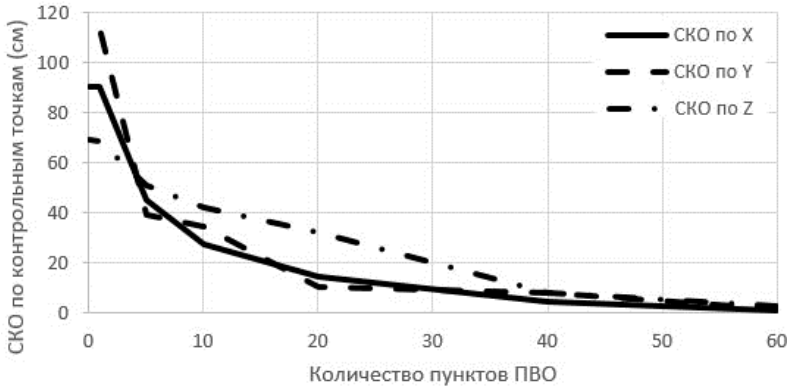


Рис. 5 – Зависимость значения СКО от количества пунктов ПВО

Fig. 5 – Dependence of the RMS error value on the number of air defense points

2. Построение плотного облака точек

Плотное облако точек представляет собой точки с известными координатами *X*, *Y*, *Z* в системе координат объекта и яркости их исходных изображений.

Классическим методом построения является метод полуглобального отождествления Semi-global matching (SGM). На рис. 6 иллюстрирована схема этого алгоритма.

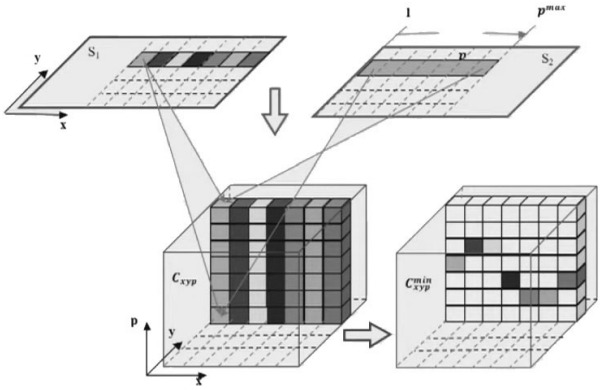


Рис. 6 – Схема построения плотного облака точек

Fig. 6 – A scheme for constructing a dense point cloud

Алгоритм основан на обработке отдельных стереопар, которые заранее трансформируются вдоль базисных линий. В результате каждый пиксель на левом снимке находится на соответствующей линии на правом снимке. Задача состоит в нахождении соответствующих друг другу пикселей на левом и правом снимках. Пиксели сравниваются, и записывается соответствующая разница, которая называется стоимостью отождествления [4]. Она выражена в разнице яркости соответствующих пикселей на левом и правом изображениях:

$$C_{xyp} = D^1_{xy} - D^2_{xy}. \quad (5)$$

Данные записываются в пространственно-воксельной структуре. Операция проводится над всеми пикселями и получается общая структура стоимостей

отождествления. Эти стоимости анализируются на предмет выявления минимальных значений. Таким образом, для каждого пикселя находится соответствующий продольный параллакс. Решая прямую фотограмметрическую засечку, находятся координаты *X, Y, Z* в системе координат объекта [8].

Фрагмент смоделированного плотного облака точек изображен на рис. 7.

Рис. 7 – Плотное облако точек

Fig. 7 – A dense point cloud

По данным плотного облака точек определяются пространственные координаты различных объектов *X*, *Y*, *Z* в системе координат объекта. Также плотное облако точек является подобием 3D-модели местности.

3. Построение карты высот

Карта высот строится на основании плотного облака точек и представляет собой регулярную сетку значений высот (рис. 8).

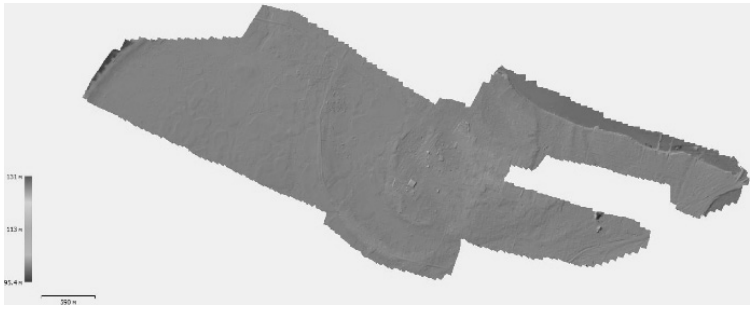


Рис. 8 – Карта высот

Fig. 8 – An elevation map

В данном эксперименте по карте высот можно определить высотную отметку *Z* любого объекта исследуемой местности со средней точностью 4,3 см.

4. Построение ортофотоплана

Ортофотоплан местности получается путем ортотрансформирования аэрофотоснимков из центральной проекции в ортогональную (картографическую).

Исходными материалами при цифровом ортотрансформировании снимков служат исходные цифровые аэрофотоснимки, цифровая модель местности (карта высот), элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимков [10, 11]. Основные процессы ортотрансформирования представлены на рис. 9.

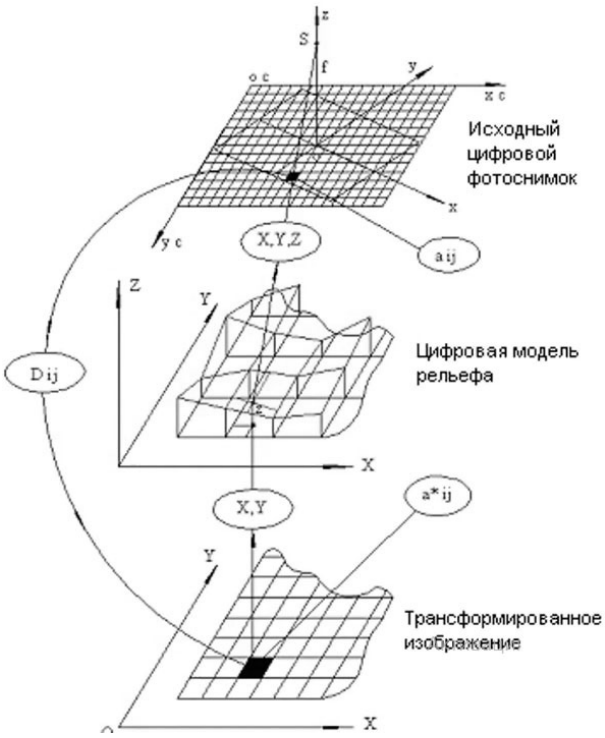


Рис. 9 – Основные процессы ортотрансформирования изображения

Fig. 9 – Basic processes of image orthortransformation

Изначально задается первоначальная матрица трансформированного изображения. Зная координаты пикселей на исходных изображениях, параметры их внешнего ориентирования и высотную отметку из карты высот этих пикселей [12–14], согласно (4) попиксельно заполняется матрица трансформированного изображения. В результате формируется ортофотоплан местности (рис. 10).

Рис. 10 – Итоговый ортофотоплан местности

Fig. 10 – Final orthomosaic of the area

5. Апробация метода обработки видеоматериалов

Работы проводились на территории кадастровых кварталов общей площадью 880 га.

В результате выполнения работ получен итоговый ортофотоплан местности с пространственным разрешением 2,85 см/пиксель.

Фотограмметрическая обработка производилась без использования опорных точек. Пункты ПВО координировались спутниковым геодезическим ГНСС оборудованием, координаты которых использовались в качестве проверки пространственной точности построенной модели местности.

Итоговая точность определения координат и высотной отметки на модели составила 5,5 см.

Заключение

Разработанный метод обработки аэрофотоснимков с беспилотного летательного аппарата с геодезическим спутниковым приемником на борту позволяет построить итоговый геопривязанный ортофотоплан местности, соответствующий масштабу 1 : 500 [15] без использования пунктов планово-высотного обоснования в качестве опорных.

Метод будет использоваться при создании цифровой модели полигона для испытания активно-импульсных телевизионных систем, разрабатываемых на кафедре телевидения и управления ТУСУР [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Захлебин А.С.** Подсчет объема насыпи полезных ископаемых с использованием БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 PRO // Электронные средства и системы управления: XV Международная научно-практическая конференция: материалы докладов. – Томск, 2019. – Ч. 2. – С. 195–196.
2. **Тарарин А.М.** Актуальные вопросы определения координат характерных точек границ земельных участков фотограмметрическим методом // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 217–225.
3. **Мельничук Ю.Ю.** Аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов // Землеустройство и кадастры: актуальные проблемы и пути их решения: сборник научных трудов молодых исследователей. – Волгоград: Волгогр. гос. аграр. ун-т, 2019. – Вып. 1. – С. 62–65.
4. Руководство пользователя Agisoft Metashape: Professional edition, версия 1.7. – Agisoft LLCб 2021. – URL: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_ru.pdf (дата обращения: 26.11.2021).
5. **Краснопевцев Б.В.** Фотограмметрия. – М.: МИИГАиК, 2008. – 160 с.
6. **Краснопевцев Б.В., Курков В.М.** Методическое пособие, программы и контрольная работа по курсу «Фотограмметрия». – М.: МИИГАиК, 2012. –74 с.
7. **Коршунов Р.А., Носков В.В., Погорелов В.В.** Нецентральная обратная фотограмметрическая засечка // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – С. 67–71.
8. **Михайлов А.П., Чибуничев А.Г.** Конспект лекций по курсу фотограмметрия. – М.: МИИГАиК, 2005.
9. **Мещанинова Е.Г., Ткачева О.А.** Фотограмметрия и дистанционное зондирование территории: для студентов специальностей 120301 «Землеустройство», 120302 «Земельный кадастр». – Новочеркасск: Новочеркас. гос. мелиоратив. акад., 2013. – 109 с.
10. **Михайлов А.П., Чибуничев А.Г.** Фотограмметрия: учеб. для вузов. – М.: МИИГАиК, 2016. – 294 с.
11. **Маклакова Т.В.** Использование беспилотных летательных аппаратов в кадастре, землеустройстве и градостроительстве // Лучшая научно-исследовательская работа 2018:

сборник статей XVII Международного научно-исследовательского конкурса / под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. – Пенза: Наука и просвещение, 2018. – С. 95–97.
12. **Журкин И.Г., Тимофеев Ю.С., Дао К.Х.** Метод свертки при трансформировании изображений // Исследования Земли из космоса. – 2003. – № 4. – С. 49–54.
13. **Scharstein D., Szeliski R.** A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms // International Journal of Computer Vision. – 2002. – Vol. 47. – P. 7–42.
14. Development of a digital surface model and a digital terrain model based on ERS data / I.G. Gairabekov, A.I. Hamzatov, A.T. Mishieva, E.I. Ibragimova, M.-B.I. Gairabekov, A.I. Gayrabekova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 905: 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2020). – P. 012025. – DOI: 10.1088/1757-899x/905/1/012025.
15. ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. – Дата введения: 2021–06–01. – М.: Стандартинформ, 2021. – 31 с.
16. Multi-Area Range Measurement Method Using Active-Pulse Television Measuring Systems / E.S. Chaldina, A.K. Movchan, V.V. Kapustin, M.I. Kuryachiy // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2020. – P. 293–297.

A METHOD OF PROCESSING AERIAL PHOTOGRAPHY MATERIALS FOR BUILDING A GEOREFERENCED ORTHOMOSAIC OF THE TERRAIN FROM A TELEVISION CAMERA OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE DJI PHANTOM 4 PRO

Zakhlebin A.S.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

The article presents a method for photogrammetric processing of aerial photographs from a DJI Phantom 4 Pro UAV with a geodetic receiver on board. The processing method allows building digital terrain models with an accuracy of 0.1 m.

Keywords: aerial photograph, terrain orthomosaic, dense point cloud, accuracy, elevation map, alignment, projection.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-26-35

REFERENCES

1. Zakhlebin A.S. [Calculation of the volume of the mound of minerals using a helicopter-type UAV DJI Phan-tom 4 PRO]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Electronic Devices and Control Systems. XV International Scientific-practical Conference], Tomsk, 2019, pt. 2, pp. 195–196. (In Russian).
2. Tararin A.M. Aktual'nye voprosy opredeleniya koordinat kharakternykh tochek granits zemel'nykh uchastkov fotogrammetricheskim metodom [Key issues of determining the settings of coordinates for characteristic points of land boundaries using the photogrammetric method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka = Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 217–225.
3. Mel'nichuk Yu.Yu. Aerofotos"emka s bespilotnykh letatel'nykh apparatov |[Aerial photography from unmanned aerial vehicles]. *Zemleustroistvo i kadastry: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya* [Land management and cadastres: current problems and solutions]. Volgograd, Volgograd State Agrarian University Publ., 2019, iss. 1, pp. 62–65.
4. *Agisoft Metashape User Guide*. (In Russian). Available at: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_ru.pdf, free (accessed 26.11.2021).
5. Krasnopevtsev B.V. *Fotogrammetriya* [Photogrammetry]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2008. 160 p.
6. Krasnopevtsev B.V., Kurkov V.M. *Metodicheskoe posobie, programmy i kontrol'naya rabota po kursu "Fotogrammetriya"* [Methodological manual, programs and test work for the course "Photogrammetry"]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2012. 74 p.

7. Korshunov R.A., Noskov V.V., Pogorelov V.V. Netsentral'naya obratnaya fotogram-metricheskaya zasechka [Noncentral reverse photogrammetric notch]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka = Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*, 2013, vol. 5, pp. 67–71.
8. Mikhailov A.P., Chibunichev A.G. *Konspekt lektsii po kursu fotogrammetriya* [Lecture notes for the course photogrammetry]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2005.
9. Meshchaninova E.G., Tkacheva O.A. *Fotogrammetriya i distantsionnoe zondirovanie territorii* [Photogrammetry and remote sensing of the territory]. Novocherkassk, Novocherkassk State Melioration Academy Publ., 2013. 109 p.
10. Mikhailov A.P., Chibunichev A.G. *Fotogrammetriya* [Photogrammetry]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2016. 294 p.
11. Maklakova T.V. [The use of unmanned aerial vehicles in the cadastre, land management and urban planning]. *Luchshaya nauchno-issledovatel'skaya rabota 2018*: sbornik statei XVII Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa [Best research paper 2018: collection of articles of the XVII International research competition]. Penza, Nauka i prosveshchenie Publ., 2018, pp. 95–97. (In Russian).
12. Zhurkin I.G., Timofeev Yu.S., Dao K.H. Metod svertki pri transformirovanii izobrazhenii [Convolution method when transforming images]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa = Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2003, no. 4, pp. 49–54. (In Russian).
13. Scharstein D., Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 2002, vol. 47, pp. 7–42.
14. Gairabekov I.G., Hamzatov A.I., Mishieva A.T., Ibragimova E.I., Gairabekov M-B.I., Gayrabekova A.I. Development of a digital surface model and a digital terrain model based on ERS data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 905, p. 012025. DOI: 10.1088/1757-899x/905/1/012025.
15. GOST R 59328–2021. *Aerofotos"emka topograficheskaya. Tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard R 59328–2021. Aerial photography for mapping. Technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 31 p.
16. Chaldina E.S., Movchan A.K., Kapustin V.V., Kuryachiy M.I. Multi-area range measurement method using active-pulse television measuring systems. *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. IEEE, 2020, pp. 293–297.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Захлебин Александр Сергеевич – аспирант, ассистент кафедры телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). (Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: aerosnimok@gmail.com).

Alexander Sergeevich Zakhlebin – Postgraduate student, teaching assistant at the Department of Television and Control (TU), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR). (Address: 40, Prospect Lenina, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: aerosnimok@gmail.com).

Статья поступила 28 сентября 2021 г.
Received September 29, 2021[†]

To Reference:

Metod obrabotki materialov aerofotos"emki dlya postroeniya geoprivyazannogo ortofotoplana mestnosti s televizionnoi kamery bespilotnogo letatel'nogo apparata DJI Phantom 4 Pro [A method of processing aerial photography materials for building a georeferenced orthomosaic of the terrain from a television camera of the unmanned aerial vehicle DJI Phantom 4 PRO]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 4 (53), pp. 26–35. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-26-35.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 октябрь–декабрь № 4 (53)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 347.771

НЕОБХОДИМОСТЬ ВЫЯВЛЕНИЯ И ПАТЕНТОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Н.В. Проценко[1], Б.В. Малозёмов[2], Ю.В. Дмитриева[3], С.А. Кузнецов[3]
[1] *Сибирский центр Федерального института промышленной собственности*
[2] *Новосибирский государственный технический университет*
[3] *Федеральный институт промышленной собственности*

Развитию экологически чистого транспорта придают первостепенное значение все ведущие города планеты. Электрический транспорт является важнейшим аспектом транспортной системы современного мегаполиса, одним из основных инструментов поддержания устойчивой мобильности населения и высоких стандартов жизни. Одним из важнейших факторов коммерческого успеха электромобилей являются высокоэффективные зарядные станции. Разработка и установка станций быстрой зарядки станет важным шагом на пути развития использования электромобилей. Развитие технологий, направленных на альтернативные источники энергии, в том числе для использования в транспорте, набирает популярность как для исследования данной области, так и для патентования на территории РФ. Проведен обзор патентных документов, поданных в патентное ведомство РФ и связанных с изобретениями в области электрического транспорта. Осуществлен анализ технических решений изобретений и полезных моделей, направленных на развитие зарядной инфраструктуры, создание интеллектуальной системы энергоснабжения для экспресс-зарядки электромобилей на основе литий-ионных накопителей энергии, а также на сопутствующие перспективные направления для развития отрасли. Показан привлекательный инвестиционный климат РФ и стимулирование развития зарядной инфраструктуры со стороны государства, способные дать всплеск изобретательской активности в сегменте зарядных станций и электротранспортных средств.

Ключевые слова: электростанция, автомобиль, электрокар, экология, возобновляемый источник.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-36-48

Введение

На сегодняшний день транспортный сектор является сектором с самым высоким потреблением ископаемого топлива и оказывает вредное воздействие на окружающую среду. Наглядное соотношение по количеству основных загрязнителей атмосферы представлено на рис. 1.

В этом направлении электромобили рассматриваются как главный фактор в сокращении потребления ископаемого топлива [1], уменьшении зависимости стран от иностранных источников энергии и преодолении изменения климата из-за вредных газов, выбрасываемых в окружающую среду [2].

Рост населения мира и развитие повседневных технологий вызывают кризис энергоснабжения во всем мире. Из-за ограниченных природных ресурсов, высокой стоимости и уничтожения ископаемого топлива для экосистемы ускоряется переход к возобновляемым источникам энергии. Одно из основных применений ископаемого топлива – автомобили с двигателями внутреннего сгорания.

© 2021 Н.В. Проценко, Б.В. Малозёмов, Ю.В. Дмитриева, С.А. Кузнецов

1. Разновидности зарядных станций для электромобилей

Вместо транспортных средств, использующих двигатель внутреннего сгорания, электромобили (EV), в которых используются только электродвигатели, представляют собой новую технологию для сокращения потребления ископаемого топлива.

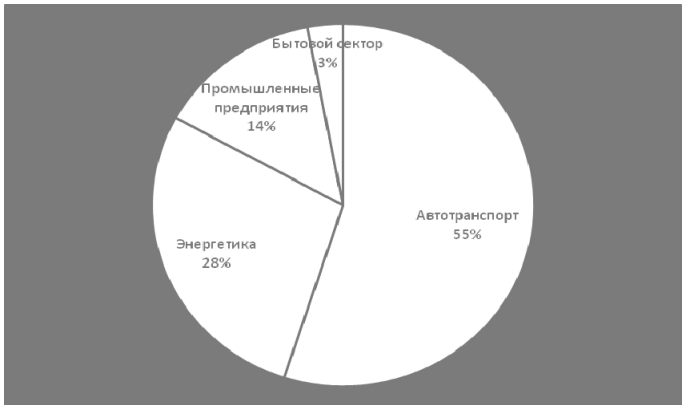


Рис. 1 – Основные виды загрязнителей атмосферы

Fig. 1 – The main types of air pollutants

У этой новой технологии есть некоторые трудности, такие как дальность действия и время зарядки аккумулятора. Технология электромобилей (EV) – это новая технология, направленная на сокращение использования углеводородного топлива. У этой новой технологии есть некоторые проблемы, в том числе время зарядки аккумулятора и дальность пробега электромобиля. Одна из проблем, время зарядки аккумулятора (уровень 1, уровень 2, уровень 3 и уровень 4) была рассмотрена в этом исследовании. В то время как уровень 1 и уровень 2 относятся к методам медленной зарядки, уровень 3 и уровень 4 относятся к быстрой зарядке. Методы быстрой зарядки состоят из трех различных топологий: топология с преобразователями переменного в постоянный и постоянного в постоянный токи (зарядные станции от транспортного средства к сети (V2G) и односторонние зарядные станции в качестве их ответвлений). Общая многоточечная топология с подключением переменного тока и бестрансформаторная топология представлены на рис. 2.

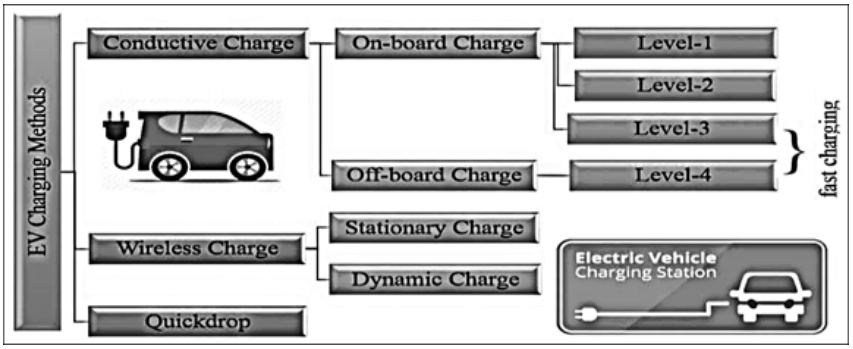


Рис. 2 – Методы зарядки электромобилей

Fig. 2 – Charging methods for electric vehicles

Был сделан вывод, что метод V2G, который является подветвью топологии станции быстрой зарядки преобразователя AC / DC / DC, является эффективным и надежным процессом для адаптации к возобновляемым источникам энергии, с эффективным использованием энергии, легко интегрируемым и адаптирующимся как к переменному току, так и к системе постоянного тока.

2. Согласование стандартов энергетических компаний с производителями электромобилей

Развитию экологически чистого транспорта придают первостепенное значение все ведущие города планеты. Электрический транспорт является важнейшим аспектом транспортной системы современного мегаполиса, одним из основных инструментов поддержания устойчивой мобильности населения и высоких стандартов жизни.

Однако спрос по всему миру неравномерный. Наибольшее количество электрокаров и гибридных авто приходится на рынок Китая (рис. 3). Также электротранспорт востребован в США, Великобритании [3].

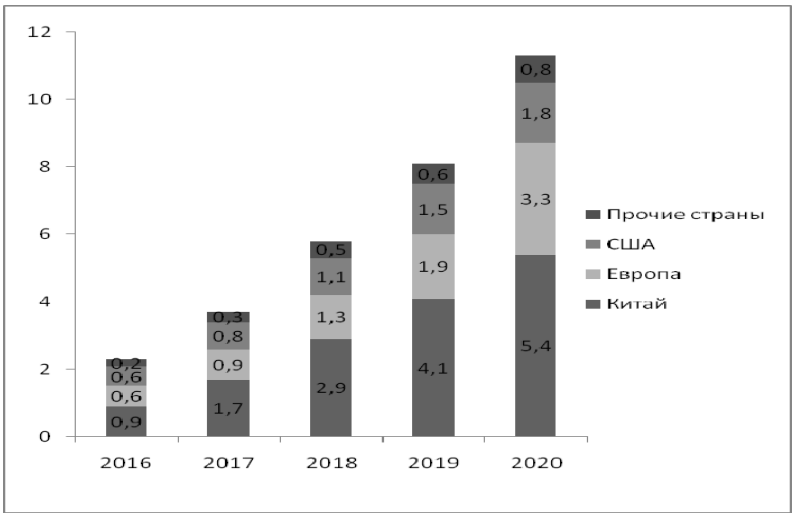


Рис. 3 – Общее количество электромобилей (млн)

Fig. 3 – Total number of electric vehicles (million)

При этом количество электрокаров в России в 2020 году составило всего 11 тысяч [4].

Одной из ключевых проблем популярности электротранспорта России является суровый климат и расстояния между населенными пунктами. Технологическим решение данной проблемы является развитие зарядной инфраструктуры, создание интеллектуальной системы энергоснабжения для экспресс-зарядки электромобилей на основе литий-ионных накопителей энергии.

Одним из важнейших факторов коммерческого успеха электромобилей являются высокоэффективные зарядные станции [5]. Однако, несмотря на увеличение количества электромобилей, отсутствие инфраструктуры зарядных станций и длительное время зарядки ограничивают использование этих транспортных средств: лишь для ежедневных поездок на работу и поездок

на короткие расстояния [6]. Разработка и установка станций быстрой зарядки станет важным шагом на пути популяризации использования электромобилей.

На сегодняшний день разработаны быстрые зарядные устройства мощностью 50 кВт, которые могут заряжать электромобиль примерно за 50 минут, и очень быстрые зарядные устройства мощностью 240 кВт, которые могут заряжать за 10 минут. Ожидается, что в ближайшем будущем данные станции будут иметь широкое пользование [7]. Кроме того, за счет стандартизации инфраструктурных подключений (см. таблицу) и протоколов связи пользователям будет предоставлено высокое качество и быстрое время зарядки. Это сделает существующую систему электромобилей более эффективной и поможет ее широко использовать во всем мире.

Стандарты энергетических компаний по странам

Standards of energy companies by countries

Сообщество	Страна
Общество автомобильных инженеров (SAE)	Соединенные Штаты Америки
Международная электротехническая комиссия (МЭК)	Европа
Электротехнический комитет Японии (JEC)	Япония
Совет по электричеству Китая (CEC)	Китай

Из источников информации о станциях быстрой зарядки следует известность новой гибридной модели зарядки для электромобилей, состоящая из накопителя-аккумулятора, преобразователя мощности и блока управления. Важным аспектом является то, что станция содержит блок управления (регулятор) с коэффициентом ограничения 400 В для предотвращения перезарядки батареи электромобиля, для продления срока службы батареи с помощью контроля состояния перезаряда. Система была протестирована как при ускоренной, так и при нормальной зарядке.

Чтобы контролировать скорость зарядки электромобилей, важно разработать алгоритм распределения мощности зарядки для каждой розетки на станции быстрой зарядки. Для этого необходимо проанализировать взаимосвязь между полезной емкостью сети, количеством зарядных розеток на зарядной станции и временем ожидания электромобилей. Также необходимо принять во внимание наличие станций быстрой зарядки в городах и их расположение на маршрутах, соединяющих удаленные места, при изучении возможности их размещения.

В настоящее время среди российских производителей зарядных станций (ЗС) следует выделить следующие.

1. Корпорация «ПСС» (https://pss.ru/), г. Пермь.
2. АО «Государственный Рязанский приборный завод» (https://grpz.kret.com/), г. Рязань (РОСТЕХ).
3. ООО «Парус Электро» (https://parus-electro.ru/), г. Москва.
4. ООО «Современные конверсионные технологии» (https://skt-charge.ru), г. Москва.
5. ООО «Яблочков зарядные станции» (https://yablochkovtech.com/), г. Санкт-Петербург.

6. Rewatt (https://rewatt.tech/), г. Москва.
7. Touch (https://touch-station.com/), г. Санкт-Петербург.

Для того чтобы понять перспективы развития, а также оценить уровень конкуренции, был произведен анализ патентной активности в области электротранспорта.

3. Анализ технических решений исполнения зарядных станций в России и за рубежом

В результате анализа с января 2011 по август 2021 г. включительно было выявлено 50 решений, которые были запатентованы на территории Российской Федерации, данные решения включают в себя варианты исполнения зарядных станций, а также систем и способов управления зарядными станциями и зарядом аккумулятора, а также дистанционного управления и идентификации пользователей (рис. 4).

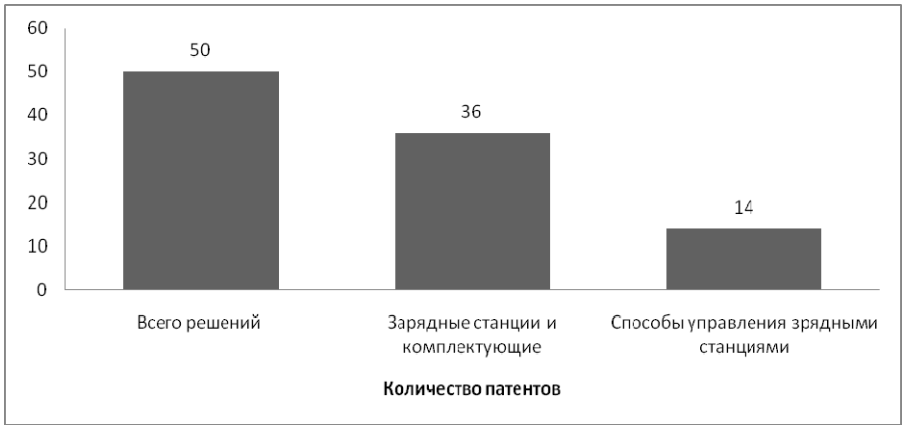


Рис. 4 – Количество запатентованных решений, относящихся к зарядным станциям, на территории РФ

Fig. 4 – The number of patented solutions related to charging stations in the territory of the Russian Federation

В качестве вариантов зарядных станций можно выделить станции медленной и быстрой зарядки, комбинированных станций зарядки как переменным, так и постоянным током, также патентуются разработки в области бесконтактной передачи электроэнергии транспорту. При этом основная тенденция увеличения количества поданных заявок приходится на последние 5 лет (с 2016 по первое полугодие 2021 г. включительно). Следовательно, можно сделать вывод о том, что развитие технологий, направленных на альтернативные источники энергии, в том числе для использования в транспорте, набирает популярность как для исследования данной области, так и для патентования на территории РФ.

Анализ патентной активности российских разработчиков показал, что по количеству опубликованных охранных документов за период с 2016 по первое полугодие 2021 г. включительно лидирует ОАО «Московская объединенная электросетевая компания». Среди зарубежных организаций-патентовладельцев, запатентованных на территории РФ, можно выделить АББ Б.В.

(Нидерланды), НИССАН МОТОР КО., ЛТД. (Япония), Др. Инж. х.к. Ф. Порше Акциенгезелльшафт (Германия), ФОРД ГЛОУБАЛ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ЭлЭлСи (США). Наглядное процентное соотношение основных обладателей охранных документов, полученных на территории РФ, представлено на рис. 5.

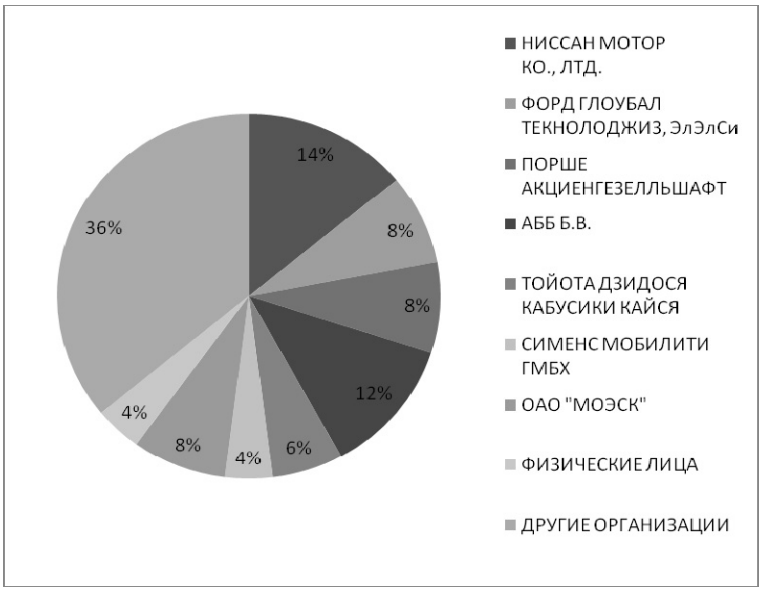


Рис. 5 – Анализ патентной активности организаций-патентовладельцев

Fig. 5 – Analysis of patent activity of organizations-patent owners

Анализ патентной активности показывает, что для Российской Федерации данные технологии еще только находятся в начале своего пути развития. При этом западные компании активно развивают указанную область техники и превосходят в количестве запатентованных технологий.

В настоящее время по распоряжению правительства Российской Федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р разработана концепция развития электротранспорта [8] и уже в 2022 году предполагается создать в РФ 1,2 тыс. обычных зарядных станций и еще 528 – быстрых станций. Исходя из прогнозных оценок роста парка электромобилей до 1,4 млн штук к 2030 году, потребуется в целом 144 тыс. станций. Правительство РФ планирует выделить на их строительство субсидии. Таким образом, развитие зарядной инфраструктуры электрического автомобильного транспорта – это привлекательный и быстрорастущий сегмент. Поэтому необходимо постоянно отслеживать технические решения в данной отрасли, например, применение новых накопителей электрической энергии и способов их зарядки, интеллектуальной навигации с использованием составления маршрута с учетом текущей зарядки и возможностей сети зарядных станций, удаленное управление зарядными станциями, а также мобильные приложения для их использования.

Дальнейший анализ технологий для зарядных станций был проведен с учетом предложений, которые на сегодняшний день охраняются на территории РФ. Были выявлены разработки зарядных станций, на которых предусмотрена возможность выбора скорости зарядки. Одна из таких технологий представлена

в патенте EA 32517 B1, опубликованном 28.06.2019. В данном изобретении раскрыта зарядная станция, на которой пользователи могут выбирать время зарядки (чем короче время, тем выше цена). Клиент вводит время зарядки и величину зарядки. Например, пользователь может выбрать время зарядки 15 мин и общую зарядку 80 % от полной емкости аккумуляторной системы транспортного средства. Как вариант, пользователю могут быть предоставлены многочисленные варианты зарядки, представляющие различные продолжительности зарядки, различные скорости зарядки и различные цены, из которых пользователь может выбирать. Соединительный штепсель от транспортного средства к зарядной станции сообщит уровень заряда в системе транспортного средства прежде чем начнется зарядка, а также характеристики и возможности аккумуляторной системы транспортного средства. При этом узел генерирования мощности для генерирования электрической мощности постоянного тока выполнен с возможностью использования в качестве топлива природного газа в узле генерирования мощности. За счет возможности работы станции зарядки на топливных элементах обеспечивается зарядка значительного числа электротранспортных средств, в том числе в период пиковой нагрузки на электросеть [9].

Одним из векторов развития отрасли зарядных станций являются быстрые зарядные устройства, которые базируются на действующем оборудовании тяговых подстанций. Так, в патенте на полезную модель RU 203237 U1 раскрыто устройство зарядной станции постоянным током на базе тяговой подстанции электрического транспорта, которое включает высоковольтный тяговый трансформатор, выпрямитель, оборудование распределительного устройства тяговой сети, а также управляемый источник постоянного тока и датчик тока в составе зарядного терминала. Для реализации программной части защитных функций и функций управления устройством зарядной станции установлен промышленный контроллер. При этом один входной канал контроллера представляет проводной интерфейс для связи с автономным транспортным средством, а другой входной канал соединен с датчиком тока заряда. При использовании данной станции обеспечивается предварительное согласование уровней напряжений на выходе конкретного зарядного терминала и подключаемой аккумуляторной батареи [10].

В другом патенте на полезную модель RU 130459 U1 раскрыта зарядная станция, которая выполнена с возможностью зарядки электротранспорта при условии подключения зарядного кабеля к розетке зарядной станции и последующей идентификации пользователя через удаленный сервер программного комплекса по управлению сетью зарядных станций. В процессе зарядки зарядная станция с помощью встроенного счетчика электроэнергии измеряет до 15 электрических параметров (в том числе потребляемую электроэнергию, активную и реактивную мощности и т. д.) и передает их на удаленный сервер для дальнейшей обработки, учета и принятия диспетчерских управляющих решений. Данным решением обеспечивается возможность автоматического технологического управления зарядной станции, доступ к зарядке конечного потребителя посредством индивидуальной карты пользователя, а также программируемое время работы с учетом анализа пиковых нагрузок городской электросети [11].

Исходя из вышеуказанного можно сделать вывод, что в настоящее время разрабатываются технологии, позволяющие модернизировать тяговые подстанции на основе текущей базы. Помимо этого, происходит активный рост автономных возможностей зарядных станций с внедрением рационального использования времени заряда, что позволит перераспределить электрическую энергию в зависимости от пиковых нагрузок на электросеть.

Далее одной из рассматриваемых проблем была выявлена географическая малодоступность зарядных станций в Российской Федерации. При этом в соответствии с концепцией развития электротранспорта [8] для формирования бесперебойного движения по территории Российской Федерации максимальное расстояние между двумя ближайшими станциями зарядки на дорогах общего назначения не должно превышать 100 километров. При расчете такого показателя учитывались обширная территория Российской Федерации, средний запас хода электромобилей и износ батарей, увеличение расхода электроэнергии в холодные периоды года и поведенческие аспекты водителей. В условиях крупных мегаполисов целесообразно размещение зарядных станций на расстоянии не более 4 кв. километров.

При этом к началу октября 2021 года на территории РФ у «Россетей» насчитывается 263 станции зарядки электромобилей, но в ближайшие четыре года их количество планируется увеличить до 1,34 тыс. У концерна КРЭТ (входит в «Ростех») – 130 зарядок, у «РусГидро» (владеет генерацией и сетями на Дальнем Востоке) – 55 быстрых зарядок на Дальнем Востоке, у «Мосэнерго» (входит в «Газпром энергохолдинг») – более 70 станций в Москве [4]. Абсолютное лидерство по зарядным станциям удерживает Москва, в то время как в других мегаполисах страны, чтобы найти питание для «зеленого» авто, придется проехать полгорода. В итоге сложности с заправкой вынуждают немногочисленных владельцев электрокаров обратно пересаживаться на машины с двигателями внутреннего сгорания.

Анализ патентов в этом направлении позволил выявить несколько решений, позволяющих решить указанную проблему, а также проведенное исследование позволило выявить сопутствующие перспективные направления для развития отрасли.

Например, в патенте RU 2720394 C2, опубликованном 29.04.2020, раскрыта возможность использования нескольких транспортных средств. В данном решении раскрыта система для электрических транспортных средств, позволяющая припарковать электрическое транспортное средство для зарядки и использовать велосипед или другое вторичное транспортное средство для перемещения по густонаселенным районам, в то время как электрическое транспортное средство заряжается. Однако использование вторичного транспортного средства возможно только после блокирования основного транспортного средства на зарядной станции. Достигается расширение доступных территорий для водителей электрических транспортных средств [12].

Анализ указанного патента показывает, что указанная разработка в России может быть осуществима и в перспективе может использоваться компаниями по предоставлению услуг каршеринга (вида краткосрочной аренды автомобиля с поминутной тарификацией), так как данное изобретение может определить круг мест, где электромобили могут быть припаркованы при одновременной возможности зарядки. При этом пользователь сервиса карше-

ринга сможет продолжить свой маршрут при отсутствии необходимости искать новое транспортное средство на возможных местах стоянки. Также на ускорение времени влияет возможность поиска зарядных станций, которые могли бы находиться рядом или присутствовали на пути прогнозируемого маршрута следования электротранспорта. Поэтому актуальным является создание соответствующих программно-навигационных возможностей, учитывающих такие факторы, как время ожидания в очереди, удаленность с учетом остатка заряда тяговой батареи, а также наличие подходящих по типу разъемов на зарядных станциях.

Так, например, вариант быстрого поиска зарядной станции отражен в патенте RU 2714660 C1, опубликованном в 18.02.2020. В указанном решении раскрыто устройство управления зарядом устройства аккумулирования мощности для транспортного средства и автомобиля, содержащего данное устройство управления, а также мотор для движения и устройство аккумулирования мощности для обмена электрической мощностью с мотором. Устройство управления содержит электронный блок управления и навигационное устройство. Навигационное устройство выполнено с возможностью выполнения навигации по маршруту для запланированного маршрута движения к пункту назначения. При этом, когда не может быть получена оперативная информация о месте зарядки пункта назначения и прогнозируется, что место зарядки пункта назначения является непригодным для использования, навигационное устройство рекомендует выполнять внешнюю зарядку в месте зарядки около запланированного маршрута движения. В данном решении достигается прогнозирование и предотвращение нехватки заряда батареи для достижения зарядной станции в следующей поездке [13].

После проведенного анализа навигационных устройств и информационных технологий, связанных с ними, авторами сделаны выводы, что данная область возможного развития как для исследования, так и для патентования может быть активно использована в век цифровизации технологий, а также активного пользования информационными приложениями. При этом данные технологии позволяют сократить время поиска зарядных станций для электромобилей, определить наиболее комфортные условия для зарядки электромобилей (управление процессом заряда с мобильных устройств, прокладывание оптимального маршрута, бронирование места и выбор времени для подзарядки транспортных средств и др.), что немаловажно для пользователей.

Заключение

Подводя итог проведенного патентного анализа, можно сделать вывод о том, что указанная область на территории Российской Федерации еще очень «молода» и будет активно развиваться в ближайшее время. Изменение климата, а также переход на возобновляемые источники энергии будут активно подталкивать изобретателей на создание вариантов технических решений именно в данной области. Также в указанном направлении буде развиваться программное обеспечение как в управлении зарядными станциями, так и для управления с мобильных устройств пользователей для прокладывания оптимального маршрута, бронирования места и выбора времени для подзарядки транспортных средств. Привлекательный инвестиционный климат РФ и стимулирование развития зарядной инфраструктуры со стороны государства

могут дать всплеск изобретательской активности в сегменте зарядных станций и электротранспортных средств. Таким образом, своевременное выявление перспективных решений в области электрического транспорта позволит Российской Федерации получить возможность встроиться в мировое производство зарядных станций на новом технологическом уровне, став активным участником глобального рынка. При этом следует отметить особую важность патентных баз данных, которые включают уникальные источники технической информации. Благодаря изучению патентной информации в современных рыночных условиях можно установить наиболее перспективные направления научно-технических разработок, своевременно выявить, не будет ли разработанное решение нарушать чужие патенты в случае его вывода на отечественный и зарубежный рынки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Thomann M., Popescu F.** Estimating the effect of domestic load and renewable supply variability on battery capacity requirements for decentralized microgrids // Procedia Computer Science. – 2014. – Vol. 32. – P. 715–722.
2. Temperature-dependence in battery management systems for electric vehicles: Challenges, criteria, and solutions / H. Karlsen, T. Dong, Z. Yang, R. Carvalho // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 142203–142213.
3. Global EV Outlook 2021. – International Energy Agency, 2021. – URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484-f556-4110-8c5c-4ede8bcba637/GlobalEVOutlook2021.pdf (accessed: 26.11.2021).
4. Электрозаправки: электрозарядные станции, ЭЗС. – URL: https://www.tadviser.ru/a/399080 (accessed: 26.11.2021).
5. Determination of inactive powers in a single-phase AC network / N.I. Shchurov, S.V. Myatezh, B.V. Malozyomov, A.A. Shtang, N.V. Martyushev, R.V. Klyuev, S.I. Dedov // Energies. – 2021. – Vol. 14 (16). – P. 4814. – DOI: 10.3390/en14164814.
6. Research on multiple states joint estimation algorithm for electric vehicles under charge mode / L. Wang, L. Wang, C. Liao, W. Zhang // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 40143–40153.
7. Lithium-ion battery cost analysis in PV-household application / M. Naumann, R.C. Karl, C.N. Truong, A. Jossen, H.C. Hesse // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 73. – P. 37–47.
8. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 23.08.2021 № 2290-р. – URL: http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf (дата обращения: 26.11.2021).
9. Патент EA 32517 Евразийская патентная организация. Система быстрой зарядки электротранспортных средств / А. Гьинали; патентообладатель. – Опубл. 28.06.2019.
10. Патент 203237 Российская Федерация. Устройство зарядной станции постоянным током на базе тяговой подстанции электрического транспорта / Н.И. Щуров; Патентообладатель: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». – № 2020133705; заявл. 14.10.2020; опубл. 29.03.2021, Бюл. № 10.
11. Патент 130459 Российская Федерация. Зарядная станция для электротранспорта / А.В. Сницкий; Патентообладатель: ОАО «Московская объединенная электросетевая компания». – № 2020133705; заявл. 13.12.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.
12. Патент 2720394 Российская Федерация. Зарядная станция для электромобилей / Бэджер Чарлз Эверетт II; Патентообладатель: Форд Глоубал Технолоджиз, ЭлЭлСи. – № 2016126800; заявл. 05.07.2016; опубл. 29.04.2020, Бюл. № 13.

13. Патент 2714660 Российская Федерация. Устройство контроля заряда устройства накопления мощности транспортных средств и транспортных средств, содержащих такое устройство управления / Т. Катанодаб Х. Омиса; Патентообладатель: Тойота Дзидося Кабусики Кайся. – № 2019105727; заявл. 28.02.2019; опубл. 18.02.2020, Бюл. № 5.

THE NEED TO IDENTIFY AND PATENT PROMISING SOLUTIONS IN THE FIELD OF ELECTRIC TRANSPORT

Protsenko N.V.[1], Malozyomov B.V.[2], Dmitrieva Yu.V.[3], Kuznetsov S.A.[3]
[1] *Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property*
[2] *Novosibirsk State Technical University (NSTU)*
[3] *Federal Institute of Industrial Property (FIPS)*

The development of environmentally friendly transport is given priority by all the leading cities in the world. Electric transport is the most important aspect of the transport system of a modern metropolis, one of the main tools for maintaining sustainable population mobility and high living standards. Highly efficient charging stations are one of the most important factors in the commercial success of electric vehicles. The development and installation of fast charging stations will be an important step towards the development of the electric vehicles use. The development of technologies aimed at alternative energy sources, including for use in transport, is gaining popularity both for research in this area and for patenting on the territory of the Russian Federation. A review of patent documents filed with the Patent Office of the Russian Federation and related to inventions in the field of electric transport is carried out. The analysis of technical solutions of inventions and utility models aimed at the development of a charging infrastructure, the creation of an intelligent power supply system for express charging of electric vehicles based on lithium-ion energy storage devices, as well as related promising areas for the development of the industry. An attractive investment climate in the Russian Federation and the stimulation of the development of the charging infrastructure by the state is shown, which can give an impetus to inventive activity in the segment of charging stations and electric vehicles.

Keywords: power plant, car, electric car, ecology, renewable source

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-36-48

REFERENCES

1. Thomann M.; Popescu F. Estimating the effect of domestic load and renewable supply variability on battery capacity requirements for decentralized microgrids. *Procedia Computer Science*, 2014, vol. 32, pp. 715–722.
2. Karlsen H., Dong T., Yang Z., Carvalho R. Temperature-dependence in battery management systems for electric vehicles: Challenges, criteria, and solutions. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 142203–142213.
3. *Global EV Outlook 2021*. International Energy Agency, 2021. – Available at:https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484-f556-4110-8c5c-4ede8bcba637/GlobalEVOutlook2021.pdf (accessed 26.11.2021).
4. *Elektrozapravki: elektrozaryadnye stantsii, EZS* [Electric refueling stations: electric charging stations, EZS]. Available at: https://www.tadviser.ru/a/399080 (accessed 26.11.2021).
5. Shchurov N.I., Myatezh S.V., Malozyomov B.V., Shtang A.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Dedov S.I. Determination of inactive powers in a single-phase AC network. *Energies*, 2021, vol. 14 (16), p. 4814. DOI: 10.3390/en14164814.

6. Wang L., Wang L., Liao C., Zhang W. Research on multiple states joint estimation algorithm for electric vehicles under charge mode. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 40143–40153.
7. Naumann M.; Karl R.C., Truong C.N., Jossen A., Hesse H.C. Lithium-ion battery cost analysis in PV-household application. *Energy Procedia*, 2015, vol. 73, pp. 37–47.
8. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 23.08.2021 № 2290-r* [Order of the Government of the Russian Federation dated 23.08.2021 No. 2290-r]. Available at: http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf (accessed 26.11.2021).
9. Gjinali A. *Sistema bystroi zaryadki elektrotransportnykh sredstv* [Fast charging system for electric vehicles]. Patent EA, no. 32517, 2019.
10. Shchurov N.I. *Ustroistvo zaryadnoi stantsii postoyannym tokom na baze tyagovoi podstantsii elektricheskogo transporta* [Device of a dc charging station on the basis of a traction substation of electric transport]. Patent RF, no. 203237, 2021.
11. Snitskii A.V. *Zaryadnaya stantsiya dlya elektrotransporta* [Charging station for electric-transport]. Patent RF, no. 130459, 2013.
12. Bedzher Ch.E. *Zaryadnaya stantsiya dlya elektromobilei* [Charging station for electric vehicles]. Patent RF, no. 2720394, 2020.
13. Katanoda T., Omisha H. *Ustroistvo kontrolya zaryada ustroistva nakopleniya moshchnosti transportnykh sredstv i transportnykh sredstv, soderzhashchikh takoe ustroistvo upravleniya* [Charge control device of power accumulation device for vehicle and vehicle containing such control device]. Patent RF, no. 2714660, 2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Проценко Наталья Викторовна – родилась в 1977 году, заведующая отделом полезных моделей Сибирского центра ФИПС, ФГБУ Федеральный институт промышленной собственности. Область научных интересов: патентная экспертиза, транспорт. (Адрес: 630015, Россия, Новосибирск, ул. Планетная 30, корп. 2а. E-mail: novosib08@rupto.ru).

Protsenko Natalia Viktorovna (b. 1977) chief of Utility Models Department in the Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property. Her research interests are currently focused on patent examination and transport. Address: 30, Planetnaya Street, bldg 2a, Novosibirsk, 630015, Russia. E-mail: novosib08@rupto.ru).

Малозёмов Борис Витальевич – родился в 1972 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: качество функционирования и надежность сложных технических систем, моделирование систем, информационные технологии. Опубликовано более 180 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: mbv5@mail.ru).

Malozyomov Boris Vitalievich (b. 1972), Ph.D (Eng.), Associate Professor, associate professor of the Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University. His research interests include functioning and reliability quality of complex engineering systems, system modeling, and information technologies. More than 180 scientific and educational-methodical works have been published. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: mbv5@mail.ru).

Дмитриева Юлия Владимировна – родилась в 1971 году, заведующая отделом транспорта, ФГБУ Федеральный институт промышленной собственности. Область научных интересов: патентная экспертиза, транспорт. Опубликована одна научная работа. (Адрес: 125993, Россия, Москва, Бережковская наб. 30, корп. 1. E-mail: juvdmitrieva@rupto.ru).

Dmitrieva Julia Vladimirovna (b. 1971) – head of the transport department, Federal Institute of Industrial Property. Her research interests are currently focused on patent examination and transport. She is the author of 1 scientific paper. (Address: 30, Berezhkovskaya emb., bldg 1, Moscow, 125993, Russia. E-mail: juvdmitrieva@rupto.ru).

Кузнецов Сергей Александрович – родился в 1982 году, главный государственный эксперт по интеллектуальной собственности отдела транспорта, ФГБУ Федеральный институт промышленной собственности. Область научных интересов: патентная экспертиза, транспорт. (Адрес: 125993, Россия, Москва, Бережковская наб. 30, корп. 1. E-mail: otd1102@rupto.ru).

Kuznetsov Sergey Alexandrovich (b. 1982), chief examiner for intellectual property in the transport department, Federal Institute of Industrial Property. His research interests are currently focused on patent examination and transport. (Address: 30, Berezhkovskaya emb., bldg 1, Moscow, 125993, Russia. E-mail: otd1102@rupto.ru).

Статья поступила 11ноября 2021 г.
Received November 11, 2021

To Reference:

Protsenko N.V., Malozyomov B.V., Dmitrieva Yu.A., Kuznetsov S.A. Neobkhodimost' vyyavleniya i patentovaniya perspektivnykh reshenii v oblasti elektricheskogo transporta [The need to identify and patent promising solutions in the field of electric transport]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 4 (53), pp. 36–48. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-36-48.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2021 октябрь–декабрь № 4 (53)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.3

ДВИГАТЕЛИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ РЕДУКЦИЕЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ С ВЕНТИЛЬНЫМ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ

А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина, Д.М. Топорков, Г.Б. Вяльцев
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

В статье представлены конструктивные особенности двигателей с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием. Рассмотрен гармонический состав магнитного поля данных двигателей при использовании дробных зубцовых обмоток. Приведены аналитические выражения для магнитодвижущей силы обмотки и представлены данные рабочих гармоник для реактивных двигателей и двигателей с вентильным подмагничиванием при различном числе фаз. Описан принцип действия этих машин. Для расчета магнитного поля в воздушном зазоре использован метод гармонических проводимостей. В результате получены аналитические соотношения для распределения магнитного поля в воздушном зазоре и электромагнитного момента. После анализа полученных выражений в статье приведены условия, при выполнении которых происходит образование электромагнитного момента. Описание конструкции, принципа действия двигателей с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием проводится в наглядном сравнении с двигателями реактивного типа. При этом иллюстрируется лучшее использование активного объема машин с вентильным подмагничиванием. Помимо этого приведено сравнение двигателей с вентильным подмагничиванием по коэффициенту использования активного объема с классическими электрическими машинами (синхронными, асинхронными и машинами постоянного тока) для различных значений мощностей.

Ключевые слова: двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения, двигатели с вентильным подмагничиванием, дробные зубцовые обмотки, электромагнитный момент, магнитное поле, электрические двигатели.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-49-61

Введение

Двигатели, работа которых основана на притяжении ферромагнитных тел в магнитном поле, были известны еще в начале прошлого века. К таким двигателям относятся двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения реактивного типа (обмотки запитаны токами прямой последовательности) [1], с вентильным подмагничиванием ДЭР-В (ток обмоток содержит постоянную составляющую) [2], синхронные реактивные двигатели с зубчатым ротором без обмоток и зубчатым статором, обмотки которого питаются однополярными импульсами тока [1–4]. В зарубежной литературе они известны под аббревиатурой SRM (Switched Reluctance Motor) [3–7], у нас в стране их называют вентильно-индукторными – ВИД [8].

Так как сила притяжения не зависит от направления тока, наряду с более простой конструкцией ДЭР-В требуют и более простого преобразователя по сравнению с использованным в асинхронном приводе. Отмеченные обстоятельства объясняют природу интереса различных фирм к рассматриваемому классу двигателей и приводов, имеются проекты и даже выполненные образцы до 1000 кВт и выше.

© 2021 А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина, Д.М. Топорков, Г.Б. Вяльцев

Целью данной работы является представление процесса преобразования энергии в рассматриваемых двигателях с позиций общей теории электрических машин, а также все это подчеркивает необходимость получения основных соотношений, обеспечивающих создание моделей ДЭР-В, анализ и синтез которых проводится методами общей теории электромеханических преобразователей энергии.

1. Конструкция

ДЭР-В могут быть выполнены в трех-, четырех- и шестифазном исполнении. В данной работе рассматриваются шестифазные двигатели с вентильным подмагничиванием и показано их преимущество перед двигателями реактивного типа.

Преобразование энергии ДЭР-В определяется переменной составляющей проводимости воздушного зазора, которая зависит от геометрии зубцовой зоны двигателя, от величины зазора, от соотношения чисел зубцов статора и ротора и от числа фаз. Установлено, что глубина модуляции проводимости, определяющая рабочую гармонику при данной величине зазора, наименьшая в трехфазном и практически вдвое больше в шестифазном двигателе. В результате в последнем случае удается получить вдвое большее значение момента с единицы объема, и это обстоятельство в большей мере компенсирует усложнение инвертора по сравнению с трехфазным.

На рис. 1 представлены магнитная система шестифазного $(m = 6)$ двигателя и варианты схем включения двигателей реактивного типа и с вентильным подмагничиванием. Обмотка статора выполнена из отдельных катушек, размещенных на зубцах статора. Это так называемые дробные зубцовые обмотки с

$$q = \frac{z_1}{2pm} = \frac{c}{d} < 1,$$

где z_1 – число зубцов статора; p – число пар полюсов; m – число фаз; c, d – некоторые целые числа; $\frac{c}{d}$ – несократимая дробь. Вопросы теории этих обмоток изложены в [9].

Частота вращения ротора будет определяться известным соотношением

$$\omega_r = 2\pi f_1 / Z_2,$$

здесь f_1 – частота питающей сети; z_1 – число зубцов ротора.

В двигателях с вентильным подмагничиванием на действительном зубце также могут быть выполнены более мелкие зубцы. Получаемая структура соответствует так называемой гребенчатой зубцовой зоне. Этим самым повышается число элементарных зубцов ротора и снижается частота вращения ротора.

Обмотка может быть запитана системой токов прямой последовательности (синхронные реактивные двигатели, рис. 1, *а*) и системой токов, содержащей постоянную составляющую (синхронные двигатели с вентильным подмагничиванием, рис. 1, *б*). Ток фазы с постоянной составляющей может формироваться путем включения фаз по схеме, приведенной на рис. 1, *в*, путем подачи постоянного тока в нулевые точки полуфаз, либо же с помощью шестифазного инвертора, заменяющего вентили (рис. 1, *б*) и обеспечивающего аналогичное распределение тока фаз.

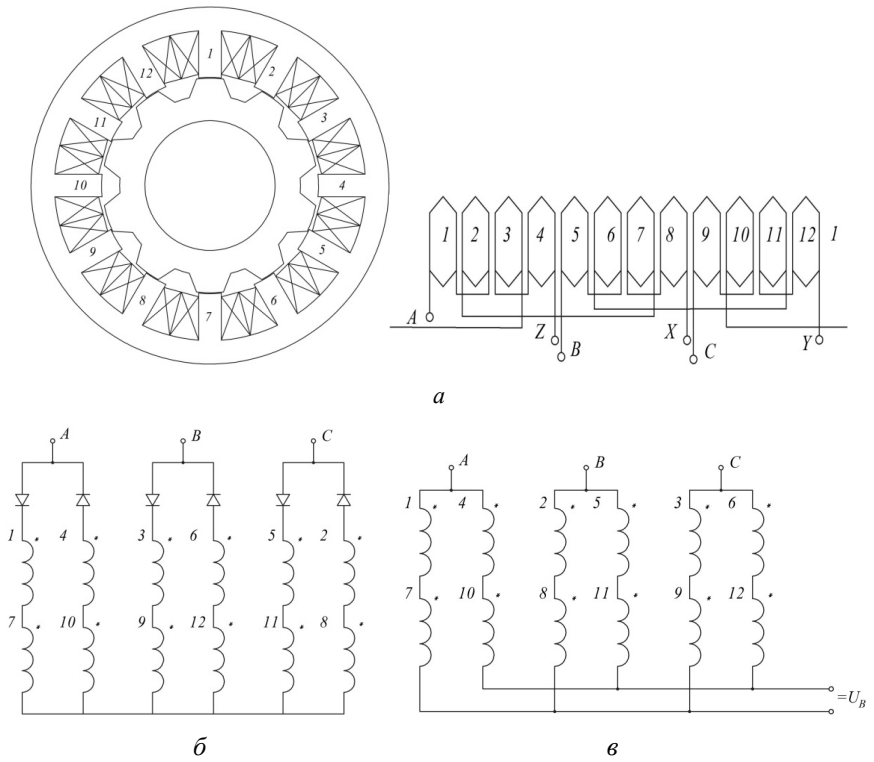


Рис. 1 – Конструкция двигателя и схемы обмоток двигателя:
а – реактивного типа (обмотка с q = 2/5); *б* и *в* – с вентильным подмагничиванием (обмотка с q = 1/2)

Fig. 1 – Motor design and motor winding diagrams:
a – a reluctance motor type (winding with q = 2/5), *b* and *c* – a motor with switched magnetization (winding with q = 1/2)

2. Принцип действия двигателя

Принцип действия двигателя может пояснить картина распределения магнитного поля, приведенная на рис. 2 (для реактивного двигателя и с вентильным подмагничиванием). Нетрудно заметить, что в обоих двигателях электромагнитный момент возникает благодаря разнице магнитных проводимостей по осям d и q. Причем движущий момент создается электромагнитными силами, действующими в области воздушного зазора, где производная от проводимости воздушного зазора по угловой координате положительна:

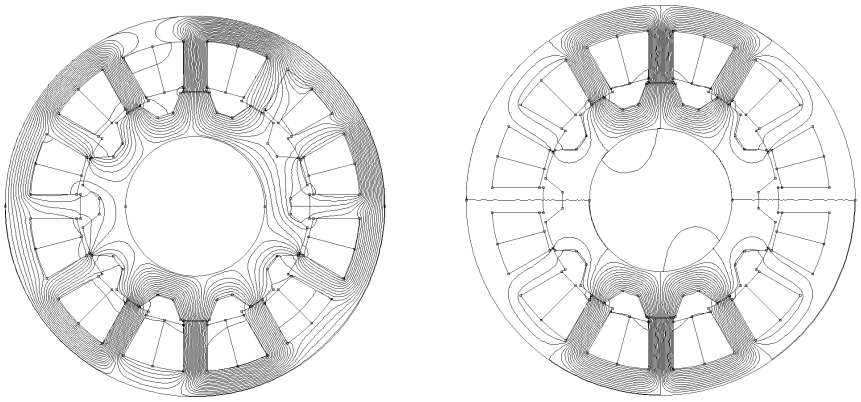
$$f = F_m^2 \frac{d\lambda}{d\alpha} \geq 0,$$

здесь F_m – магнитодвижущая сила в рассматриваемой точке воздушного зазора.

Таким образом, для получения максимального момента необходимо обеспечить магнитное поле в воздушном зазоре только в зонах, где производная от магнитной проводимости имеет один знак.

В реактивных двигателях, в отличие от двигателей с вентильным подмагничиванием, магнитное поле имеет место и в областях, где $d\lambda / d\alpha \leq 0$. Этот недостаток приводит к снижению электромагнитного момента двигателя. С этой точки

зрения синхронный двигатель с вентильным подмагничиванием предпочтителен, его движущий момент выше, так как у него отсутствует магнитное поле в областях воздушного зазора, где производная проводимости отрицательна.



а *б*

Рис. 2 – Распределение магнитного поля в двигателях:
а – реактивного типа (обмотка с q = 2/5), *б* – с вентильным подмагничиванием (обмотка с q = 1/2)

Fig. 2 – Magnetic field distribution in motors:
a – reluctance motor type (winding with q = 2/5); *b* – with switched magnetization (winding with q = 1/2)

Работу этих двигателей можно пояснить следующим образом. Модуляция магнитного потока в воздушном зазоре обеспечивается как переменной проводимостью воздушного зазора, так и дробными зубцовыми обмотками с $q < 1$, создающими две «сильные» гармоники магнитодвижущей силы (МДС) F_{1m} и F_{2m} с близкими, но не равными числами полюсов p_1 и p_2, и вращающихся в противоположных направлениях с угловой частотой ω_1.

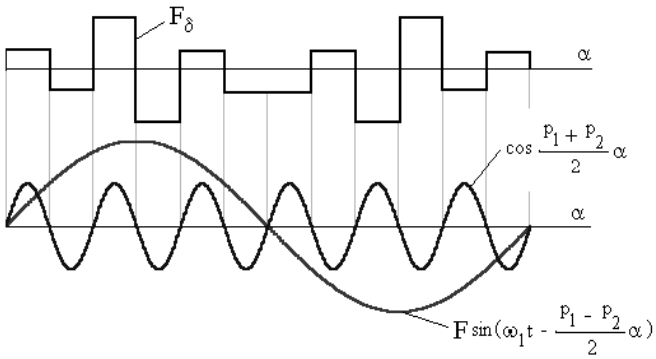


Рис. 3 – Распределение МДС в воздушном зазоре обмотки с q = 2/5 реактивного двигателя

Fig. 3 – Distribution of mmf in the winding air gap for reluctance motor with q = 2/5

Для двигателей реактивного типа результирующая МДС, созданная обмоткой, имеет вид

$$F_p = F_{1m}\sin(\omega_1 t - p_1\alpha) + F_{2m}\sin(\omega_1 t + p_2\alpha) \approx$$
$$\approx 2F_m \sin\left(\omega_1 t - \frac{p_1 - p_2}{2}\alpha\right)\cos\frac{p_1 + p_2}{2}\alpha.$$

Полученное после замены суммы синусов произведение синуса и косинуса можно трактовать как произведение неподвижной и бегущей волн. На рис. 3 представлен характер изменения МДС F_δ зубцовой обмотки на одном периоде, а также представление ее в виде произведения неподвижной и бегущей волн МДС F_p, для обмотки с q = 2/5 (двигатель реактивного типа). Бегущая с угловой частотой волна модулирует неподвижную волну, в результате максимум результирующей МДС перемещается в пространстве также со скоростью ω_1, не зависящей от числа полюсов рабочих гармоник. Синхронно с максимумом перемещается и явнополюсный ротор.

В двигателях с вентильным подмагничиванием постоянная составляющая тока, протекающая по обмотке (см. рис. 1, *б*), создает неподвижную в пространстве волну МДС с полюсностью p_0:

$$F_0 = F_{0m}\cos(p_0\alpha).$$

Нетрудно заметить, что полюсность неподвижной гармоники МДС p_0 равна

$$p_0 = \frac{p_1 + p_2}{2}.$$

Тогда результирующая МДС в двигателе с вентильным подмагничиванием распределена только на половине периода обмотки:

$$F_p = F_{1m}\sin(\omega_1 t - p_1\alpha) + F_{2m}\sin(\omega_1 t + p_2\alpha) + F_{0m}\cos(p_0\alpha) =$$
$$= \cos(p_0\alpha)\left[2F_m \sin\left(\omega_1 t - \frac{p_1 - p_2}{2}\alpha\right) + F_{0m}\right].$$

Такое распределение приведено на рис. 4 для двигателя с обмоткой, имеющей $q = 1/2$. Модулирующая волна также перемещается с угловой частотой ω_1, но распределена в пространстве с периодом 2α.

Приведенные распределения МДС на рис. 3 и 4 еще раз иллюстрируют физическую сторону причины лучшего использования активного объема в двигателях с вентильным подмагничиванием по сравнению с двигателями реактивного типа. В двигателях с вентильным подмагничиванием МДС распределена только на половине периода расточки статора в областях, где изменение проводимости от углового положения ротора положительно $(d\lambda / d\alpha > 0)$, т. е. в этих двигателях нет зон на расточке статора, в которых образуются отрицательные электромагнитные силы.

Приведенные выше иллюстрации поясняют причину того, что максимум магнитного потока перемещается вдоль расточки статора с частотой ω_1, не зависящей от числа полюсов рабочих гармоник. Синхронно с максимумом магнитного потока перемещается и явнополюсный ротор. Строгое доказательство этого приводится ниже.

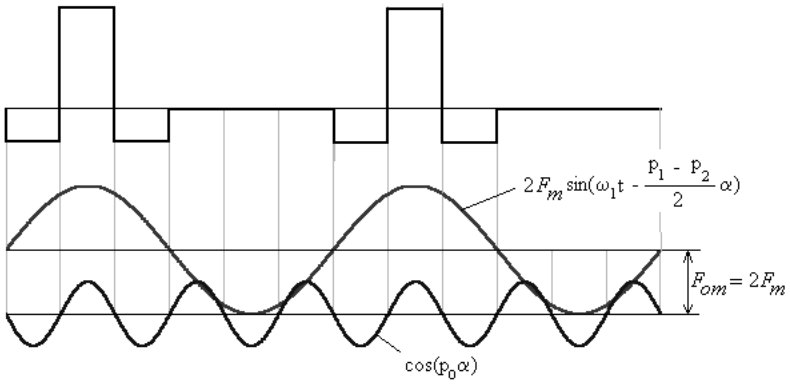


Рис. 4 – Распределение МДС обмотки с q = 1/2 шестифазного двигателя с вентильным подмагничиванием

Fig. 4 – Distribution of MMF of the winding for a switched magnetization six-phase motor with q = 1/2

Данные рабочих гармоник дробных зубцовых обмоток некоторых двигателей приведены в таблице [1].

Данные рабочих гармоник МДС некоторых двигателей
Data of the working harmonics of the MMF of some motors

	Реактивные	С вентильным подмагничиванием		
	$m = 3$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 6$
z_1	12	6	8	12
q	2/5	1	1	1/2
p_1	7	1	6	4
p_2	5	–	2	8
p_0	–	3	4	6

3. Магнитное поле и электромагнитный момент двигателя с вентильным подмагничиванием

Наибольшую роль при расчете любого электрического двигателя играет поле в области воздушного зазора. Зная величину и характер распределения магнитного поля в воздушном зазоре, можно определить все основные характеристики двигателя, включая момент и индуктивности обмоток.

Для расчета магнитного поля используем метод гармонических проводимостей [11]. Используя этот метод, можно получить простые аналитические соотношения для распределения магнитного поля в воздушном зазоре, для электромагнитного момента, которые позволяют проводить не только анализ, но и синтез двигателей.

Нормальную составляющую индукции в воздушном зазоре $B_\delta(\alpha)$ определим из известного приближенного выражения, полагая, что магнитная проницаемость стального магнитопровода равна бесконечности $(\mu = \infty)$ [10]:

$$B_\delta(\alpha) = \lambda_\delta(\alpha) \sum_{\nu=0}^{\nu} F_\nu(\alpha),$$

здесь $F_\nu(\alpha)$ – амплитуда ν-й гармоники магнитодвижущей силы; $\lambda_\delta(\alpha)$ – удельная эквивалентная проводимость воздушного зазора.

Для исследования основных явлений в машинах с переменным магнитным сопротивлением в представленной ниже модели вместо реальных зубчатых структур статора и ротора рассматривается модель с гладким статором и явнополюсным ротором, которому соответствует эквивалентная удельная проводимость воздушного зазора, отражающая действительный пространственный характер распределения зубцовых проводимостей:

$$\lambda_\delta(\alpha) = \lambda_0 + \sum_1^k \lambda_k \cos\left[k(z_2\theta - n\alpha)\right], \qquad (1)$$

здесь $\theta = \omega_r t - \theta_0$ – угол между осью фазы статора и осью максимальной проводимости воздушного зазора (осью *d*); α – текущая угловая координата, отсчитываемая от оси фазы статора; n – число периодов проводимости воздушного зазора $n = |Z_2 - Z_1|$; λ_0 и λ_k – постоянная и *k*-я переменная составляющие проводимости воздушного зазора.

Электромагнитный момент определим как результат взаимодействия гармоник вращающегося магнитного поля и соответствующих гармоник распределения поверхностной плотности тока [10]:

$$M_э = \int_0^{2\pi} B(\alpha)\, j(\alpha) R d\alpha ,$$

где $j(\alpha)$ – поверхностная плотность тока, соответствующая пространственному распределению МДС обмотки; *R* – радиус расточки статора.

Этот способ определения закона распределения магнитного поля и электромагнитного момента имеет большую наглядность и позволяет рассмотреть принцип работы электрических машин. Особенно это актуально на начальном этапе анализа электрических машин.

Поверхностный ток получается в результате замены зубчатого магнитопровода гладким и распределения тока каждого паза в виде тонкого слоя на поверхности магнитопровода [10]. Форма кривой плотности поверхностного тока непрерывно изменяется в соответствии с изменением тока в пазах.

Изменение плотности поверхностного тока вдоль расточки статора представим в виде производной МДС по углу поворота ротора α:

$$j = -\frac{dF}{Rd\alpha},$$

здесь $Rd\alpha$ – длина элемента поверхности.

Период изменения плотности поверхностного тока равен периоду изменения тока в пазах. При этом каждой гармонической МДС соответствует своя гармоническая плотности поверхностного тока.

Рассмотрим принцип действия двигателей с переменным магнитным сопротивлением, ограничившись в эквивалентной проводимости постоянной составляющей и первой гармоникой, а в магнитодвижущей силе обмотки – двумя основными гармониками, вращающимися в противоположных направлениях, и гармоникой от постоянной составляющей тока (1).

При питании однозубцовых обмоток двигателя по схеме (см. рис. 1, *а*) по катушкам, наряду с токами прямой последовательности, начинает протекать

и постоянная составляющая тока. Основные гармоники МДС, созданные током прямой последовательности и постоянной составляющей, приведены в таблице.

При переменном воздушном зазоре, изменяющемся по гармоническому закону (1), все эти гармоники участвуют в образовании электромагнитного момента.

Используя полученные выражения МДС для основных гармоник от постоянной составляющей тока и от токов прямой последовательности, найдем гармонический состав магнитного поля с учетом переменного воздушного зазора и рассмотрим механизм взаимодействия этих гармоник:

$$B_\delta = F_\delta \lambda_\delta = \left[F_{m1}\cos(\omega_1 t - p_1\alpha) + F_{m2}\cos(\omega_1 t + p_2\alpha) + \right.$$
$$\left. + F_0\cos(p_0\alpha)\right]\left[\lambda_0 + \lambda_1\cos(z_2\omega_r t - n\alpha)\right],$$

здесь p_0 – число пар полюсов МДС от постоянной составляющей тока.

После перемножения и преобразований получим

$$B_\delta = \lambda_0 F_{m\nu 1}\cos(\omega_1 t - p_1\alpha) + \lambda_0 F_{m\nu 2}\cos(\omega_1 t + p_2\alpha) + F_0\lambda_0\cos(p_0\alpha) +$$
$$+ 0,5\lambda_1 F_{m\nu 1}\cos(z_2\omega_r t + \omega_1 t - n\alpha - p_1\alpha) +$$
$$+ 0,5\lambda_1 F_{m\nu 1}\cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1\alpha) +$$
$$+ 0,5\lambda_1 F_{m\nu 2}\cos(z_2\omega_r t + \omega_1 t - n\alpha + p_2\alpha) +$$
$$+ 0,5\lambda_1 F_{m\nu 2}\cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2\alpha) +$$
$$+ 0,5\lambda_1 F_0\cos(z_2\omega_r t - n\alpha + p_0\alpha) + 0,5\lambda_1 F_0\cos(z_2\omega_r t - n\alpha - p_0\alpha).$$

Рассмотрим электромагнитный момент двигателя с вентильным подмагничиванием как результат взаимодействия гармоник магнитного поля и соответствующих гармоник плотности поверхностного тока того же порядка.

В двигателях с вентильным подмагничиванием плотность поверхностного тока представим в следующем виде:

$$j_\nu = -\frac{dF_\nu}{Rd\alpha} = j_{\nu m1}\cos(\omega_1 t - p_1\alpha + \pi/2) +$$
$$+ j_{\nu m2}\cos(\omega_1 t + p_2\alpha + \pi/2) + j_{\nu m0}\cos(p_0\alpha + \pi/2).$$

Электромагнитный момент может быть определен как

$$M = l_\delta R^2 \int_0^{2\pi} \Big[j_{\nu m0}\cos(p_0\alpha + \pi/2) 0,5\lambda_1 F_{m\nu 1}\cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1\alpha) +$$
$$+ j_{\nu m0}\cos(p_0\alpha + \pi/2) 0,5\lambda_1 F_{m\nu 2}\cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2\alpha) +$$
$$+ j_{\nu m1}\cos(\omega_1 t - p_1\alpha + \pi/2) 0,5\lambda_1 F_0\cos(z_2\omega_r t - n\alpha - p_0\alpha) +$$
$$+ j_{\nu m2}\cos(\omega_1 t + p_2\alpha + \pi/2) 0,5\lambda_1 F_0\cos(z_2\omega_r t - n\alpha + p_0\alpha)\Big] d\alpha =$$
$$= \frac{1}{4} l_\delta R^2 \lambda_1 \int_0^{2\pi} (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8)\, d\alpha, \qquad (2)$$

где

$$a_1 = F_{m\nu 1} j_{\nu m0}\left[\cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1\alpha + p_0\alpha + \pi/2)\right.,$$
$$a_2 = \cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1\alpha - p_0\alpha - \pi/2),$$

$$a_3 = F_{m\nu 2} j_{\nu m0} \left[\cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2\alpha + p_0\alpha + \pi/2),\right.$$

$$a_4 = \cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2\alpha - p_0\alpha - \pi/2)\ ,$$

$$a_5 = F_0 j_{\nu m1} \left[\cos(z_2\omega_r t + \omega_1 t - n\alpha - p_1\alpha - p_0\alpha + \pi/2),\right.$$

$$a_6 = \cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha + p_1\alpha - p_0\alpha - \pi/2),$$

$$a_7 = F_0 j_{\nu m2} \left[\cos(z_2\omega_r t + \omega_1 t - n\alpha + p_2\alpha + p_0\alpha + \pi/2),\right.$$

$$a_8 = \cos(z_2\omega_r t - \omega_1 t - n\alpha - p_2\alpha + p_0\alpha - \pi/2)\Big].$$

После интегрирования соответствующих составляющих получим

$$M = \frac{\pi}{8}\lambda_1 l_\delta D^2 [j_{\nu m0}(F_{m\nu 1} + F_{m\nu 2}) + F_0(j_{\nu m1} + j_{\nu m2})]\sin\theta_\nu\ . \qquad (3)$$

В образовании электромагнитного момента участвуют a_2, a_3, a_6 и a_8, полученные в (2) при выполнении условия

$$n = z_2 - z_1 = p_1 - p_0 = p_0 - p_2$$

и при частоте вращения ротора, определяемой выражением

$$\omega_r = \frac{\omega_1}{z_2}\ . \qquad (4)$$

Составляющие a_1, a_4, a_5 и a_7 выражения (2), зависящие как от времени, так и от угла α, представляют собой дополнительные моменты, которые при частоте вращения ротора (4) образуют пульсирующие во времени моменты. Среднее их значение за период изменения тока равно нулю.

В случае, когда число зубцов статора больше числа зубцов ротора,

$$n = z_2 - z_1 = -(p_1 - p_0) = -(p_0 - p_2)\ . \qquad (5)$$

В образовании электромагнитного момента участвуют гармоники a_1, a_4, a_5 и a_7 при частоте вращения

$$\omega_r = -\frac{\omega_1}{z_2}, \qquad (6)$$

а составляющие a_2, a_3, a_6 и a_8 дадут дополнительные пульсирующие во времени моменты.

Подставив в (3) значения плотностей поверхностного тока, получим следующее выражение электромагнитного момента:

$$M = \frac{\pi}{2}\lambda_1 l_\delta D F_0 [F_{m\nu 1}(p_0 + p_1) + F_{m\nu 2}(p_0 + p_2)]\sin\theta_\nu\ .$$

Аналогичное выражение получается и в случае образования электромагнитного момента другой группой гармоник, удовлетворяющих соотношению (5), но при частоте вращения ротора по (6).

4. Коэффициент использования активного объема машины

Коэффициент использования активного объема машины представляет собой отношение момента к активному объему машины

$$C_A = M / D^2 l \qquad (7)$$

и позволяет оценить величину силы $f_{\text{у}}$, приходящейся на единицу поверхности расточки статора

$$f_{\text{у}} = 2C_A / \pi .$$

Анализ выражения (7) показывает, что значение $f_{\text{у}}$ при индукции в зубце $B_z = 2$ Тл (большее значение ограничивается насыщением магнитной системы) и определенной геометрии воздушного зазора может достигать величины $f_y = 1,7...2$ Н/см^2.

Для классических машин магнитоэлектрического и индуктивного типа значение удельной силы существенно зависит от диаметра расточки машины D_a. Так, при $D_a \le 80$ мм она лежит на уровне $0,5$ Н/см^2, по мере роста диаметра она растет практически линейно, достигая при диаметре $D_a = 400$ мм величины 3 Н/см^2.

Такая зависимость удельного показателя от диаметра в отмеченном классе машин объясняется необходимостью размещения токовых систем обмоток на роторе. В ДЭР-В такого ограничения нет, именно поэтому можно говорить о преимуществе данных машин над асинхронными и особенно машинами постоянного тока малой мощности (малого диаметра). Это преимущество с ростом мощности (диаметра) будет уменьшаться.

За двигателями с вентильным подмагничиванием остается преимущество, связанное с практическим отсутствием лобовых частей обмотки, возможность получения высоких скоростей за счет безобмоточного ротора, простота конструкции и технологии, хорошие регулировочные свойства. Успешное развитие силовой электроники при существенном снижении ее стоимости обеспечат широкое применение ДЭР-В.

Заключение

Пояснен принцип действия электрических машин с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием с единых позиций общей теории электрических машин.

Получено выражение электромагнитного момента и основные соотношения двигателей с электромагнитной редукцией частоты вращения с вентильным подмагничиванием.

Показано, что электродвигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения имеют явное преимущество перед двигателями реактивного типа

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шевченко А.Ф.** Синхронные двигатели с переменным магнитным сопротивлением с дробными (q < 1) однозубцовыми обмотками // Научный вестник НГТУ. – 1997. – № 3. – С. 177–188.
2. **Жуловян В.В., Шевченко А.Ф., Панарин А.Н.** Синхронный редукторный двигатель с вентильным подмагничиванием для исполнительных электромеханизмов // Системы и устройства автоматики. – Красноярск, 1980. – С. 53–58.
3. Патент 4035680 США. Двигатель с переменным магнитным сопротивлением / C.R. Maeder. – Опубл. 1978, Бюл. № 6.
4. Патент 2272519 Франция. Синхронный двигатель с магнитной редукцией / C. Maeder. – Опубл. 19.12.75; публ. СССР 1977 г., Бюл. № 3.

5. **French I.R.** Switched reluctance motor drives for rail traction: relative assessment // IEE Proceedings B. – 1984. – Vol. 131, N 5. – P. 209–219.
6. **Krishnan R., Arumugan R., Lindsay J.F.** Design procedure for switched-relactance motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1988. – Vol. 24, N 3. – P. 456–461.
7. **Miles A.R.** Design of a 5 MW, 9000 V switched reluctance motor // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1991. – Vol. 6, N 3. – P. 484–491.
8. **Птах Г.К.** Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 23–33. – URL: http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3-5.pdf (дата обращения: 29.09.2021).
9. **Шевченко А.Ф.** Магнитодвижущие силы однозубцовых дробных обмоток с $q < 1$ // Научный вестник НГТУ. – 1996. – № 2. – С. 99–110.
10. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
11. **Вольдек А.И.** Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. – 1966. – № 7. – С. 46–52.

MOTORS WITH ELECTROMAGNETIC REDUCTION OF ROTATION FREQUENCY WITH SWITCHED MAGNETIZATION

Shevchenko A.F., Chestyunina T.V., Toporkov D.M., Vyaltcev G.B.,
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper presents design features of motors with electromagnetic reduction of rotation frequency with switched magnetization. The harmonic composition of the magnetic field of such motors is considered when using fractional slot windings. Analytical expressions for the magnetomotive force of the winding are given and data on operating harmonics for reluctance motors and motors with switched magnetization at different numbers of phases are presented. The principle of operation of such machines is described. The method of harmonic permeances was used to calculate the magnetic field in the air gap. As a result, analytical expressions were obtained for the distribution of the magnetic field in the air gap and the electromagnetic torque. After analyzing the expressions obtained, the paper presents the conditions under which the formation of an electromagnetic torque occurs. The design and the operation principle of motors with electromagnetic reduction of rotation frequency with switched magnetization is described and compared visually with reluctance motors. It illustrates a better use of the active volume in machines with switched magnetization. In addition, a comparison between motors with switched magnetization and classical electric machines (synchronous, induction and direct current machines) in terms of the utilization of an active volume factor for different power values is given.

Keywords: motors with electromagnetic reduction of rotation frequency, motors with switched magnetization, fractional slot windings, electromagnetic torque, magnetic field, electric motors.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-49-61

REFERENCES

1. Shevchenko A.F. Sinkhronnye dvigateli s peremennym magnitnym soprotivleniem s drobnymi ($q < 1$) odnozubtsovymi obmotkami [Synchronous motors with variable reluctance and fractional slot windings]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 1997, no. 3, pp. 177–188.
2. Zhulovyan V.V., Shevchenko A.F., Panarin A.N. Sinkhronnyi reduktornyi dvigatel' s ventil'nym podmagnichivaniem dlya ispolnitel'nykh elektromekhanizmov [Synchronous gear motor with valve magnetization for executive electromechanisms]. *Sistemy i ustroistva avtomatiki* [Automation systems and devices]. Krasnoyarsk, 1980, pp. 53–58.
3. Maeder C. *Variable reluctance motor*. Patent US, no. 4035680A, 1978.

4. Maeder C. *Motors having windings on the stator and a variable reluctance soft-iron rotor without windings*. Patent FR, no. 2272519, 1975.
5. French I.R. Switched reluctance motor drives for rail traction: relative assessment. *IEE Proceedings B*, 1984, vol. 131, no. 5, pp. 209–219.
6. Krishnan R., Arumugan R., Lindsay J.F. Design procedure for switched-relactance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1988, vol. 24, no. 3, pp. 456–461.
7. Miles A.R. Design of a 5 MW, 9000 V switched reluctance motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 1991, vol. 6, no. 3, pp. 484–491.
8. Ptakh G.K. Ventil'no-induktornyi reaktivnyi elektroprivod srednei i bol'shoi moshchnosti: zarubezhnyi i otechestvennyi opyt [Switched reluctance drive medium and high power: foreign and domestic experience]. *Elektrotekhnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal = Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 23–33. Available at: http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3-5.pdf (accessed 19.09.2021).
9. Shevchenko A.F. Magnitodvizhushchie sily odnozubtsovykh drobnykh obmotok s $q < 1$ [Magnetomotive forces of fractional slot windings with q<1]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 1996, no. 2, pp. 99–110.
10. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 928 p.
11. Vol'dek A.I. Issledovanie magnitnogo polya v vozdushnom zazore yavno-polyusnykh sinkhronnykh mashin metodom garmonicheskikh provodimostei [Investigation of the magnetic field in the air gap of single-pole synchronous machines by the method of harmonic conductivities]. *Elektrichestvo = Electrical Technology*, 1966, no. 7, pp. 46–52.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шевченко Александр Федорович – родился в 1948 году, д-р техн. наук, профессор, профессор и заведующий кафедрой «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрические машины с дробными зубцовыми обмотками (с постоянными магнитами, с электромагнитной редукцией частоты вращения, индукторные). Опубликовано более 120 научных работ. (Адрес: Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: a.shevchenko@corp.nstu.ru).

Shevchenko Aleksandr Fedorovich (b. 1948) – Doctor of Sciences (Eng.), professor and head of the Electromechanics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electrical machines with fractional slot windings and permanent magnets and switch reluctant motors. He is the author of 120 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: a.shevchenko@corp.nstu.ru).

Честюнина Татьяна Викторовна – родилась в 1978 году, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрические машины с дробными зубцовыми обмотками, с постоянными магнитами. Опубликовано 16 научных работ. (Адрес: Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: chestyunina@corp.nstu.ru).

Chestyunina TatianaViktorovna (b. 1978) – PhD (Eng.), associate professor at the Electromechanics Department in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on electrical machines with fractional slot windings and permanent magnets. She is the author of 16 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: chestyunina@corp.nstu.ru).

Топорков Дмитрий Михайлович – родился в 1988 году, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: расчет и моделирование электрических машин. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: toporkov@corp.nstu.ru).

Toporkov Dmitriy Mikhailovich (b. 1988) – PhD (Eng.), associate professor at the Electromechanics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on calculation and simulation of electrical machines. He is the author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: toporkov@corp.nstu.ru).

Вяльцев Георгий Бенцианович – родился в 1986, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электромеханика, численные методы моделирования электрических машин. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: vyalcev@corp.nstu.ru).

Vyaltsev Georgy Bentsianovich (b. 1986) – PhD (Eng.), associate professor at the Department of Electromechanics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electromechanics and numerical methods for electrical machines modeling. He is the author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vyalcev@corp.nstu.ru).

Статья поступила 21 сентября 2021 г.
Received September 21, 2021

To Reference:

Shevchenko A.F., Chestyunina T.V., Toporkov D.M., Vyaltcev G.B. Dvigateli s elektromagnitnoi reduktsiei chastoty vrashcheniya s ventil'nym podmagnichivaniem [Motors with electromagnetic reduction of rotation frequency with switched magnetization]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 4(53), pp. 49–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-49-61.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Выпуск 4 (53) октябрь–декабрь 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 22.12.2021. Выход в свет 27.12.2021. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 5,6. Печ. л. 4,0. Изд. № 220. Заказ № 27. Цена свободная

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

16+

Индекс журнала в Роспечати
82961