НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2017

январь-март

№ 1 (34)



Выходит четыре раза в год ISSN 1727-2769

Учредители

Академия наук высшей школы России Новосибирское отделение Академии наук высшей школы

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) А. Загоскин, PhD (Великобритания) Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия) М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина) К. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф. В.Г. Дубровский, д-р физ.-мат. наук, проф. Б.А. Князев, д-р физ.-мат. наук, проф. А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф. Г.В. Майер, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ В.К. Макуха, д-р техн. наук, проф. В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф. С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф. Г.М. Шумский, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2002 г. (свидетельство ПИ № 77-11517 от 04.01.2002 г.)

Адрес редакции: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 4, ком. 415, телефон: (383) 346-15-37, факс: (383) 346-02-09. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2017 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

2017 January – March № 1 (34)



Journal is published quarterly ISSN 1727-2769

Journal was established by Russian Higher Education Academy of Science Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science

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) A. Zagoskin, PhD (United Kingdom) E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany) M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine) K. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.) I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof. V.G. Dubrovsky, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. B.A. Knyazev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. A.I. Legalov, D.Sc.(Eng.), Prof. G.V. Mayer, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. V.K. Makukha, D.Sc. (Eng.), Prof. V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof. G.M. Shumsky, D.Sc. (Eng.), Prof.

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

Editor Address: Office 415, 20 bld. 4, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 346-15-37. Fax: +7 (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science, 2017 г.

2017

январь-март

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Борд Е.Г. Нелинейные колебания в системе двух правильных вихревых многоугольников		
Попова Е.А., Никифоров А.В.		
Влияние разрывов цепочки на теплоемкость	10	
халдеиновскои системы	19	
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ		
Вайман Д.А., Красный И.Б., Данилов В.С., Кумачева С.А.		
Исследование технологических аспектов формирования		
трехмерных структур с маталлизационными		
слоями из LTCC керамики		
Гриф М.Г., Козлов А.Н., Мануева Ю.С.		
Компьютерная модель русского жестового языка	46	
Драгунов В.П., Синицкий Р.Е., Киселёв Д.Е.		
Влияние непараллельности электродов на характеристики		
МЭМС в режиме с контролируемым зарядом		
Манусов В.З., Крюков Д.О., Ахьёев Дж.С.		
Согласование экспертных оценок при диагностике текущего		
технического состояния высоковольтного		
электрооборудования	72	

<i>Муценик Е.А., Султанов А.Н., Иванов Б.И.</i> Проектирование сверхпроводникового копланарного резонатора, непрямым образом взаимодействующего с волноводной линией	85
<i>Нейман Л.А., Нейман В.Ю.</i> Сравнение динамики рабочих циклов двухкатушечных синхронных электромагнитных машин ударного действия со свободным выбегом бойка	98
Остертак Д.И. Анализ электростатических взаимодействий в плоскопараллельных МЭМС с учётом краевых эффектов в 3D-приближении	16

PROCEEDINGS OF RUSSIAN HIGHER EDUCATION ACADEMY OF SCIENCES

2017	January–March	№ 1 (34)
------	---------------	----------

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Bord E.G.</i> Nonlinear oscillations in two regula vortex polygon system	r closed
<i>Popova E.A., Nikiforov A.V.</i> The chain breaks effect on haldane	system heat capacity19
TECHNICAL SCIENCES	
<i>Vayman D.A., Krasny I.B., Danilov</i> Research into technological aspects structures formation with metalized based on the LTCC ceramic	of the three-dimentsional layers
<i>Grif M.G., Kozlov A.N., Manueva</i> A computer model of the russian sig	Yu.S. gn language46
<i>Dragunov V.P., Sinitskiy R.E., Kise</i> Influence of electrode nonparallelist in a controlled charge mode	elev D.E. m on MEMS characteristics
<i>Manusov V.Z., Kryukov D.O., Ahy</i> Coordination of expert appraisal in condition of high voltage electric eq	<i>Dev J.S.</i> diagnostics of current uipment72

<i>Mutsenik E.A., Sultanov A.N., Ivanov B.I.</i> Design of superconducting side-coupled coplanar resonator
<i>Neyman L.A., Neyman V.Yu.</i> Comparison of the operating cycles dynamics of the two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with head free running-out
<i>Ostertak D.I.</i> An analysis of electrostatic interactions in parallel-plate MEMS with regard to fringing field effects within a 3D-approach116

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2017

январь–март

№ 1 (34)

• ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ =

УДК 532.517.3

НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СИСТЕМЕ ДВУХ ПРАВИЛЬНЫХ ВИХРЕВЫХ МНОГОУГОЛЬНИКОВ

Е.Г. Борд

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Моделируется регулярное поведение возмущений твердотельного вращения правильного вихревого многоугольника (решения Кельвина). Для получения решения, являющегося обобщением решения Кельвина, используется процедура редукции уравнений динамики вихревой системы. В результате редукции получены уравнения второго порядка, описывающие частные решения уравнений динамики систем двух, четырех, шести, восьми, десяти, двенадцати вихрей. Получены численные решения этих уравнений. Описана структура фазового пространства решений. Фазовые портреты построенных решений иллюстрируют изменение устойчивости систем в зависимости от числа вихрей. Свойство устойчивости, известное для систем с малым (меньше восьми) числом вихрей проявляется в том, что неподвижная точка, соответствующая решению Кельвина, является внутренней точкой области, образованной замкнутыми фазовыми кривыми. При рассмотрении неустойчивых систем с восьмью, десятью и двенадцатью вихрями наблюдается распад областей нейтрально устойчивых колебаний, при этом решение Кельвина оказывается предельным для решений принадлежащих различным областям фазового пространства. Фазовые портреты в системах восьми, десяти и двенадцати вихрей оказываются типичными, что позволяет предположить существование универсального механизма возникновения хаотического поведения в этих системах.

Ключевые слова: устойчивость, нелинейные колебания, точечные вихри, решение Кельвина.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-7-18

Введение

Исследование устойчивости движения правильной полигональной системы вихрей, предпринятое впервые в XIX веке, получило содержательное развитие в ряде современных работ. Интерес исследователей к этой задаче обусловлен как фундаментальным характером проблемы, так и очевидными практическими приложениями. Из недавно опубликованных работ следует упомянуть [1, 2] в которых рассматривается поведение точечных вихрей на сфере, востребованное, в частности, при решении задач описания движения вихрей в атмосфере планеты. Методам численного моделирования в гидродинамике, основанным на модели динамики системы дискретных вихрей, посвящены работы [3, 4]. В настоящей работе предлагается описание частных решений задачи динамики правильной полигональной конфигурации, полученное для систем, образованных N = 4, 6, 8, 10, 12 вихрями. Полученные решения, несмотря на свой частный характер, де-

монстрируют изменение устойчивости, связанное как с увеличением числа вихрей в системе, так и с различными типами возмущений начального положения вихрей. Предлагаемые частные решения описывают нелинейные колебания с одной

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (соглашение № 14-19-00312).

степенью свободы, возникающие в системе двух правильных многоугольников точечных вихрей при выполнении дополнительных ограничений на их положения.

Рассматривается движение системы N точечных вихрей одинаковой интенсивности Γ . Положение вихрей может быть задано комплексными координатами $z_n(t)$, n = 0, ..., N-1. Движение описывается системой уравнений

$$\frac{dz_n}{dt} = \frac{i\Gamma}{2\pi} \sum_{m=0, m \neq n}^{N-1} \frac{1}{\overline{z}_n - \overline{z}_m} \,. \tag{1}$$

Твердотельное вращение вихревой конфигурации, известное как решение Кельвина [5, 6], получается из уравнений (1) в предположении, что вихри расположены в вершинах правильного *N*-угольника. Движение системы вихрей определяется функцией $z_n(t) = R \exp(i\Omega_N t + 2\pi i n/N)$. Подстановка этого представления в уравнение (1) дает выражение для угловой скорости вращения правильного вихревого многоугольника $\Omega_N = \frac{N-1}{4\pi R^2}$, полученное впервые в [7]. В работах

[8, 9] были получены ответы на ряд вопросов, связанных с устойчивостью правильной полигональной конфигурации, остававшихся неизученными в XX веке. В частности, в [8] была доказана устойчивость правильного вихревого семиугольника. Методы редукции уравнений движения различных вихревых систем на плоскости, на сфере и в областях с границей представлены в работах [1, 9, 10]. Тем не менее оставался открытым вопрос о том, что является источником возникновения неустойчивости. В случае правильной вихревой системы можно предполагать влияние двух факторов, вызывающих неустойчивость: сингулярности поля завихренности и сложности системы, определяемой количеством взаимодействующих вихрей. Ответ на вопрос о влиянии сингулярности завихренности на устойчивость полигональной системы был получен в работах [11, 12]. Поле завихренности, порождаемое точечными вихрями, было регуляризовано. Рассматривалась система вихрей с гауссовскими распределениями завихренности. Для такой системы были получены явные выражения показателей Ляпунова. С увеличением дисперсии распределения завихренности показатели Ляпунова монотонно убывают, а при стремлении дисперсии к нулю стремятся к значениям, полученным в [7] для системы точечных вихрей. Поведение показателей Ляпунова говорит о том, что регуляризация поля завихренности не объясняет качественного изменения решения линейной задачи устойчивости правильной полигональной конфигурации вихрей при изменении числа вихрей. Таким образом, главным фактором влияния на устойчивость является размерность задачи. Для углубления представлений о поведении вихревой системы в этой ситуации требуется располагать новыми решениями, отличными от решения, описывающего твердотельное вращение правильной конфигурации вихрей.

Основанием для поиска таких решений для автора явились работы [13, 14, 15]. Здесь для изучения динамики вихревой системы вычислялась автокорреляционная функция координат вихрей. Стохастизация неустойчивой вихревой системы характеризовалась стремлением автокорреляционной функции к нулю. Вместе с тем на начальных временных интервалах эволюции системы, продолжительность которых была сопоставима с периодом оборота томпсоновской конфигурации, наблюдалось регулярное поведение автокорреляционной функции, при этом ее амплитуда оставалась неизменной с высокой степенью точности. Такое поведение свидетельствовало о сохранении регулярного режима движения в неустойчивой системе на конечном интервале времени. Возмущение, вносимое неустранимыми погрешностями численного интегрирования приводило к экспоненциальному росту возмущений решения, описывающего твердотельное вращение вихревой системы. Инкременты нарастания возмущений в системах с различным N соответствовали наибольшему значению показателя Ляпунова в соответствующей вихревой системе. Возможное объяснение такого поведения динамической системы состояло в том, что в ней существует устойчивое решение, соответствующее возмущению начальных данных. Описание такого решения для системы N = 8 вихрей было предложено в [16, 17]. Были получены уравнения нелинейных колебаний в окрестности положения неустойчивого равновесия и показано, что именно это решение реализуется в интервале экспоненциального роста возмущений начальных данных. Целью настоящей работы является описание регулярного периодического поведения в системах двух правильных многоугольников, возникающих в результате эволюции систем с N = 4, 6, 10, 12 вихрей. Сопоставление фазовых портретов, полученных для этих систем, позволяет продемонстрировать критериальный характер системы восьми вихрей, разделяющей системы с «малым» числом вихрей N = 4, 6 и системы с «большим» числом вихрей N = 10, 12. Детализация и обобщение результатов, полученных ранее в [16–19] для системы восьми вихрей, имеют целью описание качественного изменения устойчивости при переходе от «малых» систем к «большим».

1. Редуцированные уравнения движения

В работах [1, 2] обоснована редукция с уменьшением числа степеней свободы на две единицы, при этом используется явное представление координат вихрей в гамильтониане системы с последующим поиском новых обобщенных координат для динамической системы. В случае правильной полигональной конфигурации вихрей равной интенсивности для реализации этой процедуры редукции достаточно выбрать начало отсчета в центре симметрии многоугольника и перейти к полярному представлению координат вихрей (ρ_k , θ_k) в системе отсчета, вращающейся с угловой скоростью Ω_N : $z_k(t) = R\rho_k(t) \exp[i\theta_k(t) + i\Omega_N t + 2\pi ik/N]$.

Notice the set of the

Следующим шагом в редукции системы является искуственное уменьшение числа степеней свободы. В системах с числом вихрей N, представимых в виде произведения двух целых сомножителей $N = M \cdot K$, можно предположить, что выполнено представление:

$$z_n = R \exp(i\Omega_N t + 2\pi i n_k / N) \zeta_k; \quad n_k = Km + k;$$

$$m = 0, \dots M - 1; \quad k = 0, \dots K - 1.$$

Вихревой N - угольник в этом случае рассматривается как K отдельных правильных вихревых M - угольников, центры которых совпадают. Движение каждого из них в системе отсчета, вращающейся с угловой скоростью Ω_N , определяется зависимостью $\zeta_k(t)$. По-видимому, впервые такое представление для описания динамики системы точечных вихрей было предложено в [10]. Подстановка выражений для z_n через ζ_k в (1) приводит к уравнениям

$$\frac{d\zeta_k}{dt} = -i\Omega_N\zeta_k + \frac{i\Omega_M}{\overline{\zeta}_k} + \frac{i\Gamma}{2\pi R^2} \sum_{l=0, l\neq k}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-l} \left[\overline{\zeta}_k - \overline{\zeta}_l \exp\left(2\pi i \frac{k-n_l}{N}\right)\right]^{-1}, \ k = 0, \dots K-1.$$

Для модуля и аргумента в полярном представлении переменных $\zeta_k = \rho_k \exp(i\theta_k)$ выполнены уравнения:

$$\frac{d\rho_k}{dt} = -\frac{\Gamma}{2\pi R^2} \sum_{l=0, l \neq k}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\rho_l \sin \theta_{kl}}{\Delta_{kl}^2},$$
(2)

$$\frac{d\theta_k}{dt} = -\Omega_N + \frac{\Omega_M}{\rho_k^2} + \frac{\Gamma}{2\pi R^2} \sum_{l=0, l \neq k}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\rho_k - \rho_l \cos \theta_{kl}}{\rho_k \Delta_{kl}^2},$$
(3)

здесь $\Delta_{kl}^2 = \rho_k^2 + \rho_l^2 - 2\rho_k \rho_l \cos \vartheta_{kl}$, $\vartheta_{kl} = \theta_k - \theta_l + 2\pi \left(\frac{k-l}{N} - \frac{m}{M}\right)$.

Любое решение уравнений (2)–(3) удовлетворяет также уравнениям (1), при этом выбор разложения на множители M и K в уравнениях (2)–(3) предоставляет возможность формального рассмотрения систем с различным числом степеней свободы для описания движения N вихрей. Предельное упрощение описания, отличное от описания твердотельного вращения, достигается при K = 2, N = 2M. Предполагается, что координаты вихрей z_n определяются набором четырех параметров (ρ_0 , θ_0), (ρ_1 , θ_1): $z_{2m}(t) = R\rho_0(t) \exp\left[i\theta_0(t) + i\Omega_N t + 2\pi i m/M\right]$ для вихрей с четными номерами и $z_{2m+1}(t) = R\rho_1(t) \exp\left[i\theta_1(t) + i\Omega_N t + 2\pi i m/M + \pi i/M\right]$ для вихрей с нечетными номерами, здесь m = 0, ..., M - 1.

Сохранение объема фазового пространства в консервативной системе приводит к условию $\rho_0^2 + \rho_1^2 = 2$, следствием инвариантности системы к поворотам относительно центра $\rho = 0$ является необходимость замены фазовых угловых переменных θ_0 , θ_1 переменной, инвариантной к повороту. Такой угловой переменной является $\varphi = \theta_0 - \theta_1$. Таким образом, понижение порядка на две единицы в системе (ρ_0 , θ_0), (ρ_1 , θ_1) приводит к динамической системе на плоскости ζ . Амплитудой и угловой переменной решения являются ρ_0 и φ , соответственно. Величиной ρ_1 в формулировке уравнений движения далее обозначим главное значение квадратного корня $\rho_1 = \sqrt{2 - \rho_0^2}$. Для систем с N = 2, 4, 6, 8, 10, 12 редуцированную систему уравнений удается получить из уравнений (2), (3) с помощью алгебраических преобразований. Редуцированные уравнения описывают нелинейные колебания в соответствующих вихревых системах, при этом сами по себе уравнения колебаний образуют последовательность, в которой можно увидеть выполнение определенных формальных закономерностей.

2. Уравнения нелинейных колебаний в системах 2, 4, 6, 8, 10, 12 вихрей

Система двух вихрей приводит к тривиальному преобразованию уравнений (2), (3) при N = 2, K = 2, M = 1. В этом случае каждое из «колец вихрей» состоит из единственного вихря, единственным возможным движением в этой системе является твердотельное вращение. Система уравнений

$$\frac{d\rho_0}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi R^2} \frac{\rho_1 \sin\phi}{1 + \rho_0 \rho_1 \cos\phi},$$
(4)

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi R^2} \frac{\cos\varphi}{1 + \rho_0 \rho_1 \cos\varphi} \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} - \frac{\rho_0}{\rho_1}\right),\tag{5}$$

очевидно имеет решение $\rho_0 = \rho_1 = 1$, $\phi = 0$, соответствующее твердотельному вращению. Любое другое решение соответствует движению кольца со смещенным центром и измененным расстоянием между вихрями относительно тривиальной конфигурации. Решения являются нейтрально устойчивыми по отношению к тривиальному решению. Визуализация этого решения выглядит как нелинейные колебания.

Система четырех вихрей N = 4, K = 2, M = 2 описывается уравнениями:

$$\frac{d\rho_0}{dt} = -\frac{\Gamma}{\pi R^2 \rho_0} \frac{\sin(2\phi)}{\upsilon + \upsilon^{-1} - 2\cos(2\phi)},$$
(6)

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi R^2} \left(\frac{1}{\rho_0^2} - \frac{1}{\rho_1^2} \right) \frac{\upsilon + \upsilon^{-1} + 4 - 6\cos(2\phi)}{\upsilon + \upsilon^{-1} - 2\cos(2\phi)},\tag{7}$$

здесь $\upsilon = 1 - 2 / \rho_0^2$.

Система шести вихрей N = 6, K = 2, M = 3 описывается уравнениями:

$$\frac{d\rho_0}{dt} = \frac{3\Gamma}{4\pi R^2} \frac{\rho_0^2 \rho_1^3 \sin(3\varphi)}{4 - 3\rho_0^2 \rho_1^2 + \rho_0^3 \rho_1^3 \cos(3\varphi)},\tag{8}$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi R^2} \left(\frac{1}{\rho_0^2} - \frac{1}{\rho_1^2} \right) \frac{8 - 12\rho_0^2 \rho_1^2 + 5\rho_0^3 \rho_1^3 \sin(3\varphi)}{4 - 3\rho_0^2 \rho_1^2 + \rho_0^3 \rho_1^3 \cos(3\varphi)} \,. \tag{9}$$

Уравнения для системы восьми вихрей N = 8, K = 2, M = 4, полученные ранее в [16], имеют эквивалентную форму:

$$\frac{d\rho_0}{dt} = \frac{2\Gamma}{\pi R^2 \rho_0} \frac{\sin(4\phi)}{\upsilon^2 + \upsilon^{-2} + 2\cos(4\phi)},$$
(10)

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi R^2} \left(\frac{1}{\rho_0^2} - \frac{1}{\rho_1^2} \right) \frac{3(\upsilon^2 + \upsilon^{-2}) + 8(\upsilon + \upsilon^{-1} - 1) + 14\cos(4\varphi)}{\upsilon^2 + \upsilon^{-2} + 2\cos(4\varphi)}.$$
 (11)

Уравнения для системы десяти вихрей N = 10, K = 2, M = 5:

$$\frac{d\rho_0}{dt} = \frac{5\Gamma}{4\pi R^2} \frac{\rho_0^4 \rho_1^5 \sin(5\varphi)}{16 - 20\rho_0^2 \rho_1^2 + 5\rho_0^4 \rho_1^4 + \rho_0^5 \rho_1^5 \cos(5\varphi)},$$
(12)

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi R^2} \left(\frac{1}{\rho_0^2} - \frac{1}{\rho_1^2} \right) \frac{64 - 120\rho_0^2\rho_1^2 + 40\rho_0^4\rho_1^4 + 9\rho_0^5\rho_1^5\cos(5\varphi)}{16 - 20\rho_0^2\rho_1^2 + 5\rho_0^4\rho_1^4 + \rho_0^5\rho_1^5\cos(5\varphi)}.$$
 (13)

Система двенадцати вихрей N = 12, K = 2, M = 6 описывается уравнениями:

$$\frac{d\rho_0}{dt} = -\frac{3\Gamma}{\pi R^2 \rho_0} \frac{\sin(6\varphi)}{\upsilon^3 + \upsilon^{-3} - 2\cos(6\varphi)},$$
(14)

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Gamma}{4\pi R^2} \left(\frac{1}{\rho_0^2} - \frac{1}{\rho_1^2} \right) \frac{5(\upsilon^3 + \upsilon^{-3}) + 12(\upsilon^2 - \upsilon + 1 - \upsilon^{-1} + \upsilon^{-2}) - 22\cos(6\varphi)}{\upsilon^3 + \upsilon^{-3} - 2\cos(6\varphi)} .$$
(15)

3. Нелинейные колебания в вихревых системах

Решение уравнений (6)–(7), (8)–(9), (10)–(11), (12)–(13), (14)–(15) получено численным интегрированием метода Рунге–Кутта 4-го порядка. Ниже приводятся результаты численного решения этих уравнений, иллюстрирующие свойства соответствующих динамических систем.

Фазовый портрет, полученный для системы четырех вихрей, приведен на рис. 1. Фазовое пространство делится на области четырех типов. Области А об-



Рис. 1 – Фазовые кривые в системе четырех вихрей

Fig. 1 – Phase portrait of the four vortex system

разуются фазовыми кривыми, соответствующими устойчивым возмущениям решения Кельвина $\rho_0 = 1$, $\phi = 0$, $\phi = \pi$. В этом случае имеет место вращение вихревых колец относительно положения равновесия, в системе двух вихрей при N = 2, K = 2, M = 1 такие решения заполняют все фазовое пространство.

Области *А* граничат с областями *В* и *С*, соответствующими иным типам движений. Центры областей *В* $\rho_0 = 1$, $\varphi = \pm \pi/2$ являются неподвижными точками уравнений (6)–(7), правые части уравнений имеют в этих точках устранимые особенности.

Решения, соответствующие фазовым кривым из областей *В* и решения, фазовые кривые которых принадлежат областям *А*, на физической плоскости выглядят как колеба-

ния колец, образованных вихрями, относительно положения равновесия в центре области. В отдельные моменты времени вихри оказываются сгруппированными в пары, расстояние между вихрями в парах может быть существенно меньше размеров колец. Визуализация решений, принадлежащих области *B*, выглядит как движение взаимодействующих пар.

Областям *C* соответствуют решения, в которых кольца, образованные вихрями, не совершают обмена положениями. В этом случае одно кольцо образовано вихрями, сгруппированными в окрестности начала координат $\rho_0 \rightarrow 0$, а другое

образовано вихрями, оказавшимися на периферии $\rho_1 \rightarrow \sqrt{2}$. Визуализация такого решения выглядит как реализация «планетарного» движения периферийных вихрей, при этом группирование вихрей в окрестности начала координат может рассматриваться как приближение к состоянию коллапса в системе.

Границы, разделяющие области A, B, C, являются характеристиками уравнений (6), (7), соединяющими седловые точки, находящиеся

в углах области $A: \rho_0 = 1/\sqrt{3 \pm \sqrt{6}}, \ \phi = \pm \pi/2.$

Известно, что решение Кельвина устойчиво в вихревых системах с числом вихрей $N \le 7$. Сопоставление рис. 1 и рис. 2 позволяет видеть также, что в системах четырех и шести вихрей структуры фазовых пространств не имеют



Рис. 2 – Фазовые кривые в системе шести вихрей

Fig. 2 – Phase portrait of the six vortex system

качественных различий, кроме числа областей типа *A* и *B* на фазовой плоскости. Характеристики уравнений (8), (9), образующих границы областей *A*, *B*, *C* в системе шести вихрей, соединяют седловые точки: $\rho_0 = \sqrt{1 + \sqrt{3 + 2\sqrt{21}}/5}$, $\phi = \pi$, $\phi = \pm 2\pi/3$.

Качественное изменение свойств устойчивости правильной полигональной системы происходит при переходе к системе с числом вихрей N > 7. Фазовый портрет такой системы при N = 8, K = 2, M = 4 представлен на рис. 3. Изменение устойчивости решения Кельвина в системах восьми вихрей по сравнению с

устойчивыми системами N = 4, 6 имеет топологический характер и обусловлено изменением типа неподвижных точек $\rho_0 = 1$, $\phi = 0$, $\phi = \pm \pi/2$, $\phi = \pi$, которые в системе восьми вихрей становятся седловыми точками. Появление седловых точек приводит к образованию секторов A_1 и A_2 с центрами в точках $\rho_0 = \sqrt{6}/\sqrt{7 \pm \sqrt{7}}$, $\phi = 0$, $\phi = \pm \pi/2$, $\phi = \pi$. Седловые точки и центры секторов A_1 и A_2 принадлежат кривым $\rho_{\pm}(\phi)$ на которых выполнены условия $\frac{d\phi}{dt} = 0$. Уравнение (11) позволяет найти зависимости $\rho_{\pm}(\phi)$ в явном виде:



Puc. 3 – Фазовые кривые в системе восьми вихрей Fig. 3 – Phase portrait of the eight vortex system

$$\rho_{\pm} = \sqrt{\frac{6\sqrt{2}}{\sqrt{5\sqrt{2}+\psi}\left(\sqrt{5\sqrt{2}+\psi}\pm\sqrt{\psi-\sqrt{2}}\right)}}$$

здесь $\psi = \sqrt{29 - 21\cos(4\phi)}$.

Границы секторов A_1 и A_2 образуют внутреннюю границу области A, являющуюся траекторией уравнений (10)–(11) и проходящей через точку перегиба на кривых $\rho_{\pm}(\phi)$. Приближенное значение $\phi = 31\pi/736$ принималось в расчетах для нахождения границ секторов A_1 и A_2 по положению точки перегиба. Внешняя граница области A на рис. 3 образована характеристиками уравнений (10)–(11), соединяющими седловые точки: $\rho_0 = \sqrt{3}/\sqrt{5\pm\sqrt{10}}$, $\phi = \pm \pi/4$, $\phi = \pm 3\pi/4$. Появление седловой точки в положении $\rho_0 = 1$, $\phi = 0$, $\phi = \pm \pi/2$, $\phi = \pi$ соответствует переходу к состоянию неустойчивости твердотельного вращения в системе восьми вихрей. С неустойчивыми решениями соседствуют устойчивые, фазовые кривые которых заполняют области A. Области фазовой плоскости, соответствующие неустойчивыми решениям, имеют общую предельную точку – седловую точку $\rho_0 = 1$, $\phi = 0$, $\phi = \pm \pi/2$, $\phi = \pi$.

При рассмотрении фазового портрета системы десяти вихрей (рис. 4) обнаруживается распад области A на секторы A_1 и A_2 . Центры областей A_1 и A_2 опре-

деляются условиями $\phi = 0$, $\phi = \pm 2\pi/5$, $\phi = \pm 4\pi/5$, $\frac{d\phi}{dt} = 0$. Из уравнения (13) для нахождения положения центров следует алгебраическое уравнение: $9x^3 + 22x^2 - 8x - 16 = 0$, в котором предполагается $x = \rho_0 \rho_1$. Решения $\rho_0^{A_1} \approx 0,72137257421925$, $\rho_0^{A_2} \approx 1,216396979503776$ определяют положения центров областей A₁ и A₂ соответственно. Границы областей A₁ и A₂ являются характеристиками уравнений (12)-(13), проходящими через седловые точки, заданные условиями: $\phi = \pi$, $\phi = \pm \pi/5$, $\phi = \pm 3\pi/5$, $\frac{d\phi}{dt} = 0$. Положение седловых то-

чек определятся алгебраическим уравнением $9x^3 - 22x^2 - 8x + 16 = 0$.

Решения $\rho_0^{S_1} = 0,63768408311479$, $\rho_0^{S_2} = 1,26228323699422$ определяют положения седловых точек, через которые проходят границы областей A1 и A2. Секторы A1 и A2 отделены от областей В и С фазовыми кривыми, соответствующими режиму движения без обмена положениями колец.

Фазовое пространство в системе двенадцати вихрей (рис. 5) имеет структуру, похожую на структуру фазового пространства в системе десяти вихрей. Выражения $\rho_0 = 2\sqrt{5}/\sqrt{27 \pm 3\sqrt{21}}$, $\phi = 0$, $\phi = \pm \pi/3$, $\phi = \pm 2\pi/3$, $\phi = \pi$ задают положение центров областей A₁ и A₂ соответственно.



Рис. 4 – Фазовые кривые в системе десяти вихрей Fig. 4 – Phase portrait of the ten vortex system



Рис. 5 – Фазовые кривые в системе двенадцати вихрей Fig. 5 - Phase portrait of the twelve vortex system

Выражения $\rho_0 = 2\sqrt{10} / \sqrt{37 + \sqrt{489} \pm \sqrt{2} \sqrt{189 + 17 \sqrt{489}}}$, $\phi = \pm \pi / 6$, $\phi = \pm \pi / 2$,

 $\phi = \pm 5\pi/6$ определяют седловые точки в углах областей A_1 и A_2 .

Область фазового пространства, отвечающая движению колец вихрей без обмена положениями, в системе двенадцати вихрей становится более выраженной по сравнению с системой десяти вихрей.

Заключение

Представленные решения свидетельствуют о существовании неисследованных возможностей в изучении поведения вихревых систем. Представляет интерес получение сокращенного описания вихревых систем в других ситуациях: могут быть рассмотрены конфигурации, отличные от полигональных, несингулярные носители завихренности, модели возникновения и коллапса вихрей. Ключевым моментом является возможность моделирования процессов уравнениями с фазовым пространством малой размерности. Представляется возможным также исследование устойчивости решений уравнений (2), (3) по отношению к возмущениям общего вида уравнений (1). Графическое сходство фазовых портретов динамики вихревых систем, в частности полученных в настоящей работе, с известными изображениями линий тока сдвиговых течений в гидродинамическом описании представляется не случайным. По мнению автора, представленные результаты могут служить основанием для поиска аналогий между рассматриваемой упрощенной задачей динамики вихрей и задачами гидродинамической устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Борисов А.В., Килин А.А., Мамаев И.С. Редукция и хаотическое поведение точечных вихрей на плоскости и сфере // Нелинейная динамика. 2005. Т. 1, № 2. С. 233–246.
- 2. Борисов А.В., Мамаев И.С. Динамика двух вихревых колец на сфере // Нелинейная динамика. 2006. Т. 2, № 2. С. 181–192.
- Веретенцев А.Н., Рудяк В.Я., Яненко Н.Н. О построении дискретных вихревых моделей течений идеальных несжимаемых жидкостей // ЖВММФ. – 1986. – Т. 26, № 1. – С. 103–113.
- 4. Рудяк В.Я., Савченко С.О. О развитии неустойчивости в кольцевых сдвиговых слоях // Доклады АН ВШ РФ. – 2002. – № 2 (6). – С. 42–51.
- 5. Kelvin W.T. Floating magnets (illustrating vortex systems) // Mathematical and Physical Papers. Cambridge: Cambridge University Press, 1910. Vol. 4. P. 135–140.
- 6. Thompson J.J. A treatise on the motion of vortex rings. London: Macmillan, 1883. P. 94.
- Havelock T.H. The stability of motion of rectilinear vortices in ring formation // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1931. Vol. 11, N 70. P. 617–633. doi: 10.1080/14786443109461714.
- Куракин Л.Г., Юдович В.И. О нелинейной устойчивости стационарного вращения правильного вихревого многоугольника // Доклады Академии наук. – 2002. – Т. 384, № 4. – С. 476–482.
- 9. **Куракин Л.Г.** Об устойчивости томсоновского вихревого пятиугольника внутри круга // Нелинейная динамика. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 465–488.
- Lewis D., Ratiu T. Rotating n-gon/kn-gon vortex configurations // Journal of Nonlinear Science. – 1996. – Vol. 6. – P. 385–414. – doi: 10.1007/BF02440160.
- Борд Е.Г., Кранчев Д.Ф. Устойчивость полигональной системы гауссовских вихрей // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике: тезисы докладов. – Новосибирск, 2005. – С. 110–111.
- 12. Борд Е.Г., Кранчев Д.Ф. Линейная устойчивость системы гауссовских вихрей // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2005. – Т. 8, № 3. – С. 8–17.
- Rudyak V.Ya., Bord E.G., Kranchev D.F. Stohastic properties of a system of point vortices // Technical Physics Letters. 2004. Vol. 30, N 3. P. 225–227. doi: 10.1134/1.1707175.
- 14. Рудяк В.Я., Борд Е.Г., Кранчев Д.Ф. Динамический хаос в полигональной системе точечных вихрей // Доклады АН ВШ РФ. 2004. № 2. С. 48–57.

- Рудяк В.Я., Борд Е.Г., Кранчев Д.Ф. Устойчивость некоторых дискретных вихревых систем // Потоки и структуры в жидкостях: тезисы докладов. – М., 2005. – С. 268–269.
- Борд Е.Г. О нелинейных возмущениях правильной полигональной системы вихрей // Нелинейная динамика. – 2006. – Т. 2, № 3. – С. 53–360. – doi: 10.20537/nd0603008.
- 17. Борд Е.Г. Нелинейные возмущения правильной полигональной вихревой системы // Современные проблемы теоретической и прикладной механики: тезисы докладов Всероссийского семинара по теоретической и прикладной механике, Новосибирск, 10–12 апреля 2007 г. – Новосибирск, 2007. – С. 27.
- Борд Е.Г., Кранчев Д.Ф. Устойчивость и динамический хаос в дискретных вихревых системах // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: тезисы докладов. – Н. Новгород, 2006. – Т. 2. – С. 36–37.
- Bord E.G. Nonlinear disturbances of vortex octagon [Electronic resource] // IV International Symposium on Bifurcation and Instabilities in Fluid Dynamics, Barcelona, Spain, 18–21 July 2011. – URL: http://congress.cimne.com/bifd2011/Admin/Files/FileAbstract/a4.pdf (accessed: 07.04.2017).

NONLINEAR OSCILLATIONS IN TWO REGULAR CLOSED VORTEX POLYGON SYSTEM

Bord E.G.

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia

Regular behavior of disturbances of vortex polygon rigid body rotation known as the Kelvin solution is modeled. A reduction procedure applied to equations of the dynamics of the vortex system is used to derive a solution which is a generalization of the Kelvin solution. A reduced system includes the Kelvin solution as a partial case. As a result of the reduction second-order equations describing particular solutions of dynamic equations of systems of two, four, six, eight, ten, twelve vortices are obtained. Numerical solutions of these equations are obtained. The structure of phase space solutions is described. Phase portraits of the solutions illustrate the change in stability of systems depending on the number of vortices. The stability property known for systems with a small number of vortices (less than eight), manifests itself in the fact that a fixed point corresponding to the Kelvin solution, is an interior point of the region formed by closed phase curves. When considering unstable systems with eight, ten and twelve vortices the bifurcation of neutral oscillation areas is observed. In this case the Kelvin solution is a limiting one for solutions belonging to different areas of the phase space. The phase portraits of systems of eight, ten and twelve vortices are typical, which suggests the existence of a universal mechanism of a chaotic behavior in these systems.

Keywords: stability, nonlinear oscillations, point vortices, Kelvin solution. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-7-18

REFERENCES

- Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S. Reduktsiya i khaoticheskoe povedenie tochechnykh vikhrei na ploskosti i sfere [Reduction and chaotic behavior of point vortices on a plane and a sphere]. *Nelineinaya dinamika – Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 233–246.
- Borisov A.V., Mamaev I.S. Dinamika dvukh vikhrevykh kolets na sfere [Dynamics of two vortex rings on a sphere]. *Nelineinaya dinamika – Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2006, vol. 2, no. 2, pp. 181–192.
- Veretentsev A.N., Rudyak V.Ya., Yanenko N.N. O postroenii diskretnykh vikhrevykh modelei techenii ideal'nykh neszhimaemykh zhidkostei [On the discrete vortex modeling of the ideal inviscid fluid flow]. Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki – Com-

putational Mathematics and Mathematical Physics, 1986, vol. 26, no. 1, pp. 103–113. (In Russian)

- Rudyak V.Ya., Savchenko S.O. O razvitii neustoichivosti v kol'tsevykh sdvigovykh sloyakh [On instability growth in circular shear layer]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2002, no. 2 (6), pp. 42–51.
- Kelvin W.T. Floating magnets (illustrating vortex systems). Mathematical and Physical Papers. Cambridge, Cambridge University Press, 1910, vol. 4, pp. 135–140.
- 6. Thompson J.J. A treatise on the motion of vortex rings. London, Macmillan, 1883, p. 94.
- 7. Havelock T.H. The stability of motion of rectilinear vortices in ring formation. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1931, vol. 11, no. 70, pp. 617–633. doi: 10.1080/14786443109461714.
- Kurakin L.G., Yudovich V.I. O nelineinoi ustoichivosti statsionarnogo vrashcheniya pravil'nogo vikhrevogo mnogougol'nika [On nonlinear stability of steady rotation of a regular vortex polygon]. *Doklady Akademii nauk – Doklady Physics*, 2002, vol. 384, no. 4, pp. 476– 482. (In Russian)
- Kurakin L.G. Ob ustoichivosti tomsonovskogo vikhrevogo pyatiugol'nika vnutri kruga [On the stability of Thomson's vortex pentagon inside a circular domain]. *Nelineinaya dinamika – Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 465–488.
- Lewis D., Ratiu T. Rotating n-gon/kn-gon vortex configurations. *Journal of Nonlinear Science*, 1996, vol. 6, pp. 385–414. doi: 10.1007/BF02440160.
- 11. Bord E.G., Kranchev D.F. [Stability of the polygonal system of Gaussian vortices]. *La-vrent'evskie chteniya po matematike, mekhanike i fizike*: tezisy dokladov [Lavrentyev readings on mathematics, mechanics and physics: abstracts]. Novosibirsk, 2005, pp. 110–111.
- Bord E.G., Kranchev D.F. Lineinaya ustoichivost' sistemy gaussovskikh vikhrei [Linear stability of a system of Gauss vortices]. Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki – Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2005, vol. 8, no. 3, pp. 8–17. (In Russian)
- 13. Rudyak V.Ya., Bord E.G., Kranchev D.F. Stohastic properties of a system of point vortices. *Technical Physics Letters*, 2004, vol. 30, no. 3, pp. 225–227. doi: 10.1134/1.1707175.
- Rudyak V.Ya., Bord E.G., Kranchev D.F. Dinamicheskii khaos v poligonal'noi sisteme tochechnykh vikhrei [Dynamical chaos in polygonal vortex system]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2004, no. 2, pp. 48–57.
- Rudyak V.Ya., Bord E.G., Kranchev D.F. [Stability of some discrete vortex systems]. *Potoki i struktury v zhidkostyakh: tezisy dokladov* [International Conference "Fluxes and structures in fluids": abstracts]. Moscow, 2005, pp. 268–269. (In Russian)
- Bord E.G. O nelineinykh vozmushcheniyakh pravil'noi poligonal'noi sistemy vikhrei [On the nonlinear disturbances of vortex polygon]. *Nelineinaya dinamika – Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 353–360. doi: 10.20537/nd0603008.
- Bord E.G. [Nonlinear perturbations of a regular polygonal vortex system]. Sovremennye problemy teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki: tezisy dokladov Vserossiiskogo seminara po teoreticheskoi i prikladnoi mekhanike [Modern problems of theoretical and applied mechanics: procedeengs of the All-Russian seminar on theoretical and applied mechanics], Novosibirsk, 10–12 April 2007, p. 27. (In Russian)
- Bord E.G., Kranchev D.F. [Stability and dynamic chaos in discrete vortex systems]. *IX Vse-rossiiskii s"ezd po teoreticheskoi i prikladnoi mekhanike: tezisy dokladov* [Proceedings of the 9th All-Russian congress on theoretical and applied mechanics]. Nizhnii Novgorod, 2006, vol. 2, pp. 36–37. (In Russian)
- Bord E.G. Nonlinear disturbances of vortex octagon. *IV International Symposium on Bifurcation and Instabilities in Fluid Dynamics*, Barcelona, Spain, 18–21 July 2011. Available at: http://congress.cimne.com/bifd2011/Admin/Files/FileAbstract/a4.pdf (accessed 07.04.2017).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Борд Евгений Григорьевич – родился в 1962 году, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра теоретической механики, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). Область научных интересов: гидродинамическая устойчивость течений неньютоновских жидкостей, динамика вихревых систем. Опубликовано 39 научных работ. (Адрес: 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113. E-mail: ngasu2005@ngs.ru).

Bord Evgeny Grigorievich (b. 1962) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), Associate professor of the Theoretical mechanics Department at the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. His research interests are currently focused on hydrodynamic stability of the nonnewtonian fluids flow, vortex dynamics. He is author of 39 scientific papers. (Address: 113, Lenigradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russia. E-mail: ngasu2005@ngs.ru).

Статья поступила 12 февраля 2017 г. Received February 12, 2017

To Reference:

Bord E.G. Nelineinye kolebaniya v sisteme dvukh pravil"nykh vikhrevykh mnogougol'nikov [Nonlinear oscillations in two regular closed vortex polygon system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 7–18. doi: 10.17212/1727-2769-2017-17-18

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2017

январь–март

№ 1 (34)

= ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ =

УДК 538.955

ВЛИЯНИЕ РАЗРЫВОВ ЦЕПОЧКИ НА ТЕПЛОЕМКОСТЬ ХАЛДЕЙНОВСКОЙ СИСТЕМЫ

Е.А. Попова, А.В. Никифоров

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

В соединениях, содержащих цепочки магнитных ионов со спином S = 1 (халдейновские цепочки), реализуется неупорядоченное основное состояние со щелью в спектре магнитных возбуждений. В модели VBS каждый спин S = 1 можно представить в виде двух псевдочастиц со спином S = 1/2, связанных антиферромагнитным взаимодействием с псевдочастицей соседнего иона. Немагнитные примеси внутри цепочки могут привести к образованию сегментов цепочек, на концах которых возникают нескомпенсированные спины S = 1/2.

В настоящей работе было исследовано влияние взаимодействия спинов S = 1/2, возникающих на концах сегментов халдейновской цепочки, на температурную зависимость теплоемкости C(T). Взаимодействие спинов S = 1/2 ведет к расщеплению четырехкратно вырожденного основного состояния сегмента цепочки на синглетное и триплетное состояние, разделенных щелью Δ_1 . Перераспределение электронов с температурой по расщепленным подуровням основного состояния сегмента цепочки приводит к появлению аномалии Шоттки на зависимости C(T). Используя энергетический спектр сегмента цепочки, полученный при учете одноионной анизотропии Δ_2 , мы получили выражения для теплоемкости. Анализ показал, что в отсутствие внешнего магнитного поля, когда один из параметров Δ_1 или Δ_2 фиксирован, максимум теплоемкости смещается в сторону более высоких температур при увеличении другого параметра. Для синглетного основного состояния максимум теплоемкости смещается в сторону более высоких температур с увеличением величины приложенного магнитного поля. Если основное состояние – триплет, то в полях H < 3Tмаксимум смещается в сторону низких температур, а в полях H > 7T – в сторону более высоких температур. В промежуточной области полей зависимость C(T) имеет более сложный характер. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными для соединений Gd_2BaNiO_5 и ($Y_{1-x}Nd_x$)₂BaNiO₅, опубликованными ранее.

Ключевые слова: халдейновские цепочки, разрывы цепочек, никелаты. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-19-30

Введение

В соединениях, в структуре которых содержатся цепочки магнитных ионов со спином S = 1 (халдейновские цепочки), реализуется неупорядоченное основное состояние со щелью в спектре магнитных возбуждений [1]. Основное состояние таких систем представляет собой устойчивую простую валентную связь (VBS). Локальное нарушение однородности цепочки при малом замещении магнитных

Статья подготовлена в результате проведения исследования (НУГ №16-05-0029 «Физика низкоразмерных квантовых систем») в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2016 г. и с использованием средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.

ионов немагнитными примесями приводит к появлению сегментов цепочек конечной длины, на концах которых возникают нескомпенсированные спины S = 1/2. Наличие спинов S = 1/2 на концах сегментов подтверждается данными ЭПР исследований в PbNi₂V₂O₈ [2], в органическом соединении NENP [3] и в Y₂BaNiO₅ при частичной замене ионов Ni²⁺ на немагнитные примеси Zn²⁺ и Mg²⁺ [4–6].

Соединение Y₂BaNiO₅ семейства квазиодномерных никелатов R₂BaNiO₅ (R редкоземельный ион или ион иттрия) является примером типичной халдейновской системой со щелью в спектре магнитных возбуждений $\Delta = 108$ К [7]. Кристаллическая структура R₂BaNiO₅ содержит цепочки ионов Ni²⁺ (S = 1). Цепочки вытянуты вдоль оси *a* и разделены в плоскости *bc* ионами R³⁺ и Ba²⁺. Немагнитные примеси Zn²⁺ и Mg²⁺, замещающие никель в Y₂BaNiO₅, дают прямые разрывы цепочек. ЭПР [4, 5] и ЯМР [6] исследования показали, что на концах сегментов цепочек возникают нескомпенсированные спины S = 1/2. Примесь Ca²⁺, занимающая позицию Y³⁺, приводит к образованию дырок внутри цепочки и новых магнитных состояний внутри халдейновской щели [8, 9]. Полная или частичная замена ионов Y³⁺ на редкоземельный магнитный ион приводит к антиферромагнитному упорядочению при T_N. Как показали нейтронографические исследования [10-12], щель в спектре магнитных возбуждений Ni цепочки спинов S = 1 остается даже в упорядоченном состоянии. В соединениях Gd₂BaNiO₅ [13] и $(Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ [14] составов x = 1, 0.75, 0.50, 0.25 на температурных зависимостях магнитной восприимчивости и теплоемкости обнаружены аномалии, которые не связаны с вкладом редкоземельной подсистемы. Аналогичные аномалии на теплоемкости были обнаружены в присутствии внешнего магнитного поля в номинально чистом Y₂BaNiO₅, в Ca²⁺ и Zn- или Mg-допированном халдейновском соединении.

В настоящей работе покажем, что взаимодействие спинов S = 1/2, возникающих на концах сегментов халдейновской цепочки, приводит к аномалии Шоттки на температурной зависимости теплоемкости. Положение максимума аномалии Шоттки зависит от параметров взаимодействия спинов S = 1/2 и от величины и направления приложенного магнитного поля. В работе сопоставлены результаты расчетов с экспериментальными данными для соединений Gd₂BaNiO₅ [13] и (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅ [14], опубликованными ранее.

1. Взаимодействие спинов S = 1/2, возникающих на концах сегментов магнитной цепочки со спином S = 1

Согласно модели VBS каждый спин S = 1 в антиферромагнитной гейзенберговской цепочке можно представить в виде двух псевдочастиц со спином S = 1/2, связанных антиферромагнитным взаимодействием с псевдочастицей соседнего иона. При разрыве цепочки на концах сегмента появляются нескомпенсированные спины S = 1/2. Нижний энергетический уровень сегмента цепочки четырехкратно вырожден [15]. Спины S = 1/2, возникающие на концах фрагмента цепочки, могут взаимодействовать друг с другом. В рамках указанной модели гамильтониан системы двух взаимодействующих спинов S = 1/2 имеет вид

$$\hat{\mathbf{H}} = J_{eff} \left(S_1 S_2 \right) + D S_z^2 - g \mu_B S H ,$$

где J_{eff} – параметр эффективного обменного взаимодействия спинов $S_1 = S_2 = 1/2$, возникающих на концах фрагментов цепочки; D – параметр одноионной анизотропии. Последнее слагаемое – зеемановская энергия во внешнем магнитном поле H.

Взаимодействие нескомпенсированных спинов S = 1/2 ведет к расщеплению четырехкратно вырожденного уровня на синглетное и триплетное состояние, разделенных энергетической щелью $\Delta_1 = J_{eff}$, причем, какое состояние (синглет или триплет) является основным, зависит от того, четное или нечетное число магнитных ионов содержит сегмент цепочки. Величина указанного расщепления может зависеть, в частности, от длины сегмента цепочки [5]. Расщепление триплета Δ_2 на два подуровня для состояний с проекцией спина $S_z = 0$ и $S_z = \pm 1$ обусловлено анизотропией магнитного иона внутри цепочки. Энергетический спектр и соответствующие волновые функции определяются направлением внешнего поля по отношению к осям *x*, *y*, *z*. Если поле направлено вдоль оси *z* (*H* || *z*), то принимая для сиглетного основного состояния энергию нижнего уровня за ноль, получим:

$$E_{1} = 0, \ \psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\{\uparrow\downarrow\} - \{\downarrow\uparrow\} \right), \ S_{z} = 0;$$

$$E_{2} = \Delta_{1}, \ \psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\{\uparrow\downarrow\} + \{\downarrow\uparrow\} \right), \ S_{z} = 0;$$

$$E_{3} = \Delta_{1} + \Delta_{2} - g\mu_{B}H, \ \psi = \{\uparrow\uparrow\}, \ S_{z} = +1;$$

$$E_{4} = \Delta_{1} + \Delta_{2} + g\mu_{B}H, \ \psi = \{\downarrow\downarrow\}, \ S_{z} = -1.$$

Если поле направлено перпендикулярно оси z ($H \parallel x, y$), то

$$\begin{split} E_1 &= 0, \ \psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\{\uparrow\downarrow\} - \{\downarrow\uparrow\} \right), \ S_z &= 0 \ ; \\ E_2 &= \Delta_1 + \Delta_2, \ \psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\{\uparrow\uparrow\} - \{\downarrow\downarrow\} \right), \ S_x &= 0; \\ E_{3,4} &= \Delta_1 + \frac{\Delta_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta_2}{2}\right)^2 + g^2 \mu_{\rm B}^2 H^2} \, . \end{split}$$

В состояниях с E_3 и E_4 смешиваются состояния ({ $\uparrow\uparrow$ } + { $\downarrow\downarrow$ }) и $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ({ $\uparrow\downarrow$ } + { $\downarrow\uparrow$ }),

причем коэффициенты, определяющие вероятность каждого из этих состояний, зависят от величины приложенного магнитного поля. Этот факт может повлиять на ход температурной зависимости магнитной восприимчивости, но не влияет на теплоемкость. Отметим, что порядок уровней изменяется, если основным состоянием сегмента цепочки является триплет, что соответствует одновременной замене знаков Δ_1 и Δ_2 на противоположный.

2. Теплоемкость системы сегментов цепочки S = 1

Температурная зависимость теплоемкости, имеющая вид аномалии Шоттки, определяется перераспределением электронов по расщепленным подуровням основного состояния сегмента цепочки. Теплоемкость определяется выражением

 $C = nR \frac{\partial}{\partial T} \left(T^2 \frac{\partial (\ln Z)}{\partial T} \right)$ [16], где R – газовая постоянная; n – концентрация взаи-

модействующих пар спинов S = 1/2; Z – статистический вес состояния. Для случая, когда внешнее поле направлено вдоль оси z ($H \parallel z$):

$$Z = 1 + e^{-x_1} + e^{-(x_1 + x_2 - x_3)} + e^{-(x_1 + x_2 + x_3)}.$$

Если $H \parallel x, y$, то

$$Z = 1 + e^{-(x_1 + x_2)} + e^{-(x_1 + x_2/2 - x_4)} + e^{-(x_1 + x_2/2 + x_4)}$$

где

$$x_1 = \frac{\Delta_1}{kT}, \ x_2 = \frac{\Delta_2}{kT}, \ x_3 = \frac{g\mu_B H}{kT}, \ x_4 = \sqrt{\left(\frac{x_2}{2}\right)^2 + x_3^2}.$$

Здесь *k* – постоянная Больцмана.

В отсутствие внешнего магнитного поля выражение для теплоемкости имеет вид

$$C_{H=0} = nR \frac{2(x_1 + x_2)^2 e^{(x_1 - x_2)} + 2x_2^2 e^{-x_2} + x_1^2 e^{x_1}}{(1 + 2e^{-x_2} + e^{x_1})^2}.$$
 (1)

Если основным состоянием системы сегментов цепочки является синглет, то параметры Δ_1 и Δ_2 принимают положительное значение; если основное состояние – триплет, то значения указанных параметров отрицательны. На рис. 1 представлены температурные зависимости теплоемкости, рассчитанные по формуле (1), при различных значениях параметров Δ_1 и Δ_2 .

Если система находится в синглетном основном состоянии, то при фиксированном Δ_1 (рис. 1, *a*) максимум теплоемкости смещается в сторону более высоких температур при увеличении Δ_2 . При значениях $\Delta_2 > 10$ К на температурной зависимости теплоемкости появляется два максимума, один из которых не смещается при дальнейшем увеличении параметра Δ_2 . Если значение параметра Δ_2 фиксировано (рис. 1, *b*), то максимум теплоемкости смещается в сторону более высоких температур при увеличении Δ_1 . Отметим, что аналогичные тенденции наблюдаются при замене Δ_1 на $-\Delta_2$ и Δ_2 на $-\Delta_1$ (рис. 1, *c* и *d*). Однако при такой замене зависимости на рис. 1, *a* и *d* не полностью идентичны, поскольку выражение (1) не симметрично по Δ_1 и Δ_2 .

Если внешнее магнитное поле направлено вдоль оси *z*, то выражение для теплоемкости имеет вид

$$C_{H||z} = nR \frac{(x_1 + x_2 + x_3)^2 e^{-(x_1 + x_2 + x_3)} + (x_1 + x_2 - x_3)^2 e^{-(x_1 + x_2 - x_3)}}{(1 + e^{-x_1} + e^{-(x_1 + x_2 + x_3)} + e^{-(x_1 + x_2 - x_3)})^2} + \frac{x_1^2 e^{-x_1} + e^{-(2x_1 + x_2)} (x_2 + x_3)^2 e^{-x_3} + (x_2 - x_3)^2 e^{x_3} + 4x_3^2 e^{-x_2}}{(1 + e^{-x_1} + e^{-(x_1 + x_2 + x_3)} + e^{-(x_1 + x_2 - x_3)})^2}.$$
(2)



Рис. 1 – Температурные зависимости теплоемкости, рассчитанные по формуле (1), при различных значениях параметров Δ_1 и Δ_2 для двух случаев:

(*a*) и (*b*) – синглетное основное состояние системы сегментов цепочки S = 1; (*c*) и (*d*) – триплетное основное состояние; (*a*) и (*c*) – фиксировано Δ_1 ; (*b*) и (*d*) – фиксировано Δ_2 .

Fig. 1 – Temperature dependences of the heat capacity calculated using the formula (1) for several values of the parameters $\Delta_1 \mu \Delta_2$ in two cases:

(a) and (b) – singlet ground state of the chain segments of the S = 1 system; (c) and (d) – triplet ground state; (a) and (c) – Δ_1 is fixed; (b) and (d) – Δ_2 is fixed.

Для случая $H \parallel x, y$

$$C_{H||x,y} = nR \frac{\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} - x_{4}\right)^{2} e^{-\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} - x_{4}\right)} + \left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} + x_{4}\right)^{2} e^{-\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} + x_{4}\right)} + \left(\frac{x_{1} + \frac{x_{2}}{2} - x_{4}\right) + e^{-\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} + x_{4}\right)}\right)^{2}}{\left(1 + e^{-x_{1}} + e^{-\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} - x_{4}\right)} + e^{-\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} + x_{4}\right)}\right)^{2}} + \frac{\left(\frac{x_{2}}{2} + x_{4}\right)^{2} e^{-\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} - x_{4}\right)} + e^{-\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} + x_{4}\right)}\right)^{2}}{\left(1 + e^{-x_{1}} + e^{-\left(x_{1} + \frac{x_{2}}{2} - x_{4}\right)} + \left(\frac{x_{2}}{2} - x_{4}\right)^{2} e^{-\left(2x_{1} + \frac{3}{2}x_{2} + x_{4}\right)}}\right)^{2}}.$$
(3)

На рис. 2 представлены температурные зависимости теплоемкости в магнитном поле, рассчитанные для $H \parallel z$, и $H \parallel x, y$ по формулам (2) и (3), для двух случаев, когда основное состояние – синглет и когда основное состояние – триплет. Из рисунка видно, что если основным состоянием сегментов цепочки является синглет (рис. 2, *a* и *b*), то при фиксированном значении параметров $\Delta_1 = 5$ К и $\Delta_2 = 3$ К максимум теплоемкости смещается в сторону более высоких температур с увеличением магнитного поля. Если основное состояние сегмента цепочки – триплет (рис. 2, *c* и *d*), то в полях H < 3T максимум аномалии Шоттки смещается в сторону низких температур, а в полях H > 7T максимум смещается в сторону более высоких температур. В промежуточной области полей температурная зависимости теплоемкости имеет более сложный характер, который зависит от ориентации магнитного поля.



Рис. 2 – Температурные зависимости теплоемкости, рассчитанные по формулам (2) и (3), при фиксированных значениях параметров Δ_1 и Δ_2 в поле $H \parallel z$ и $H \parallel x, y$: (*a*) и (*b*) – синглетное основное состояние системы сегментов цепочки S = 1; (*c*) и (*d*) – триплетное основное состояние

Fig. 2. – Temperature dependences of the heat capacity calculated by using the formulas (2) and (3) for fixed values of the parameters Δ_1 and Δ_2 in the magnetic field $H \parallel z$ and $H \parallel x, y$:

(a) and (b) – singlet ground state of the chain segments of the S = 1 system; (c) and (d) – triplet ground state

3. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными

Мы сопоставили результаты наших расчетов теплоемкости с экспериментальными данными, опубликованными ранее, для соединений Gd₂BaNiO₅ [13] и (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅ [14], являющихся квазиодномерными халдейновскими магнетиками.

В соединениях Gd₂BaNiO₅ и (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅ разрывы цепочек могут возникать, например, из-за наличия неконтролируемых немагнитных примесей внутри цепочки. Другим источником несовершенства цепочки может служить небольшая нестехиометрия по кислороду в указанных соединениях, что может привести, так же как в Ca-допированном Y₂BaNiO₅, к образованию дырки на O 2*p* орбитали вдоль цепочки никеля.

На рис. 3 представлены зависимости теплоемкости $(Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ и Gd_2BaNiO_5 , полученные вычитанием из экспериментальной зависимости решеточного вклада и вклада, обусловленного редкоземельной подсистемой. Экспериментальные зависимости теплоемкости для Gd_2BaNiO_5 [13] и $(Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ [14] были взяты из опубликованных ранее статей. На всех полученных зависимостях при T < 10 К наблюдается аномалия Шоттки, причем величина аномалии практически не зависит от концентрации ионов неодима в соединениях $(Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$. Можно предположить, что аномалия обусловлена вкладом никелевой подсистемы и связана с наличием системы сегментов цепочек S = 1.

На рис. 3 сплошной линией представлена температурная зависимость теплоемкости, рассчитанная по формуле (1). Мы учли, что система может содержать как сегменты цепочек с четным числом ионов Ni²⁺, так и сегменты с нечетным числом магнитных ионов. В первом случае основным состоянием системы является синглет, во втором случае – триплет. Наилучшее согласие с экспериментальными данными достигается, если принять, что параметр Δ_2 не зависит от температуры, а изменение параметра Δ_1 с температурой имеет вид $\Delta_1 = \Delta_{01} - A\sqrt{T} \exp(-\Delta_{01}/T)$. Оценки показали, что эти параметры отличаются для сегментов, находящихся в синглетном и триплетном состояниях.

Для (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅ параметры практически не зависят от концентрации ионов неодима в соединении и имеют следующие значения: для синглетного состояния $\Delta_{01} \approx 15$ K, $A \approx 18$ K^{1/2}, $\Delta_2 \approx 5$ K; для триплетного состояния $\Delta_{01}\approx 4\,{\rm K}$, $~A\approx 3~{\rm K}^{1/2}\,,~\Delta_2\approx 4\,{\rm K}$. C данными параметрами расчетная кривая хорошо описывает экспериментальные зависимости теплоемкости с общей концентрацией пар спинов S = 1/2 $n \approx 0.03$, находящихся в синглетном и триплетном основном состоянии. Для Gd₂BaNiO₅ параметры для синглетного состояния имеют следующие значения: $\Delta_{01} \approx 8 \,\mathrm{K}$, $A \approx 3 \,\mathrm{K}^{1/2}$, $\Delta_2 \approx 5 \,\mathrm{K}$; для триплетного состояния $\Delta_{01} \approx 4$ К, $A \approx 4$ К^{1/2}, $\Delta_2 \approx 2$ К. Концентрация пар спинов S = 1/2 в этом соединении одинакова для сиглетного и триплетного состояний и составляет $n \approx 0.13$, что значительно больше, чем в соединениях (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅. Заметим, что магнитный момент иона Gd³⁺ равен 7µ_В (µ_В – магнетон Бора). По данным нейтронных исследований [17] магнитный момент иона Nd³⁺ в соединении $(Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ с x = 1 составляет 2,53 μ_B и уменьшается при понижении концентрации неодима. Можно предположить, что обменное взаимодействие ионов никеля и редкоземельных ионов способствует стабилизации состояний сегментов цепочки. Чем больше магнитный момент редкоземельного иона, тем больше поле,



которое действует на никелевую подсистему, и система сегментов цепочки не имеет тенденции к разрушению.

Рис. 3 – (*a*), (*c*) – температурные зависимости теплоемкости ($Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ и Gd₂BaNiO₅ в поле *H* = 0, полученные вычитанием из экспериментальной зависимости решеточного вклада и вклада, обусловленного редкоземельной подсистемой. Экспериментальные зависимости теплоемкости для Gd₂BaNiO₅ [13] и ($Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ [14] были взяты из опубликованных ранее статей. (*b*), (*d*) – температурные зависимости теплоемкости ($Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ и Gd₂BaNiO₅ в области низких температур. Символами представлены экспериментальные данные, сплошными линиями представлены результаты расчетов

Fig. 3 – (*a*), (*c*) – temperature dependences of the heat capacity of $(Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ and Gd₂BaNiO₅ measured in zero magnetic field and prepared by subtraction of both the lattice and rare-earth subsystem contribution from the experimental data. Experimental dependences of the heat capacity of Gd₂BaNiO₅ [13] and $(Y_{1-x}Nd_x)_2BaNiO_5$ [14] were taken from previously published articles. (*b*), (*d*) – temperature dependences of the heat capacity of Gd₂BaNiO₅ in low temperature range. Experimental data shown by symbols, the calculated curves are represented by solid lines

Заключение

Взаимодействие спинов S = 1/2, возникающих на концах сегментов халдейновской цепочки, приводит к расщеплению четырехкратно вырожденного уровня основного состояния сегмента. Перераспределение электронов по этим подуровням при изменении температуры обусловливает появление на температурной зависимости теплоемкости аномалии Шоттки. Положение аномалии определяется параметрами взаимодействия спинов S = 1/2 и направлением и величиной приложенного магнитного поля. Анализ экспериментальных данных для соединений Gd₂BaNiO₅ и (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅, опубликованных ранее, показал, что аномалии, обнаруженные на температурной зависимости теплоемкости при T < 10 K, хорошо описываются в модели взаимодействующих спинов $S = \frac{1}{2}$, возникающих на концах сегментов никелевой цепочки спинов S = 1. Хорошее согласие расчетов с экспериментальными данными получено при учете влияния двух типов сегментов, содержащих четное и нечетное число магнитных ионов.

ЛИТЕРАТУРА

- 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, N 15. – P. 1153. – doi: 10.1103/PhysRevLett.50.1153.
- Paramagnetic and antiferromagnetic resonances in the diamagnetically diluted Haldane magnet PbNi₂V₂O₈ / A.I. Smirnov, V.N. Glazkov, H.-A. Krug von Nidda, A. Loidl, L.N. Demianets, A.Ya. Shapiro // Physical Review B. – 2002. – Vol. 65, N 17. – P. 174422. – doi: 10.1103/PhysRevB.65.174422.
- Observation of S=1/2 degrees of freedom in an S=1 linear-chain Heisenberg antiferromagnet / M. Hagiwara, K. Katsumata, I. Affleck, B.I. Halperin, J.P. Renard // Physical Review Letters. – 1990. – Vol. 65, N 25. – P. 3181. – doi: 10.1103/PhysRevLett.65.3181.
- Comparison of S=0 and S=1/2 impurities in the Haldane chain compound Y₂BaNiO₅ / J. Das, A.V. Mahajan, J. Bobroff, H. Alloul, F. Alet, E.S. Sørensen // Physical Review B. – 2004. – Vol. 69, N 14. – P. 144404. – doi: 10.1103/PhysRevB.69.144404.
- Batista C.D., Hallberg K., Aligia A.A. Electron spin resonance of defects in the Haldane system Y₂BaNiO₅ // Physical Review B. – 1999. – Vol. 60, N 18. – P. R12553. – doi: 10.1103/PhysRevB.60.R12553.
- Tedoldi F., Santachiara R., Horvatić M. ⁸⁹YNMR imaging of the staggered magnetization in the doped Haldane chain Y₂BaNi_{1-x}Mg_xO₅ // Physical Review Letters. – 1999. – Vol. 83, N 2. – P. 412. – doi: 10.1103/PhysRevLett.83.412.
- Darriet J., Regnault L.P. The compound Y₂BaNiO₅: a new example of a Haldane gap in a S=1 magnetic chain // Solid State Communications. - 1993. - Vol. 86, N 7. - P. 409-412. doi: 10.1016/0038-1098(93)90455-V.
- The electronic structure of the doped one-dimensional transition metal oxide Y_{2-x}Ca_xBaNiO₅ studied using X-ray absorption / Z. Hu, M. Knupfer, M. Kielwein, U.K. Rößler, M.S. Golden, J. Fink, F.M.F. de Groot, T. Ito, K. Oka, G. Kaindl // The European Physical Journal B. – 2002. – Vol. 26, N 4. – P. 449–453. – doi: 10.1140/epjb/e20020113.
- Magnetic and charge dynamics in a doped one-dimensional transition metal oxide / J.F. DiTusa, S.-W. Cheong, J.-H. Park, G. Aeppli, C. Broholm, C.T. Chen // Physical Review Letters. – 1994. – Vol. 73, N 13. – P. 1857. – doi: 10.1103/PhysRevLett.73.1857.
- Magnetic gap excitations in a one-dimensional mixed spin antiferromagnet Nd₂BaNiO₅ / A. Zheludev, J.M. Tranquada, T. Vogt, D.J. Buttrey // Physical Review B. – 1996. – Vol. 54, N 10. – P. 7210. – doi: 10.1103/PhysRevB.54.7210.
- Maslov S., Zheludev A. Universal behavior of one-dimensional gapped antiferromagnets in a staggered magnetic field // Physical Review Letters. – 1998. – Vol. 80, N 26. – P. 5786. – doi: 10.1103/PhysRevLett.80.5786.
- Quantum and classical dynamics in complex one-dimensional antiferromagnets / A. Zheludev, S. Maslov, T. Yokoo, J. Akimitsu, S. Raymond, S.E. Nagler, K. Hirota // Physical Review B. – 2000. – Vol. 1. – P. 1601. – doi: 10.1088/0953-8984/13/27/202.
- Thermodynamic studies on single crystalline Gd₂BaNiO₅ / E. Popova, R. Klingeler, N. Tristan, B. Büchner, A.N. Vasil'ev // Physical Review B. – 2012. – Vol. 85, N 17. – P. 174402–174408. – doi: 10.1103/PhysRevB.85.174402.
- Calorimetric and spectroscopic study of quasi-one-dimensional Haldane magnets (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅ (x = 1, 0.75, 0.50, 0.25) / E. Popova, A.N. Vasil'ev, S.A. Klimin, M.V. Narozhnyi, M.N. Popova // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2010. – Vol. 111, N 2. – P. 204–208. – doi: 10.1134/s1063776110080078.
- Rigorous results on valence-bond ground states in antiferromagnets / I. Affleck, T. Kennedy, E.H. Lieb, H. Tasaki // Physical Review Letters. – 1987. – Vol. 59, N 7. – P. 799. – doi: 10.1103/PhysRevLett.59.799.

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч. 1. Изд. 3-е, доп. М.: Наука, 1976. – 584 с. – (Теоретическая физика; т. 5).
- Magnetic ordering, spin waves, and Haldane-gap excitations in (Nd_xY_{1-x})₂BaNiO₅ linearchain mixed-spin antiferromagnets / T. Yokoo, S.A. Raymond, A. Zheludev, S. Maslov, E. Ressouche, I. Zaliznyak, R. Erwin, M. Nakamura, J. Akimitsu // Physical Review B. – 1998. – Vol. 58. – P. 14424. – doi: 10.1103/PhysRevB.58.14424.

THE CHAIN BREAKS EFFECT ON HALDANE SYSTEM HEAT CAPACITY

Popova E.A., Nikiforov A.V.

National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

A disordered ground state with a gap in the spectrum of the magnetic excitation spectrum is realized in the compounds that contain chains of magnetic ions with S = 1 spins (Haldane chains). In the framework of the VBS model, each S = 1 spin can be represented as two pseudo-particles with S = 1/2 spins connected by antiferromagnetic interaction with a pseudo-particle in a neighboring ion. Nonmagnetic impurities within the chain can lead to the formation of chain segments, and unpaired S = 1/2 spins appear at each end of the chain segments.

In this paper, the influence of the interaction of S=1/2 spins appearing at the ends of the segments of the Haldane chain on the temperature dependence of specific heat C(T) is studied. The interaction of the end S = 1/2 spins leads to the splitting of the four-fold degenerated ground state of the chain segment into the singlet and the triplet states separated by a gap Δ_1 . The temperature-driven repopulation of the ground state sublevels causes the Schottky anomaly in the C (T) dependence. Using the energy spectrum of the chain segment, which is obtained by taking into account the single-ion anisotropy Δ_2 , we obtain an expression for the specific heat. Analysis shows

that in the absence of an external magnetic field, when one of the parameters Δ_1 or Δ_2 is fixed, the specific heat peak shifts to higher temperatures with increasing another parameter. For the case of the singlet ground state, the maximum of the specific heat shifts to higher temperatures with increasing the magnetic field H. If the ground state is triplet, the maximum shifts to lower temperatures at H<3T, and it shifts to higher temperatures at H>7T. In the intermediate field range, the C (T) dependence is more complex. The calculation results are compared with experimental data for compounds Gd₂BaNiO₅ and (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅ published previously.

Keywords: Haldane chains, chain breaks, nickelates.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-19-30

REFERENCES

- 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, no. 15, pp. 1153. doi: 10.1103/PhysRevLett.50.1153.
- Smirnov A.I., Glazkov V.N., Krug von Nidda H.-A., Loidl A., Demianets L.N., Shapiro A.Ya. Paramagnetic and antiferromagnetic resonances in the diamagnetically diluted Haldane magnet PbNi₂V₂O₈. *Physical Review B*, 2002, vol. 65, no. 17, pp. 174422. doi: 10.1103/PhysRevB.65.174422.
- Hagiwara M., Katsumata K., Affleck I., Halperin B.I., Renard J.P. Observation of S=1/2 degrees of freedom in an S=1 linear-chain Heisenberg antiferromagnet. *Physical Review Letters*, 1990, vol. 65, no. 25, p. 3181. doi: 10.1103/PhysRevLett.65.3181.
- Das J., Mahajan A.V., Bobroff J., Alloul H., Alet F., Sørensen E.S. Comparison of S=0 and S=1/2 impurities in the Haldane chain compound Y₂BaNiO₅. *Physical Review B*, 2004, vol. 69, no. 14, pp. 144404. doi: 10.1103/PhysRevB.69.144404.
- Batista C.D., Hallberg K., Aligia A.A. Electron spin resonance of defects in the Haldane system Y₂BaNiO₅. *Physical Review B*, 1999, vol. 60, no. 18, p. R12553. doi: 10.1103/PhysRevB.60.R12553.

- Tedoldi F., Santachiara R., Horvatić M. ⁸⁹YNMR imaging of the staggered magnetization in the doped Haldane chain Y₂BaNi_{1-x}Mg_xO₅. *Physical Review Letters*, 1999, vol. 83, no. 2, p. 412. doi: 10.1103/PhysRevLett.83.412.
- Darriet J., Regnault L.P. The compound Y₂BaNiO₅: a new example of a Haldane gap in a S=1 magnetic chain. *Solid State Communications*, 1993, vol. 86, no. 7, pp. 409–412. doi: 10.1016/0038-1098(93)90455-V.
- Hu Z., Knupfer M., Kielwein M., Rößler U.K., Golden M.S., Fink J., Groot F.M.F. de, Ito T., Oka K., Kaindl G. The electronic structure of the doped one-dimensional transition metal oxide Y_{2-x}Ca_xBaNiO₅ studied using X-ray absorption. *The European Physical Journal B*, 2002, vol. 26, no. 4, pp. 449–453. doi: 10.1140/epjb/e20020113.
- DiTusa J.F., Cheong S.-W., Park J.-H., Aeppli G., Broholm C., Chen C.T. Magnetic and charge dynamics in a doped one-dimensional transition metal oxide. *Physical Review Letters*, 1994, vol. 73, no. 13, p. 1857. doi: 10.1103/PhysRevLett.73.1857.
- Zheludev A. Tranquada J.M., Vogt T., Buttrey D.J. Magnetic gap excitations in a onedimensional mixed spin antiferromagnet Nd₂BaNiO₅. *Physical Review B*, 1996, vol. 54, no. 10, p. 7210. doi: 10.1103/PhysRevB.54.7210.
- Maslov S., Zheludev A. Universal behavior of one-dimensional gapped antiferromagnets in a staggered magnetic field. *Physical Review Letters*, 1998, vol. 80, no. 26, p. 5786. doi: 10.1103/PhysRevLett.80.5786.
- Zheludev A., Maslov S., Yokoo T., Akimitsu J., Raymond S., Nagler S.E., Hirota K. Quantum and classical dynamics in complex one-dimensional antiferromagnets. *Physical Review B*, 2000, vol. 1, p. 1601. doi: 10.1088/0953-8984/13/27/202.
- Popova E., Klingeler R., Tristan N., Büchner B., Vasil'ev A.N. Thermodynamic studies on single crystalline Gd₂BaNiO₅. *Physical Review B*, 2012, vol. 85, no. 17, pp. 174402–174408. doi: 10.1103/PhysRevB.85.174402.
- Popova E., Vasil'ev A.N., Klimin S.A., Narozhnyi M.V., Popova M.N. Calorimetric and spectroscopic study of quasi-one-dimensional Haldane magnets (Y_{1-x}Nd_x)₂BaNiO₅ (x = 1, 0.75, 0.50, 0.25). *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2010, vol. 111, no. 2, pp. 204–208. doi: 10.1134/s1063776110080078.
- Affleck I., Kennedy T., Lieb E.H., Tasaki H. Rigorous results on valence-bond ground states in antiferromagnets. *Physical Review Letters*, 1987, vol. 59, no. 7, p. 799. doi: 10.1103/PhysRevLett.59.799.
- Landau L.D., Lifshits E.M. Statisticheskaya fizika. Ch. 1 [Statistical physics. Pt. 1]. Teoreticheskaya fizika. T. 5 [Theoretical physics. Vol. 5]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 584 p.
- Yokoo T., Raymond S.A., Zheludev A., Maslov S., Ressouche E., Zaliznyak I., Erwin R., Nakamura M., Akimitsu J. Magnetic ordering, spin waves, and Haldane-gap excitations in (Nd_xY_{1-x})₂BaNiO₅ linear-chain mixed-spin antiferromagnets. *Physical Review B*, 1998, vol. 58, p. 14424. doi: 10.1103/PhysRevB.58.14424.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Попова Елена Арнольдовна – родилась в 1962 году, канд. физ.-мат. наук, доцент Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Область научных интересов: низкоразмерный магнетизм, мультиферроики. Опубликовано 32 научные работы. (Адрес: 109028, Россия, Москва, улица Таллинская, дом 34. Е-mail: еаророva@hse.ru).

Popova Elena Arnol'dovna (b. 1962) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), Associate professor, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics. Her research interests are currently focused on low-dimensional magnetism and multiferroics. She is the author of 32 scientific papers. (Address: 34, Tallinskaya St., Moscow, 109028, Russia. E-mail: eapopova@hse.ru).



Никифоров Александр Вадимович – родился в 1992 году, аспирант Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Область научных интересов: низкоразмерные магнитные системы. (Адрес: 109028, Россия, Москва, улица Таллинская, дом 34. E-mail: nikiforoffalexandr@yandex.ru).

Nikiforov Aleksandr Vadimovich (b. 1992) – PhD student, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics. His research interests are currently focused on low-dimensional magnetism. (Address: 34, Tallinskaya St. Moscow, 109028, Russia. E-mail: nikiforoffalexandr@yandex.ru).

Статья поступила 06 декабря 2016 г. Received December 06, 2016

To Reference:

Popova E.A., Nikiforov A.V. Vliyanie razryvov tsepochki na teploemkosť khaldeinovskoi sistemy [The chain breaks effect on Haldane system heat capacity]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 19–30. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-19-30

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

январь–март

№ 1(34)

УДК 67.02

2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР С МАТАЛЛИЗАЦИОННЫМИ СЛОЯМИ ИЗ LTCC КЕРАМИКИ

Д.А. Вайман¹, И.Б. Красный¹, В.С. Данилов¹, С.А. Кумачева²

¹ Новосибирский государственный технический университет ² Сибирский государственный университет путей сообщения

Статья посвящена исследованию технологических аспектов формирования объемных деталей с металлизационными слоями на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики – Low temperature co-fired ceramic (LTCC). Эта керамика обладает рядом преимуществ, по сравнению с высокотемпературной технологией HTCC (high temperature co-fired ceramic – высокотемпературная совместно обжигаемая керамика), для получения электронных изделий, в том числе работающих в СВЧ диапазоне. В работе представлены результаты библиографического анализа и практической реализации технологии формирования металлокерамической структуры из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики «A6M» фирмы «FERRO». На примере аналога корпуса светодиода HaikuTech рассмотрены принципиальные особенности выполнения многих технологических операций. Для практической реализации используется самая современная технологическая линейка оборудования фирмы «КЕКО Equipment». Приведены оптимальные параметры выполнения тех или иных операций. Также представлены основные особенности перфорации керамических листов. Рассмотрены дефекты и основные сложности заполнения отверстий металлизацией методом трафаретной печати. Для достижения максимальной сохранности топологии стека при воздействии большого давления и оптимизации процесса ламинирования образцов используется специальный формообразующий силикон. Приводится анализ температурной кривой фирмы «FERRO» и ее оптимизация под условия спекания в лабораторной печи. Представленные результаты измерения плотности, фотографии микроструктуры керамики и металлизационного слоя позволяют выполнить оценку возможности технической реализации различных видов изделий на основе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики и выделить основные перспективы ее развития. К тому же обзор многих «скрытых» проблем, которые возникали в ходе отработки технологических режимов, позволит учесть их в будущем при реализации других изделий.

Ключевые слова: LTCC, HTCC, керамика, стекла, перфорация, металлизация, ламинирование, стек, обжиг, майлар.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-31-45

Введение

LTCC – это совокупность диэлектрического материала и высокопроводящей металлизационной пасты, которые образуют трехмерную интегральную систему и спекаются одновременно за один технологический цикл. Данный материал используется в электронной промышленности для изготовления корпусов, многослойных структур и СВЧ устройств [1].

Несмотря на то что данный материал был получен в результате совместных работ ученых США и Японии более 30 лет назад, широкого распространения он не получил в силу того, что для производства электронных компонентов из него от производителя требуется значительное вложение средств в технологическое оборудование [2–4].

© 2017 Д.А. Вайман, И.Б. Красный, В.С. Данилов, С.А. Кумачева

Но ситуация меняется, и в настоящий момент развитие электронной техники достигло того этапа, когда дальнейшая эволюция невозможна без применения инновационных материалов.

В то же время происходит постоянное улучшение физикомеханических свойств LTCC материалов и совершенствование технологии их производства. Это приводит к постепенному снижению стоимости и расширению областей использования.

Производители передовых электронных устройств, работающих в СВЧ диапазоне, проявляют большой интерес к данному классу керамики благодаря следующим его преимуществам и особенностям.

• Низкая температура спекания (750...1000 °С), что существенно упрощает производственный процесс и позволяет использовать низкоомные металлизационные пасты на основе серебра, золота и т.д. (по сравнению с НТСС технологией) [1, 8].

• Механическая устойчивость и сохранение стабильных линейных размеров обеспечиваются малым коэффициентом теплового расширения, значение которого близко ко многим известным полупроводниковым материалам, что позволяет устанавливать полупроводниковые кристаллы непосредственно на основание платы.

• Низкие диэлектрические потери, стабильные в широком диапазоне частот. Для разных типов систем диэлектрическая проницаемость LTCC керамики варьируется от 6 до 9, а тангенс угла диэлектрических потерь – от 0,001 до 0,006 в CBЧ диапазоне.

• Возможность создания трехмерных структур до 80 и более рабочих слоев. LTCC системы позволяют создавать полости, отверстия, использовать встроенные пассивные компоненты.

Благодаря перечисленным достоинствам LTCC технология успешно применяется производителями многослойных плат для ВЧ и СВЧ корпусов микросхем и электронных приборов. LTCC материалы имеют неоспоримый потенциал развития и совершенствования для того, чтобы составить серьезную конкуренцию многослойным платам из стеклотекстолита и высокотемпературной керамики [5].

1. Технология LTCC

Во многих литературных источниках [5, 6, 10] приводится следующая схема технологического процесса изготовления устройств на основе LTCC керамики (рис. 1). Процесс производства изделий из LTCC керамики начинается с создания керамической суспензии путем смешивания керамического порошка, специальных стекол, органических связующих, растворителей и модифицирующих добавок. Из суспензии впоследствии формируется керамическая лента. Далее лента нарезается на листы необходимого размера, в соответствии с имеющимся оборудованием, зачастую это 6×6' или 8×8'. Керамические листы, как правило, имеют толщину от 50 до 250 мкм и являются базовым материалом для производства изделий. От качества таких листов зависят стабильность и повторяемость параметров процесса производства устройств. Также характеристики керамических листов определяют функциональные возможности готовых изделий. В зависимости от решаемой задачи исходная лента может быть разной и модифицирована добавками с различными электрическими и физическими свойствами. Стоит отметить, что основными производителями LTCC керамики являются компании «DuPont» (США) и «FERRO» (США). Они продают «сырые» керамические листы (в зарубежном варианте «Green Tape») различных толщин, размеров, с разными характеристиками [1]. Технология производства данных материалов держится в строжайшем секрете, так как основная продукция на основе данной керамики направлена на военную промышленность. На сегодняшний день задача разработки отечественной LTCC керамики и ее изготовления является актуальной задачей для развития электроники в России [2].



Рис. 1 – Блок-схема технологии изготовления объемных изделий на основе LTCC керамики

Fig. 1 – A block diagram of manufacturing techniques volumetric devices based on LTCC ceramics

Для детального знакомства с технологией формирования трехмерных структур с металлизационными слоями в качестве примера будет рассмотрен процесс освоения аналога маломощного светодиодного корпуса поверхностного монтажа фирмы HaikuTech (рис. 2).



Puc. 2 – Аналог корпуса светодиода HaikuTech *Fig.* 2 – The analogue of LED package Haiku Tech

Корпус состоит из двух основных слоев: слой \mathbb{N} 1 – это основание, которое имеет металлизированные площадки сверху и снизу и переходные металлизированные отверстия для обеспечения электрического контакта и снижения теплового сопротивления корпуса (рис. 2, δ); слой \mathbb{N} 2 – это так называемый «колодец»,

который предназначен для того, чтобы в последующем кристалл светодиода залить люминофором (рис. 2, *a*).

В данной работе для создания корпуса светодиода используется LTCC керамика фирмы «FERRO», марка керамики «A6M», толщина листов 110 мкм. Также в комплекте с листами используются металлизационные пасты на основе серебра той же фирмы, для металлизации внешнего слоя: «CN33-498», для заполнения отверстий: «CN33-495», для металлизации отверстий: «CN33-493».

Чтобы сформировать полости или переходные отверстия, которые будут в последующем металлизироваться и образовывать контакт между слоями, проводят процесс пробивки отверстий в «сырых» листах керамики. Также данную операцию еще называют «перфорация» керамики, для ее выполнения листы керамики должны быть равномерными по толщине, гладкими и эластичными. Стоит отметить, что на операции литья керамической пленки керамический слой отливается на специальную несущую пленку, для этого используют «майлар» [5–7]. Данная пленка нужна для того, чтобы керамический слой легко поддавался обработке на следующих операциях.

На рис. 3 наглядно представлены основные виды дефектов перфорации: керамический лист хрупкий и крошится при пробивке отверстий пуансоном (рис. 3, a); керамический лист слишком мягкий и по краям отверстия образуются заусенцы (рис. 3, δ); при изнашивании пуансона образуется замятие кромок на несущей пленке (рис. 3, ϵ). Существует много работ, посвященных другим методам формирования отверстий и полостей, некоторые из них представлены в источниках [6–9].



Рис. 3 – Основные виды дефектов керамической пленки при пробивке отверстий: a – сколы и трещины; δ – заусенцы, адгезия обрезков; e – вмятины на пленке *Fig.* 3 – The main types of ceramic film defects when punching holes: a – chipped and cracked; b – burrs, adhesion of scraps; c – dent on film

Практическая реализация данной операции проводилась на установке перфорации «КЕКО Equipment PAM-8S». Для изготовления корпуса светодиода учитывалась усадка по толщине примерно 16–17 %, произведена перфорация отверстий пяти листов LTCC керамики слоя № 1 и семи листов слоя № 2 [13–14]. Также выявлена следующая характерная особенность данной операции, которую необходимо учитывать, заключается она в том, что если нет пуансона необходимой формы и диаметра, то выбивать полости необходимо с помощью множества пробитий отверстий меньшего диаметра (рис. 4).

К тому же при выполнении данной операции необходимо учитывать геометрическую усадку, в зависимости от формы элемента и его размеров она может отличаться более чем на 2 % от средней усадки на изделии. В зависимости от формы полостей и их количества данная операция может занять много времени.





Для нанесения металлизации на «сырые» листы керамики зачастую применяют метод толстопленочной трафаретной печати, при этом для печати используется специальная сетка-трафарет с так называемой «маской», которая формирует защитный слой там, где это необходимо. Ракель, проходя с определенным усилием и скоростью по трафарету, проталкивает металлизационную пасту через отверстия маски трафарета так, что паста наносится на лист керамики (рис. 5). Тип металлизационной пасты, давление ракеля, зазор между трафаретом и листом керамики и т. д. являются ключевыми факторами, влияющими на качество и повторяемость операции [6].



Рис. 5 – Основные этапы нанесения металлизационных паст:

 а – металлизация отверстий пастой CN33-493; б – повторная металлизация отверстий пастой CN33-495;
 в – нанесение металлизационного слоя на поверхности керамики пастой CN33-498

Fig. 5 – The main stages of applying metallization pastes: a – hole metallization paste CN 33-493; b – re-plating holes paste CN33-495; c – applying metallization layers on the surface of the ceramic paste CN33-498

В работе были использованы металлизационные пасты фирмы «FERRO». Первым шагом произведена металлизация переходных отверстий пастой CN33-493 (рис. 5, *a*), она предназначена для заполнения сквозных отверстий. Так как данная паста является достаточно вязкой, то она не полностью заполняет все отверстия и поэтому листы проходят повторную металлизацию отверстий с пастой CN33-495 (рис. 5, δ). На третьем этапе наносятся металлизационные слои на поверхности листов керамики с помощью пасты CN33-498 (рис. 5, ϵ). После каждого этапа нанесения металлизации листы керамики проходят воздушную сушку при температуре потока воздуха 90 °C. Металлизация поверхности и отверстий связана с подбором большого количества технологических параметров. Наиболее оптимальные режимы для нанесения металлизационных паст на установке «KEKO Equipment P-200AVF», при которых получены хорошие результаты, представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

N⁰	Характеристика	CN33-493	CN33-495	CN33-498
1	Зазор между трафаретом и листом керамики, мм	0,7	0,7	0,7
2	Давление на ракель, МПа	0,05	0,05	0,05
3	Скорость движения скребка, мм/с	40	40	40
4	Скорость движения ракеля, мм/с	40	60	60
5	Угол наклона ракеля (между керамическим			
5	листом и самим ракелем), град.	45	60	60
6	Количество проходов, шт.	4	2	2

Параметры режимов металлизации Parameters modes metallization

Следующим этапом создания керамических корпусов светодиодов является операция формирования стеков, которая включает в себя процесс совмещения листов керамики между собой и сборку их в стопку. Для того чтобы точно совместить все слои между собой, еще на этапе формирования отверстий на каждом листе пробиваются специальные реперные метки, на рис. 6 они обведены окружностями.



Puc. 6 – Реперные метки на листе керамики *Fig.* 6 – Fiducially mark on the sheet ceramic

При отработке режима стекирования на установке укладки керамических листов в стопку «КЕКО Equipment SW-8V» основным дефектом было прилипание первого листа керамики к захватывающей головке стекера, что приводило к сме-
щению листов относительно друг друга. Для устранения этого дефекта время прессования было уменьшено с 10 до 1 секунды. Также температура стола и головки стекера была установлена на 25 °C. К тому же было выявлено, что если металлизированные листы недостаточно просохли, то они также могут прилипать к захватывающей головке в машине укладки керамических листов в стопку.

Далее собранный стек ламинируется (прессуется). В данном случае важно сохранить топологию стека неизменной, потому что велик риск искажения отверстий и полостей во время прессования [10–12].

Для прессования стека был подобран оптимальный режим ламинирования на установке «КЕКО Equipment ILS-66»: температура жидкости 55 °C; время нагрева стека 5 минут, прессование осуществлялось в течение 15 минут при давлении в 25 МПа. Для этого стек был покрыт специальным формообразующим силиконом Mold Max 40 (рис. 7), при данном режиме «рельеф» стека сохранился неизменным. В источнике [8] приводят следующие основные материалы: силиконовые вкладыши, майларовые вставки, органические вещества, которые выгорают при обжиге.



Puc. 7 – Стек, залитый силиконом *Fig.* 7 – Stack, filled with silicone

После ламинирования стек был разрезан на заготовки с помощью установки резки «сырой» керамики КЕКО СМ-15. Если неправильно подобрана температура стола, то велик риск поломки лезвия на установке, а если температура лезвия слишком высокая, то большой шанс того, что керамика будет прилипать к лезвию и вызывать деформации в стеке. Поэтому было выявлено, что LTCC керамика становится «мягкой» при температуре стола 50 °C, а оптимальная температура ножа – 80 °C. Резка осуществлялась по специальным меткам, которые были нанесены на листы на этапе перфорации (рис. 8).

Спекание LTCC керамики производится за один этап в две стадии (рис. 9). Первая стадия – нагрев до 450 °C с выдержкой в течение двух часов, это необходимо для эффективного процесса удаления всех органических связующих, которые придавали «сырым» листам керамики форму и эластичность. На второй стадии происходит спекание керамики: нагрев до 850 °C с выдержкой 15 минут [1]. В отличие от спекания многих других керамик спекание LTCC керамики является очень коротким и менее энергоемким процессом, например, керамика ВК-96, которая используется в НТСС технологии, требует отдельно удаления связки и обжига, каждый из процессов длится не менее 12 часов.



Рис. 8 – Пример отображения реперных меток для установки резки на заготовки CM-15
 Fig. 8 – Example display reference marks for equipment cutting into blanks CM-15



Puc. 9 – График обжига LTCC керамики *Fig. 9* – The graph firing LTCC ceramic

Первое спекание светодиодных корпусов было проведено в лабораторной печи «Nabertherm LHT 08/18». Корпуса были помещены в специальную керамическую лодочку, по рекомендованному компанией «FERRO» режиму с максимальной температурой 850 °C, общее время спекания 10 часов, температурный график представлен на рис. 9. В результате данного спекания на контактных площадках металлизация скаталась в шарики и стала расслаиваться, в отверстиях металлизация деформировалась, сами керамические корпуса дефектов (изгибов, трещин, сколов) не имели (рис. 10). После этого режим спекания был изменен, максимальная температура спекания была снижена до 780 °C при той же длительности процесса.



Рис. 10 – Изображение корпуса светодиода, спеченного при $T_{max} = 850$ °C: a - вид сверху; $\delta - вид$ снизу *Fig.* 10 – The image LED package sintered at $T_{max} = 850$ °C: a - top view; b - bottom view

2. Результаты

После процесса оптимизации температурной кривой спекания корпусов светодиодов были получены готовые образцы (рис. 11). Данные образцы обладают хорошей адгезией металлизационного слоя, дефекты керамики отсутствуют.



Рис. 11 – Изображение корпуса светодиода, спеченного при $T_{max} = 780$ °C: $a - вид сверху; \delta - вид снизу$ *Fig.* 11 – The image LED package sintered at $T_{max} = 780$ °C: a - top view; b - bottom view

Полученные образцы, спеченные при температуре 780 °С, были исследованы на установке рентгенофазового химического анализа, результаты представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 / Table 2

Рентгенофазовый анализ химического состава керамики X-ray analysis of the chemical composition of the ceramic

N⁰	Компонент	Процентное соотношение по массе
1	Al ₂ O ₃	53,2
2	BaO	24,73
3	SiO ₂	18,21
4	CaO	2,36

N⁰	Компонент	Процентное соотношение по массе		
5	TiO ₂	0,841		
6	Cs ₂ O	0,147		
7	Na ₂ O	0,124		
8	MgO	0,0736		
9	Другие	0,3144		
	Всего	100 %		

Окончание табл. 1

Таблица 3 / Table 3

Рентгенофазовый анализ химического состава металлизации
X-ray analysis of the chemical composition of the metallization

N⁰	Компонент	Компонент Процентное соотношение по массе	
1	Ag	76,74	
2	Κ	4,66	
3	Zn	4,2	
4	Ru	3,6	
5	Другие	14.4	
	Всего:	100 %	

Стоит отметить, что керамика FERRO A6M состоит примерно на 53 % из оксида алюминия, остальная часть – стеклодобавки. Органические компоненты в данном случае не учитываются, так как они выгорают при температур 300–450 °C [5]. Что касается состава металлизационного слоя на поверхности светодиода (табл. 3), то более 76 % слоя состоит из серебра, а остальное это добавки для компенсации температурного коэффициента линейного расширения и высокой адгезии к керамике. Равномерность распределения толщины металлизационного слоя на поверхности керамики можно рассмотреть на фотографии поперечного аншлифа корпуса светодиода (рис. 12).



Рис. 12 – Фотография микроструктуры поперечного аншлифа корпуса светодиода, увеличение ×1000
 Fig. 12 – Photo microstructure cross-polished sections of the LED package, an increase ×1000

У изготовленных светодиодных корпусов были измерены физические характеристики LTCC керамики.

- Плотность: 2,76 г/см³.
- Коэффициент водопоглощения керамики: 0,0133.
- Коэффициент пористости: 0,05.

Если сравнивать данные показатели с характеристиками керамического материала ВК-96, то они ничуть не хуже нормированных значений (плотность не менее 3,75 г/см³; коэффициент водопоглощения керамики не более 0,02; коэффициент пористости не более 0,07). Фотография микроструктуры поверхности LTCC керамики представлена на рис. 13 [13–15].



Рис. 13 – Фотография микроструктуры поверхности LTCC керамики спеченного корпуса светодиода, увеличение ×1000
 Fig. 13 – Photo surface microstructure of the sintered LTCC ceramic LED package, an increase ×1000

В результате проведения многих технологических операций и сопоставления полученных данных можно сделать следующие выводы.

• В первую очередь, на операции формирования отверстий, листы керамики нужно располагать несущей пленкой вверх, со стороны пробойника (пуансона). Также стоит учитывать, что перфоратор ограничен в наборе пуансонов, многие отверстия и полости необходимо выполнять с помощью множества пробитий отверстий пуансоном меньшего диаметра, а это приводит к шероховатым краям отверстий в керамике, заусенцам и увеличению длительности процесса.

• Состав и вязкость металлизационных паст напрямую влияют на параметры технологического процесса. Многие параметры трафаретной печати зависят друг от друга, например, изменение давления ракеля на трафарет влияет на количество проходов. В данной работе мы увеличили количество проходов с одного до трех и в два раза уменьшили давление на ракель, чтобы не «растягивать» трафарет.

• Процесс ламинирования стека является очень сложным, так как необходимо сохранить исходную топологию стека. В изостатическом прессе давление осуществляется жидкостью и распределяется равномерно. В связи с этим нами было разработано решение использовать специальный формообразующий силикон, который заполняет все полости и застывает, а после проведения операции легко отделяется от керамики. Также, чтобы исключить попадание воды внутрь стека, его упаковывают в специальные полиэтиленовые пакеты в вакуумной установке. • Температура спекания LTCC керамики ниже 1000 °C; так как мы использовали в своих экспериментах печь, предназначенную для спекания высокотемпературной керамики, то погрешность термопары в печи при невысоких температурах сыграла свою роль и пришлось корректировать рекомендуемый производителем керамики температурный режим.

Заключение

В данной работе представлено исследование влияния технологических аспектов на формирование трехмерных структур с металлизационными слоями из LTCC керамики. По результатам видно, что существует много факторов и особенностей, влияющих на выполнение каждой операции, которые напрямую отражаются на качестве готовых изделий. Стоит отметить, что в данной статье рассмотрен процесс изготовления одного изделия - аналога маломощного корпуса светодиода фирмы HaikuTech, но для другого типа изделий принципиально важными могут быть совершенно разные виды операций. В работе рассмотрены такие операции, как формирование отверстий, металлизация, сборка стеков, ламинирование, обжиг и др. К тому же результаты данной статьи свидетельствуют о высокой степени универсальности данной технологии, которая позволяет реализовать изделия из керамики практически любой сложности. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика является оптимальным материалом для разработки многих электронных устройств как низкочастотного, так и СВЧ диапазона, данная технология при массовом производстве является более экономически привлекательной, чем многие существующие аналогичные технологии [16-17].

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Кондратюк Р. LTCC низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Наноиндустрия. – 2011. – № 2. – С. 26–30.
- 2. Разработка отечественного керамического материала для изготовления изделий по технологии LTCC / Ю. Непочатов, С. Кумачева, Ю. Швецова, А. Дитц // Современная электроника. 2014. № 4. С. 12–14.
- 3. Потапов Ю. Особенности технологии проектирования и производства LTCC-модулей // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3. С. 59–64.
- 4. Перцель Я., Яковлев А. Преимущества использования технологии низкотемпературной керамики для реализации радиоэлектронных устройств // Современная электроника. 2012. № 8. С. 16–17.
- 5. Mistler R.E., Twiname E.R. Tape casting: theory and practice. Westerville, OH: American ceramic society, 2000. – 298 p.
- Imanaka Y. Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology. New York: Springer, 2005. – 229 p.
- 7. King A.G. Ceramic technology and processing. Norwich, NY: William Andrew Publ., 2002. 512 p.
- Gongora-Rubio M.R., Espioza-Vallejos P., Sola-Laguna L. Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST) // Sensors and Actuators. - 2001. - Vol. 89. - P. 222-241. - doi: 10.1016/S0924-4247(00)00554-9.
- The numerical simulation of a subtractive process for the fabrication of 3D low temperature co-fired ceramics packaging structures and devices: jet vapor etching / I. Ramos, L. García, E.W. Simoes, R. Furlan, J.J. Santiago-Aviles, M.T. Pereira // Nanotech. – 2002. – Vol. 1. – P. 446–449.
- Golonka L.J. Technology and applications of low temperature cofired ceramic (LTCC) based sensors and microsystems // Technical Science. – 2006. – Vol. 54. – P. 221–231.
- Wenxia L., Lannutti J.J. Curvature evolution in LTCC tapes and laminates // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2005. – Vol. 28 (1). – P. 149–156. – doi: 10.1109/TCAPT.2004.838860.

- Laminated ceramic microfluidic components for microreactor applications / P.M. Martin, D.W. Matson, W.D. Bennett, D.C. Stewart, C.C. Bonham // 4th International Conference on Microreactor Technology. – New York, 2000. – P. 410–415.
- Zhou J. Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials // Journal of Advanced Ceramic. – 2012. – Vol. 1 (2). – P. 89–99. – doi: 10.1007/s40145-012-0011-3.
- Besendorfer G., Roosen A. Particle shape and size effects on anisotropic shrinkage in tapecast ceramic layers // The American Ceramic Society. – 2008. – Vol. 91 (8). – P. 2514–2520. – doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02510.
- Properties of LTCC dielectric tape in high temperature and water environment / S. Toskov, A. Maric, N. Blaz, G. Miskovic, G. Radosavljevic // International Journal of Materials. – 2013. – Vol. 1 (4). – P. 332–336. – doi: 10.7763/IJMMM.2013.V1.72.
- Dielectric properties of new glass-ceramics for LTCC applied to microwave or millimeterwave frequencies / N. Mori, Y. Sugimoto, J. Harada, Y. Higuchi // Journal of the European Ceramic Society. – 2006. – Vol. 26. – P. 1925–1928. – doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.09.023.
- El-Nawawy M., Allam A.M.M.A., Korzec D. The design of a 0.35THz microstrip patch antenna on LTCC substrate // Electrical and Electronic Engineering. – 2011. – Vol. 1 (1). – P. 1–4. – doi: 10.5923/j.eee.20110101.01.

RESEARCH INTO TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE THREE-DIMENTSIONAL STRUCTURES FORMATION WITH METALIZED LAYERS BASED ON THE LTCC CERAMIC

Vayman D.A.¹, Krasny I.B.¹, Danilov V.S.¹, Kumacheva S.A.²

Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia ² Siberian transport University, Novosibirsk, Russia

This paper is devoted to the study of various technological aspects of the formation of volumetric components with metalized layers on the basis of the low temperature co-fired ceramic (LTCC). This ceramic has a plurality of various benefits, as compared with the technology of HTCC (high temperature co-fired ceramic). The paper describes the technology of threedimensional structure formation based on a review of papers addressing theoretical and practical realization of the low temperature co-fired ceramic A6M from the Ferro Company. The main principal features of per-forming operations are studied on the example of the analog HaikuTech LED package. The most up-to-date technological equipment from the KEKO Equipment Company is used for practical implementation. The optimal parameters of various operations are given. In addition, the paper presents the main features of ceramic sheet punching. Various defects and the main difficulties of filling holes with metallization by screen printing are considered. To achieve optimum integrity of the stack topology under the action of high pressure and to optimize the sample lamination process a special shaping silicone is used. Analysis of the temperature curve recommended by the Company Ferro and its optimization under sintering conditions in the laboratory furnace is presented. The results of measuring density, photographs of the microstructure ceramics and uniformity distribution of the metalized layer make it possible to evaluate the possibility of technical implementation of various products based on the low temperature co-fired ceramic and to identify the main prospects of its development. In addition, an overview of many "hidden" problems that arose during the development of processing methods will enable taking them into account in future implementation of other products based on low-temperature ceramics.

Keywords: LTCC, HTCC, ceramics, glass, punching, metallization lamination, stack, firing, mylar.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-31-45

REFERENCES

- Kondratyuk R. LTCC nizkotemperaturnaya sovmestno obzhigaemaya keramika [LTCC low temperature co-fired ceramic]. Nanoindustriya – Nanoindustry, 2011, no. 2, pp. 26–30.
- Nepochatov Yu., Kumacheva S., Shvetsova Yu., Ditts A. Razrabotka otechestvennogo keramicheskogo materiala dlya izgotovleniya izdelii po tekhnologii LTCC [The development of the domestic ceramic material for the manufacture of devices on LTCC technology]. *Sovremennaya elektronika*, 2014, no. 4, pp. 12–14.
- Potapov Yu. Osobennosti tekhnologii proektirovaniya i proizvodstva LTCC-modulei [Features of technology design and manufacturing LTCC-modules]. *Tekhnologii v elektronnoi* promyshlennosti – Technologies in Electronic Industry, 2008, no. 3, pp. 59–64.
- Pertsel' Ya., Yakovlev A. Preimushchestva ispol'zovaniya tekhnologii nizkotemperaturnoi keramiki dlya realizatsii radioelektronnykh ustroistv [The advantages of using lowtemperature ceramic technology for the implementation of electronic devices]. *Sovremennaya elektronika*, 2012, no. 8, pp. 16–17.
- 5. Mistler R.E., Twiname E.R. *Tape casting: theory and practice.* Westerville, OH, American ceramic society, 2000. 298 p.
- 6. Imanaka Y. *Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology*. New York, Springer, 2005. 229 p.
- King A.G. Ceramic technology and processing. Norwich, NY, William Andrew Publ., 2002. 512 p.
- Gongora-Rubio M.R., Espioza-Vallejos P., Sola-Laguna L. Overview of low temperature cofired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST). *Sensors and Actuators*, 2001, vol. 89, pp. 222–241. doi: 10.1016/S0924-4247(00)00554-9.
- Ramos I., García L., Simoes E.W., Furlan R., Santiago-Aviles J.J., Pereira M.T. The numerical simulation of a subtractive process for the fabrication of 3D low temperature co-fired ceramics packaging structures and devices: jet vapor etching. *Nanotech*, 2002, vol. 1, pp. 446– 449.
- 10. Golonka L.J. Technology and applications of low temperature cofired ceramic (LTCC) based sensors and microsystems. *Technical Science*, 2006, vol. 54, pp. 221–231.
- Wenxia L., Lannutti J.J. Curvature evolution in LTCC tapes and laminates. *IEEE Transac*tions on Components and Packaging Technologies, 2005, vol. 28 (1), pp. 149–156. doi: 10.1109/TCAPT.2004.838860.
- Martin P.M., Matson D.W., Bennett W.D., Stewart D.C., Bonham C.C. Laminated ceramic microfluidic components for microreactor applications. *4th International Conference on Microreactor Technology*, New York, 2000, pp. 410–415.
- Zhou J. Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials. Journal of Advanced Ceramic, 2012, vol. 1 (2), pp. 89–99. doi: 10.1007/s40145-012-0011-3.
- Besendorfer G., Roosen A. Particle shape and size effects on anisotropic shrinkage in tapecast ceramic layers. *The American Ceramic Society*, 2008, vol. 91 (8), pp. 2514–2520. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02510.
- Toskov S., Maric A., Blaz N., Miskovic G., Radosavljevic G. Properties of LTCC dielectric tape in high temperature and water environment. *International Journal of Materials*, 2013, vol. 1 (4), pp. 332–336. doi: 10.7763/IJMMM.2013.V1.72.
- Mori N., Sugimoto Y., Harada J., Higuchi Y. Dielectric properties of new glass-ceramics for LTCC applied to microwave or millimeter-wave frequencies. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, vol. 26, pp. 1925–1928. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.09.023.
- El-Nawawy M., Allam A.M.M.A., Korzec D. The design of a 0.35THz microstrip patch antenna on LTCC substrate. *Electrical and Electronic Engineering*, 2011, vol. 1 (1), pp. 1–4. doi: 10.5923/j.eee.20110101.01.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Вайман Дмитрий Александрович – аспирант кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: разработка трехмерных структур на основе LTCC керамики для электронных устройств. Опубликовано 3 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: dima-1nsk@mail.ru).

Vayman Dmitry Alexandrovich – graduate student at the Department of design and technology of radio electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the development of three-dimensional structures based on LTCC ceramics for electronic devices. He is author of 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dima-1nsk@mail.ru).



Красный Иван Борисович – аспирант кафедры электронных приборов, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: формирование проводящих слоев на керамике. Опубликовано 3 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kr.ivan.work@gmail.com).

Krasny Ivan Borisovich – graduate student at the Department of electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the forming conductive layers on ceramic. He is author of 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kr.ivan.work@gmail.com).



Данилов Вячеслав Семенович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: приборы СВЧ, оптического диапазона. Опубликовано свыше 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: danilov_vc@ngs.ru).

Danilov Vyacheslav Semenovich – Candidate of Science (Eng.), associate professor at the Department of design and technology of radio electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on high frequency devices, an optical range. He has over 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dima-1nsk@mail.ru).



Кумачева Светлана Аликовна – аспирант кафедры физики Сибирского государственного университета путей сообщения. Область научных интересов: разработка керамических материалов для СВЧ устройств. Опубликовано 5 научных работ. (Адрес: 630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191. E-mail: kumachevasveta@rambler.ru).

Kumacheva Svetlana Alikovna – graduate student at the Department of Physics in Siberian Transport University. His research interests are currently focused on the development of ceramic materials for microwave devices. He is author of 5 scientific papers. (Address: 191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia. E-mail: kumachevasveta@rambler.ru).

Статья поступила 17 апреля 2016 г. Received April 17, 2016

To Reference:

Vayman D.A., Krasny I.B., Danilov V.S., Kumacheva S.A. Issledovanie tekhnologicheskikh aspektov formirovaniya trekhmernykh struktur s matallizatsionnymi sloyami iz LTCC keramiki [Research into technological aspects of the three-dimentsional structures formation with metalized layers based on the LTCC ceramic]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 31–45. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-31-45

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

январь–март

№ 1(34)

УДК004.82

2017

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РУССКОГО ЖЕСТОВОГО ЯЗЫКА

М.Г. Гриф, А.Н. Козлов, Ю.С. Мануева

Новосибирский государственный технический университет

В статье проведен анализ существующих систем сурдоперевода, определены их преимущества и недостатки. Рассмотрена технология компьютерного перевода русского текста на русский жестовый язык. Определены основные этапы анализа текста: морфологический, синтаксический и семантический. Морфологический и синтаксический анализ проводится на основе системы Диалинг. Разработан модуль семантического анализа текста. Основная задача работы модуля заключается в разрешении проблемы омонимии. Работа семантического модуля основана на словаре В.А. Тузова. Работа модуля завершается, когда каждому слову соответствует единственное значение и определяется соответствующий жест. В статье приведена схема семантического анализа имени существительного. Проведен сравнительный анализ правильности определения значений слов в разработанной системе семантического анализа с системой «Сурдофон». Значения слов более качественно определяются в системе семантического анализа. Перевод текста на жестовую речь осуществляется с помощью алгоритма анализа синтаксических конструкций исходного языка и целевого языка. На основе данного анализа определяется соответствие синтаксических конструкций, в котором сложные предложения разбиваются на более простые. В ходе преобразования исходное предложение подвергается определенным дополнительным модификациям. В частности, причастие заменяется соответствующим глаголом. Разработана соответствующая библиотека для определения синтаксических конструкций.

Ключевые слова: русский жестовый язык, компьютерный сурдоперевод, семантический анализ, синтаксические конструкции, средства распознавания жестовой речи.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-46-57

Введение

По данным Всероссийской переписи населения, прошедшей в 2010 году, владение русским жестовым языком (РЖЯ) отметили 120 528 человек. Из приведенной статистики следует, что разработка систем перевода со звучащего языка на язык жестов и наоборот имеет особую социальную значимость [1]. Компьютерный перевод на данный момент представляет одно из доминирующих направлений в области прикладной лингвистики [2].

Для перевода РЖЯ на русскую речь необходимо решить проблему распознавания жестовой речи. Все устройства, которые применяются для распознавания жестов, делятся на две группы: устройства, основанные на распознавании видеоданных, и устройства, которые используют датчики: акселерометр, гироскоп и магнетометр. К устройствам первой группы можно отнести: бесконтактный контроллер Kinect, LeapMotion, камеру RealSense F200 [3–6]. Достоинства данных устройств – лучший результат распознавания в отличие от обычных камер, который достигается за счет наличия одного или нескольких сенсоров глубины или инфракрасной камеры, для распознавания жестов на различном расстоянии от камеры. Разработки первой группы распознают отдельные жесты и контур человека на расстоянии 1,8–3,5 метра (Kinect), с точностью до 1/100 миллиметра Leap Motion отслеживает все 10 пальцев, RealSense F200 определяет кисти рук, пальцы, эмоции человека.

© 2017 М.Г. Гриф, А.Н. Козлов, Ю.С. Мануева

Вторая группа устройств, которые могут применяться для распознавания жестов – кольца, перчатки, браслеты с набором датчиков. Функционирование браслета МҮО компании Thalmic Labs основано на обработке электрических импульсов мышц руки. На текущий момент ни одно из устройств в полной мере не может решить проблему распознавания жестовой речи. Для достижения более точного распознавания необходимо использовать комбинацию рассмотренных устройств: одно распознает движение кистей и пальцев, другое определяет эмоции, третье распознает более сложные движения, в которых задействованы локтевые и плечевые суставы. Таким образом, перевод с РЖЯ на русскую речь на данный момент представляется очень сложной задачей.

Целью данной статьи является описание способа построения системы компьютерного сурдоперевода с учетом семантической составляющей русского языка на основе словаря семантических отношений В.А. Тузова.

1. Постановка задачи

Основная сложность при реализации системы компьютерного сурдоперевода заключается в качестве перевода на РЖЯ. Под качеством перевода будем понимать правильность передачи смыслового значения предложения (его семантику). На первый взгляд можно ограничиться использованием субтитров, но при более подробном изучении можно сделать вывод, что использование субтитров не решает данную проблему. Во-первых, субтитры представляют собой калькирующую речь, т. е. происходит отображение на экране текста на русском языке, который не учитывает особенностей жестового языка: грамматику, синтаксис, семантику. Вследствие этих особенностей у слабослышащих возникают сложности в понимании субтитров. Во-вторых, на основе поправки к закону «О соцзащите инвалидов в Российской Федерации» от 26 декабря 2012 года русский жестовый язык получил статус «языка общения при наличии нарушений слуха и (или) речи, в том числе в сферах устного использования государственного языка», т. е. РЖЯ представляет собой самостоятельную языковую систему. Поэтому возникает необходимость в разработке системы компьютерного сурдоперевода, которая обеспечит достойную замену человеку-сурдопереводчику.

В качестве исходных данных используется текстовая строка, полученная в результате распознавания речи. Для повышения точности перевода разработаны программный модуль семантического анализа и модуль анализа на основе синтаксических конструкций. Суть данного подхода заключается в том, что в алгоритме отбора многозначных слов, имеющих соответствующие жесты, впервые был применен словарь В.А. Тузова, и выделены основные конструкции жестового языка, на основе которых происходит перевод предложения. Таким образом, решается проблема перевода русской речи на РЖЯ.

2. Обзор существующих систем компьютерного сурдоперевода

За последние 10 лет было замечено увеличение количества разработок систем машинного перевода со звучащего языка на язык жестов. Перевод на язык жестов фактически игнорировался общественностью машинных переводов, хотя системы перевода на язык жестов имеют большое значение для людей с ограниченными возможностями по слуху [7]. Рассмотрим системы перевода с английского языка на американский язык жестов и систему перевода с русского языка на русский язык жестов, которые будут описаны ниже.

Система Zardoz является системой перевода с английского языка на язык жестов с использованием языка-посредника (интерлингвы). Из-за большой трудоемкости применение системы возможно только для ограниченного количества предметных областей. Текущие исследования сосредоточены на разработке всеобъемлющей грамматики, морфологии и лексики для ирландского языка жестов [8]. Система ТЕАМ – это система машинного перевода с английского языка на американский жестовый язык. Перевод в системе ТЕАМ состоит из двух этапов: первый – перевод введенного предложения с английского языка на промежуточное представление с учетом синтаксической, грамматической и морфологической информации, второй – отображение промежуточного представления в виде движения с небольшим набором параметров, которые в дальнейшем преобразуются для управления моделью человека, воспроизводящей жесты. Гибкость системы позволяет адаптировать ее к другим жестовым языкам [9]. Проект ViSiCAST является упрощенной системой, которая фиксирует движения и жесты человекасурдопереводчика, а затем эти координаты рук переводчика передаются для последующего анализа для получения реалистичного аватара [10].

Ни одна из зарубежных систем не может обрабатывать входную информацию, поступающую в виде голоса. Для систем перевода, которые направлены именно на устный перевод, этот недостаток является существенным. Жестовые языки от звучаших отличаются тем, что используют пространственную информацию вокруг говорящего. Следовательно, в данных системах необходим учет специфики жестового языка. Специфика воспроизведения жестов учитывается только в системе Теат. Для более качественного перевода недостаточно только морфологической и синтаксической информации. В системе Zardoz делаются попытки учета семантической составляющей жестового языка. Технология перевода в системе ViSiCAST включает привлечение человека в процесс перевода, что является основным недостатком данной системы. Все системы отображают жесты с использованием аватара, но только в системе ViSiCAST достигнута максимальная реалистичность. Основным недостатком рассмотренных выше систем является отсутствие учета семантической составляющей как звучащего, так и жестового языка. Учет семантической составляющей в процессе перевода является большим преимуществом системы, обладающей таким свойством. Качество перевода заметно повышается за счет этого улучшения. Для достижения наилучшего результата необходимо учитывать особенности семантики исходного языка и язык перевода.

3. Технология компьютерного перевода русской речи на русский жестовый язык

Модель компьютерного сурдоперевода состоит из трех основных этапов: анализ исходного текста, перевод текста на жестовую речь и визуализация жестовой речи с использованием анимированного персонажа (аватара). Результатом работы системы является демонстрация жестов аватаром. Подготовительным этапом к анализу исходного текста является этап распознавания речи. Работа на данном этапе основана на сервисе распознавания речи компании Google, в качестве выходной информации получаем текстовую строку. Дальнейшие преобразования производятся над текстовой строкой.

- Анализ русского текста состоит из следующих этапов.
- 1. Морфологический анализ слов.
- 2. Синтаксический анализ структуры предложения.
- 3. Семантический анализ слов.

Морфологический и синтаксический анализ выполняется на основе системы Диалинг [11]. В системе Диалинг морфологический анализ состоит из морфоанализа и лемматизации словоформ. Под лемматизацией будем понимать приведение различных форм слова к словарным, а под морфоанализом – определение морфологических характеристик слова. Работа морфологического модуля основана на использовании трех морфологических словарей: большой словарь, который базируется на грамматическом словаре А.А. Зализняка, словарь имен собственных (например: Петр, Иванович, Иванов), словарь географических слов (например: Москва, Россия). На этапе лемматизации происходит определение начальной формы слова, необходимой для дальнейшей работы со словарями. Морфологическая часть речи определяется традиционным образом. Граммема – это единица морфологического описания. Например, у слова «кошка» будет следующий список граммем: жр, ед, им, од. При анализе реальных текстов необходимо учитывать соседние слова, потому что от выбора конкретной интерпретации зависит выбор интерпретации другого слова. Объем морфологического словаря составляет более 130 тысяч лексем, но и этого оказывается недостаточно. Если в словаре отсутствует данная словоформа, то применяется алгоритм, который ищет в словаре словоформу, максимально совпадающую с конца со входной словоформой.

В качестве входной информации синтаксического анализа поступают результаты морфологического анализа. На выходе получается набор из словосочетаний.

Наибольший интерес в данном случае представляет морфологическая омонимия. В случае с примером «древние стены города» слово «древние» имеет два различных морфологических описания (прилагательное и существительное), как и слово «стены» (существительное женского рода и существительное мужского рода). При построении группы «прил-сущ» были отброшены вторые варианты слов, таким образом, упрощается последующий семантический анализ.

Так как в существующих системах перевода отсутствует модуль, выполняющий семантический анализ, то ниже будет более подробно рассмотрена система семантического анализа.

4. Система семантического анализа русского текста

Значение слова в предложении определяется его соотношением с другими словами. Смысл предложения целиком зависит от смысла входящих в него единиц. Качество перевода с одного языка на другой в большей степени определяется корректностью работы семантического модуля. Для разрешения проблемы лексической многозначности необходимо проанализировать омонимы и фразеологизмы в предложении. Омонимия – это совпадение по звучанию и написанию различных слов: ласка – животное и ласка – проявление нежности, такса – собака и такса – тариф. Словарь омонимов русского языка О.С. Ахмановой содержит более 2000 словарных статей, содержащих группы или пары омонимов. Фразеологизмы отличаются от обычных сочетаний слов тем, что общее значение фразеологизмы «авгиевы конюшни» имеет значение «очень грязное место».

Информация, полученная на этапах морфологического и синтаксического анализа, является входной информацией для семантического анализа. Разработанный модуль семантического анализа основывается на словаре, разработанном В.А. Тузовым [12]. В.А. Тузов каждое слово определил как валентную структуру, состоящую из набора актантов. Каждый актант состоит из набора характеристик, описанных формулой

$$A_i = \{CN_i, BL_j, SD_k, MD_l, C_m, SP_p\},\$$

где CN_i – номер класса, i = 1...N; BL_j – базисная лексема, j = 1...M; SD_k – семантическое описание, k = 1...P; MD_l – морфологическое описание, l = 1...S; C_m – комментарий, m = 1...L; SP_p – часть речи, p = 1...W.

Словарная статья компьютерного семантического словаря содержит заголовочное слово и его толкование на семантическом языке. Большинство слов словаря имеет несколько семантических описаний. В данном словаре предлоги являются частью речи, значение единиц которой может содержать более двухсот значений. В отдельные значения вынесены фразеологические обороты. Например, глагол «идти» имеет 25 словарных статей. Из них 12 значений относятся к фразеологическим оборотам: идти вразрез, впрок, на поправку, ва-банк, замуж и другие. Основная семантическая информация содержится в номере класса. На основе семантического словаря была разработана база данных. Логическая структура базы данных состоит из тринадцати взаимосвязанных таблиц. К основным таблицам отнесем: таблицу «Словарные статьи», таблицу «Семантические описания», таблицу «Слова», таблицу «Жесты», таблицу «Фразеологизмы». Таблица «Словарные статьи» насчитывает 163 903 записи.

Укрупненно алгоритм семантического анализа состоит из следующих этапов (рис. 1).

- 1. Выделение списка альтернативных лексических значений.
- 2. Обработка фразеологизмов.
- 3. Обработка предлогов.
- 4. Закрепление лексических значений.
- 5. Поиск соответствующих жестов.

Основная задача семантического анализа – построение списка независимых альтернатив и вычисление семантико-грамматического типа каждой альтернативы, входящей в описание. Эти преобразования выполняются в несколько этапов. На первом этапе происходит поиск всех альтернативных значений для каждого слова в предложении. На втором этапе выполняется следующая вспомогательная работа: нумеруются и идентифицируются все альтернативы каждого слова, выносится номер семантического класса слова, из семантического описания выносятся все аргументы. Построенное описание состоит из набора альтернатив, каждая из которых содержит две основные части: морфологическую с указанием семантического класса слова и семантическую. Первая часть альтернативы содержит информацию о том, к каким словам может присоединиться данное слово, вторая часть – какие слова оно может присоединить. При сборке во взаимодействие вступают две рядом стоящие конструкции.

Следующий этап работы семантического модуля заключается в обработке фразеологизмов. В семантическом словаре фразеологизмы определены в отдельные альтернативы. Для уменьшения количества альтернатив необходимо сначала обработать фразеологизмы и затем удалить лишние альтернативы. Это упростит дальнейшую работу модуля.

Процесс обработки предлогов состоит из двух этапов. Сначала осуществляется поиск предложно-падежных сочетаний. Правильный выбор семантического описания предлога зависит от связанного с ним существительного. В конечном результате каждому предлогу соответствует единственное семантическое описание.

Дальнейшие действия анализатора зависят от вида предложения. Выделим два вида предложений: первый – предложения, в составе которых только одно слово имеет несколько альтернатив, второй – в предложении таких слов несколько. В первом случае цикл отсутствует и анализируется только одно слово. Анализ зависит от части речи многозначного слова. На текущий момент проводится анализ: глаголов, имен существительных, имен прилагательных, инфинитивов, причастий, деепричастий, наречий. Алгоритмы в каждом случае различны. Например, алгоритм обработки имени существительного состоит из следующих шагов.

1. Определяется список всех альтернатив обрабатываемого слова посредством обращения к словарю.

2. Делается заключение, является ли данное слово главным или зависимым в словосочетании.

3. На основе словосочетаний, построенных на предыдущих этапах, определяется часть речи второго слова.

4. Выполняется обработка словосочетания в зависимости от части речи второго слова. В данном случае будет выполняться один из пяти алгоритмов анализа.

5. В результате работы алгоритма остается одно значение имени существительного.



Puc.1 – Блок-схема алгоритма семантического анализа *Fig.1* – Semantic analyses flow chart

Во втором случае анализ происходит в цикле. Каждая итерация начинается с проверки количества слов с множеством альтернатив. Предложение просматривается до тех пор, пока у каждого слова не останется только одно семантическое описание. Когда каждому слову соответствует только одно семантическое описа-

ние, то производится поиск соответствующего жеста. Результатом работы системы является список соответствия «слово-жест». Разработан программный комплекс, позволяющий выполнять семантический анализ предложений (рис. 2).

я Семантический анализатор	
Меню Вид 🔛 Запуск Справка	
Исходное предложение	
Жареные лисички были вкусные	
Результат ЖАРЕНЫЙ >> жареный ЛИСИЧКА -элисикка (риб) БЫТЬ -> ущиствовать ВКУСНЫЙ >> вкусный	

Рис. 2 – Основное окно модуля системы семантического анализа

Fig. 2 - Main form of Semantic analyses system

В программном модуле предусмотрена возможность настройки отображения результатов, полученных на разных этапах проводимого анализа. Доступны для просмотра результаты морфологического анализа, список исходных и конечных альтернатив (рис. 3).

Исходное предложение	Морфологический анализ
Жареные лисички были вкусные	Nodes: Nodes: Nodes: NAPEHblE: XKAPEHblR П но одимлин, -> П но имлин, Node I TINCHNKI: TINCHNKA C одихримлин, -> С одихримлин, Node 3 EXTUT: EDT Г датугис-2 бабудин-, -> С атаглисальбудин, Node 3 BOCHblE: BIOCHblR П качио одигилилин, PRPDPETT (KAPEHblE: TINCHNUD) (0, 1) - FACT (TINCHNKI, SUDUT) - (1, 2) S ACT (BIOCHblE: SUDUT) = (3, 2) xapenue[propet] инсинол[ad] (5yg/t Bicycheie[sad]
	Список исходных альтернатив
езультат КАРЕНЫЙ > жареный БЫТЬ > существовать БКСНЫЙ > вкусный	33370 I ЖИРЕНЫЙ I N1:"XAPKAS152317 I S152317 I ЖАРКА I 1 I 63578 I ЛИСИЧКА I N2:"ЛИСА512226 I 0 I 0 I 63578 I ЛИСИЧКА I N2:"ЛИСА512221 I S12422412 1459 I БИГЬ I S1440 I S140 I N1: MOXET, 3050.mcl;B033MOXHOCT551/401/02 1459 I БИГЬ I S1440 I S140 I N1: MOXET, 3050.mcl;B033MOXHOCT551/401/02 1459 I БИГЬ I S1440 I S140 I S140 I N1: MOXET, 3050.mcl;B033MOXHOCT551/401/02 14570 I БЬГЬ I S1401/02 I S121/02 I S12 / 02 I I N1: N2: EOCTORH404 SPR0ex0.mcl 14570 I БЬГЬ I S1401/02 I S120/02 I I I N1: N0 I E COCTORH404 14571 I БЬГЬ I S100/005 I S100/005 I I I I N2: N5 E COCTORH404 14571 I БЬГЬ I S100/105 I S12/132/15 I I I I N1: N I E COCTORH404 14571 I БЬГЬ I S100/105 I S12/132/15 I I I I N1: N I I E COCTORH404 14572 I БЬГЬ I S102/105 I S12/132/15 I I I I N1: N2 I I I N1: N2 10 I БЬ 2/X682/ 14572 I БЬГЬ I S12/32/15 I S12/132/15 I I I I I N2: N3 14572 I БЬГЬ I S12/32/15 I S12/132/15 I I I I I N2: N3 10 I БЬ 2/X682/ 10 I БЬ 2/X682/ 11 I ДРЕРЧЕТЕ 10 I КЪ 2/15/32/15 I S12/132/15 I I I I I N2: N3 10 I КЪ 2/15/32/15 I S12/132/15 I S12/132/17 I I I I I N2: N3 10 I КЪ ДРЕРЧЕТЕ 10 I КЪ ДРЕРЧЕТЕ
	Список конечных альтернатив
	39370 XAPEHUM I NV: "XAPKAS152317 \$152317 XAPKA 1 63578 INC/IVAKA \$12236 0 0 P 15033 BoHTb NV: "CVILECTBOBAHUES11101 \$11101 19060 BV/CHUMI NV: "BV/CS121/03050 S12/109/05 BV/C

Puc. 3 – Дополнительное окно модуля системы семантического анализа *Fig. 3* – Additional form of Semantic analyses system

Последние разработки направлены на увеличение количества жестов и улучшение процесса обработки предложений. Для достижения первой цели были использованы три способа. В первом случае для увеличения количества жестов был использован словарь синонимов. Это позволило переводить большее количество слов звучащего языка на язык жестов. Другой метод заключается в использовании антонимов с отрицанием. Толкование значения слова является третьим способом увеличения количества жестов.

5. Оценка качества работы системы семантического анализа

Для оценки качества перевода необходимо провести сравнительный анализ с системой перевода с русского языка на русский жестовый язык, выполняющей аналогичную задачу. В качестве системы для сравнения была выбрана система «Сурдофон». Цель системы «Сурдофон» заключается в создании современных технических средств для коммуникаций глухих и слышащих людей, необходимые для общения, образования и развития. Рассмотрим фрагмент набора предложений, разобранных двумя системами и сравним полученные результаты (см. таблицу).

Омоним	Значения	Предложение	Семантический анализатор	Сурдофон
	1) Лиса	Лисичка убежала	1) Лиса	1) Лиса
Писицка	Лисичка	в лес		
Лисичка	(гриб)	Жареные лисички	2) Лисичка (гриб)	1) Лиса
		оыли вкусные		
Коса	 Коса (при- ческа) 	Девушка заплетала косу	1) Коса (прическа)	 Коса (при- ческа)
	2) Отмель3) Коса (ору- дие)	Девушка шагала по косе	2) Отмель	1) Коса (при- ческа)
Купить	 Покупка Обмонити 	Никита купил у Андрея книгу	1) Покупка	1) Покупка
	2) Oomany15	Никита купил Андрея	2) Обмануть	1) Покупка
	1) Головной убор 2) Растяпа	Мама надела	 Головной убор 	1) Головной
Шлапо		шляпу	· • •	убор
шляпа		Шляпа проворонил	2) Растяпа	1) Головной
		автобус		убор

Анализ предложений в системе семантического анализа и в системе «Сурдофон» Sentence Analyses in Semantic Analyses System and «Surdophone»

В первом столбце приведены примеры исходных предложений. Во втором столбце выделен омоним в предложении. Далее представлен список возможных значений слова. В четвертом и пятом столбцах отражены результаты проведенного анализа.

Проанализировав результаты работы двух систем, придем к выводу, что система «Сурдофон» только в 30 % случаев правильно определяет значения слов. В то же время система семантического анализа правильно определяет значение слова в 75 % случаев. Таким образом, более качественный перевод предоставляется разработанной системой семантического анализа. Для достижения наилучших результатов планируется провести доработку модуля и внедрить его в систему «Сурдофон».

6. Перевод текста на жестовую речь

Рассмотрим модуль перевода русского текста на РЖЯ. На данном этапе будем опираться на полученные ранее результаты лингвистического исследования русского жестового языка в части особенностей лексики, словообразования, морфологии, синтаксиса и семантики жестового языка глухих и слабослышащих граждан Российской Федерации, которые используются при разработке компьютерного сурдопереводчика русского языка. Цель описываемых синтактико-семантических преобразований – упрощение текста русского языка за счет разбиения предложений, представляющих сложные ситуации, на последовательности более простых преобразований. Единицей, над которой осуществляются преобразования, является предложение, содержащее полное причастие.

В результате применения каждого правила преобразования исходное предложение разбивается на две части, каждая из которых обозначает меньшее число ситуаций, чем исходное предложение и в этом смысле является более простым по сравнению с ним. В ходе преобразования исходное предложение подвергается определенным дополнительным модификациям. В частности, причастие заменяется соответствующим глаголом. Данное преобразование применяется к обоим согласованным причастиям. Для указания на идентичность упоминаемых объектов вводятся местоимения.

Предложение разделяется на три части: первая – начало предложения, вторая – выделенная синтаксическая конструкция, третья – конец предложения. В предложении «Плеск дождевых капель, ниспадавших на его поверхность, далеко относил гул» второй фрагмент соответствует части «Плеск капель, ниспадавших на его поверхность».

Правила могут заменять или устранять некоторые части исходного текста, а также изменять порядок следования некоторых частей текста. Общее условие применимости: правила данного типа применимы только в том случае, если в результате предшествующего (морфологического и синтаксического) анализа выделена группа «причастие и существительное», в которой причастие является полным. Данный тип правил представлен шестью вариантами (два правила для причастий действительного залога и четыре правила для причастий страдательного залога). Например, в результате применения правила предложение «Плеск дождевых капель, ниспадавших на его кипящую поверхность, далеко относил гул» будет разделено на два более простых: [дождевые капли ниспадали на его поверхность], [плеск этих капель далеко относил гул].

Нужно заметить, что возможен и перевод на основе базового порядка следования жестов в предложении. Произвольный русский текст (предложение) вводится в программу и подвергается морфологическому, синтаксическому и семантическому анализу. Затем формируется стандартная схема предложения на разговорном русском жестовом языке: подлежащее, определение, обстоятельство, сказуемое, дополнение.

Данная схема последовательно применяется для простых высказываний. Если слову в предложении можно поставить жест, то оно заменяется на гамбургскую систему нотаций для данного жеста. В противном случае перевод осуществляется посредством дактильной азбуки в данной системе нотаций.

Заключение

В данной работе рассмотрена система компьютерного перевода с русского языка на русский жестовый язык. Проведен анализ существующих систем компьютерного сурдоперевода. Описана технология компьютерного перевода русской

речи на русский жестовый язык. Впервые разработан блок анализа исходного текста с учетом семантической составляющей русского языка на основе словаря В.А. Тузова. Разработаны и реализованы алгоритмы семантического анализа для многозначных слов. Приведена схема семантического анализа имени существительного. Анализ текста завершается в случае, когда у каждого слова остается только одно семантическое описание, таким образом решается проблема многозначности. К наиболее приоритетным направлениям модификации модуля семантического анализа можно отнести следующие: расширение базы жестов, осуществление разбора сложных предложений. Проведен сравнительный анализ правильности определения значений слов в разработанной системе семантического анализа с системой «Сурдофон». Значения слов более качественно определяются в системе семантического анализа. Перевод текста на жестовую речь осуществляется с помощью анализа синтаксических конструкций языка перевода и целевого языка. Разработан модуль для определения синтаксических конструкций. В будущем планируется внедрить разработанные технологии в систему «Сурдофон».

ЛИТЕРАТУРА

- Владение языками населением Российской Федерации [Электронный pecypc]. URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/Documents/Vol4/pub-04-05.pdf (дата обращения: 17.04.2017).
- 2. **Прозорова Е.В**. Российский жестовый язык как предмет лингвистического исследования // Вопросы языкознания. 2007. № 1. С. 44–61.
- Andre E. The generation of multimedia presentations // A Handbook of Natural Language Processing: techniques and applications for the processing of language / eds.: R. Dale, H. Moisl, H. Somers. – New York: Marcel Dekker, 2000. – P. 305–327.
- Foster M.E., White M., Setzer A. Multimodal generation in the COMIC dialogue system // Proceedings of the ACL on Interactive Poster and Demonstration Sessions, 12–14 June 2005. – Morristown, NJ: Association for Computational Linguistics, 2005. – P. 40–48.
- Kopp S., Tepper P., Cassell J. Towards integrated microplanning of language and iconic gesture for multimodal output // Proceedings of 6th International Conference on Multimodal Interfaces, 6–9 Augast 2004. – State College, USA, 2004. – P. 136–144.
- Задняя камера Intel RealSense 3D R200 [Электронный ресурс]. URL: http://geektimes. ru/company/intel/blog/259584/ (дата обращения: 17.04.2017).
- Гриф М.Г. Методы и технологии компьютерного сурдоперевода: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 71 с.
- Veale T., Conway A. Cross modal comprehension in ZARDOZ: an English to sign-language translation system // Proceedings of the Seventh International Workshop on Natural Language Generation INLG'94. – Kennebunkport, Maine, 1994. – P. 249–252.
- Zhao L., Kipper K., Schuler W. A machine translation system from English to American sign language // Lecture Notes in Computer Science. – 2000. – Vol. 1934. – P. 54–67.
- Wakefield M. VisiCAST Milestone: final report N IST-1999-10500 / Information Societies Technology. – [S. 1.], 10 December 2002. – 97 p.
- Сокирко А. Семантические словари в автоматической обработке текста: по материалам системы Диалинг: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.17 / Российский государственный гуманитарный университет. – М., 2000. – 120 с.
- 12. **Тузов В.А**. Компьютерная семантика русского языка: учебное пособие. СПб.: СПбГУ, 2003. 391 с.

A COMPUTER MODEL OF THE RUSSIAN SIGN LANGUAGE

Grif M.G., Kozlov A.N., Manueva Yu.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper analyzes existing computer sign language interpretation systems, their advantages and disadvantages being revealed. The technology of computer translation from sounding Russian into the Russian sign language is considered. The main steps of text analysis are described: morphological, syntactic and semantic analysis. Morphological and syntactic analysis is carried out on the basis of Dialing system. A module of semantic analysis is developed. The main objective of the module is to solve the problem of homonyms. The semantic module work is based on V. Tuzov dictionary. The work module is completed when only one meaning corresponds to each word and the corresponding gesture is determined. The paper describes a semantic analysis scheme of the noun. A comparative analysis of the correctness of word meanings in the developed semantic analysis module with the Surdophone system is carried out. A more qualitative definition of word meanings is made by the semantic analysis module. Translations of texts the in Sign language are carried out by analyzing the syntax construction of the source language and the target language. On the basis of this analysis the correspondence of syntax constructions is determined, in which complex sentences are devided into simple ones. During the initial conversion a sentence undergoes certain additional modifications. In particular, the participle is replaced the corresponding verb. An appropriate library to determine the syntax is developed.

Keywords: Russian sign language, computer sign language interpretation, semantic analysis, syntax constructions, recognizers of sign language.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-46-57

REFERENCES

- 1. *Vladenie yazykami naseleniem Rossiiskoi Federatsii* [Languages population of the Russian Federation]. Available at: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/Documents/ Vol4/pub-04-05.pdf (accessed 17.04.2017).
- Prozorova E.V. Rossiiskii zhestovyi yazyk kak predmet lingvisticheskogo issledovaniya [Russian sign language as an object of linguistic research]. *Voprosy yazykoznaniya – Problems of Linguistics*, 2007, no. 1, pp. 44–61.
- 3. Andre E. The generation of multimedia presentations. *A Handbook of Natural Language Processing: techniques and applications for the processing of language.* New York, Marcel Dekker, 2000, pp. 305–327.
- Foster M.E., White M., Setzer A. Multimodal generation in the COMIC dialogue system. *Proceedings of the ACL on Interactive Poster and Demonstration Sessions*, 12–14 June 2005. Morristown, NJ, Association for Computational Linguistics, 2005, pp. 40–48.
- Kopp S., Tepper P., Cassell J. Towards integrated microplanning of language and iconic gesture for multimodal output. *Proceedings of 6th International Conference on Multimodal Interfaces*, State College, USA, 6–9 August 2004, pp. 136–144.
- Zadnyaya kamera Intel RealSense 3D R200 [Back camera Intel RealSense 3D R200]. Available at: http://geektimes.ru/company/intel/blog/259584/ (accessed 17.04.2017).
- Grif M.G. Metody i tekhnologii komp'yuternogo surdoperevoda [Methods and techniques of computer sign language]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012. 71 p.
- 8. Veale T., Conway A. Cross modal comprehension in ZARDOZ: an English to sign-language translation system. *Proceedings of the Seventh International Workshop on Natural Language Generation INLG* '94, Kennebunkport, Maine, 1994, pp. 249–252.
- 9. Zhao L., Kipper K., Schuler W.A. Machine translation system from English to American sign language. *Lecture Notes in Computer Science*, 2000, vol. 1934, pp. 54–67.
- Wakefield M. VisiCAST Milestone: final report no. IST-1999-10500. Information Societies Technology, 10 December 2002. 97 p.

- 11. Sokirko A. Semanticheskie slovari v avtomaticheskoi obrabotke teksta: po materialam sistemy Dialing. Diss. kand. tekhn. nauk [Semantic dictionaries in automatic text processing: based on materials of the DIALING system. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2000. 120 p.
- Tuzov V.A. Komp'yuternaya semantika russkogo yazyka [Computer semantics of the Russian language]. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2003. 391 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Гриф Михаил Геннадьевич – родился в 1959 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: проектирование и оптимизация процесса функционирования человеко-машинных систем, системы искусственного интеллекта, лингвистические и технологические аспекты разработки компьютерного сурдопереводчика. Опубликовано более 200 научных работ. (Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: grifmg@mail.ru).

Grif Mikhail Gennadievich (b. 1959) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the automation control systems department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on computer sign language translation systems for the deaf, designing and optimization of manmachine systems, AI systems. He is author of more than 200 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: grifmg@mail.ru).



Козлов Андрей Николаевич – родился в 1990 году, аспирант кафедры автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: системы человеко-машинного взаимодействия. Опубликовано 3 научные работы. (Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Е-mail: andrey.n.kozlov@gmail.com).

Kozlov Andrei Nikolaevich (b.1990) – postgraduate student, department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on human-machine communication systems. He is the author of 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail:andrey.n.kozlov@gmail.com).



Мануева Юлия Сергеевна – родилась в 1991 году, аспирант кафедры автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: компьютерный сурдопереводчик. Опубликовано 14 научных работ. (Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: juleno4eknot1@rambler.ru).

Manueva Yulia Sergeevna (b.1991), postgraduate student, department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on computer sign language translation systems. She is the author of 14 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: juleno4eknot1@rambler.ru).

Статья поступила 17 апреля 2016 г. Received April 17, 2016

To Reference:

Grif M.G., Kozlov A.N., Manueva Yu.S. Komp'yuternaya model' russkogo zhestovogo yazyka [A computer model of the Russian sign language]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 46–57. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-46-57

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

январь-март

№ 1(34)

= ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ =

УДК 519.63: 621.37:621.3.049.76

2017

ВЛИЯНИЕ НЕПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЭМС В РЕЖИМЕ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ЗАРЯДОМ

В.П. Драгунов, Р.Е. Синицкий, Д.Е. Киселёв

Новосибирский государственный технический университет

Одним из наиболее существенных факторов, определяющих характеристики МЭМС, являются электромеханические взаимодействия. Поэтому большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью.

В данной работе представлены результаты исследований влияния непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия в МЭМС. Анализ проведен для двух наиболее распространенных типов МЭМС – с двухэлектродной и встречно-штыревой (гребенчатой) конструкцией электродов в режиме с контролируемым зарядом. Получены выражения для расчета электростатических сил притяжения, потенциальной энергии, критического заряда и величины смещения подвижного электрода при различных наклонах электродов в режиме с контролируемым зарядом. Монструкцией электродных сил притяжения, потенциальной энергии, критического заряда и величины смещения подвижного электрода при различных наклонах электродов в режиме с контролируемым зарядом. Обнаружено, что в режиме работы с контролируемым зарядом в двухэлектродных МЭМС с непараллельными электродами возникает pull-in эффект. Рассмотрено влияние силы веса подвижного электрода на электромеханические взаимодействия в двухэлектродных МЭМС. Показано, что в режиме с контролируемым зарядом в МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов при увеличении наклона электродов величина критического заряда η_{cr} сначала увеличивается, а затем уменьшается. Установлено, что максимальное значение критического заряда в этом случае достигает-

ся при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение η_{cr} в максимуме равно 1,17.

Ключевые слова: МЭМС, преобразование энергии, эффект схлопывания, режим работы с контролируемым зарядом, микромеханический конденсатор, электростатическая сила, диапазон контролируемого смещения электрода, критические значения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71

Введение

В настоящее время одной из наиболее быстро развивающихся отраслей народного хозяйства остается микросистемная техника (МСТ). Этому способствуют высокая надежность и хорошие технико-экономические показатели устройств, создаваемых в рамках МСТ с использованием технологий микроэлектроники. Потребности в таких изделиях неуклонно возрастают, а области применения стремительно расширяются: микроманипуляторы, микрорезонаторы, микророботы, радиочастотные микропереключатели, геофоны; микротехнологии, биотехнологии, космические исследования, метрология, полупроводниковая промышленность и т. д. [1–9]. Изделия МСТ, благодаря своим малым размерам и низкой стоимости, проникают и на рынок товаров широкого потребления: камеры, смартфоны и другие устройства (гаджеты).

Большую часть изделий МСТ составляют микроэлектромеханические системы (МЭМС), в которых реализуется целая совокупность разнообразных связей и взаимодействий: механических, электрических, оптических и т. д.

В настоящее время идут непрерывный поиск и разработка новых все более совершенных МЭМС. При этом их схемотехника, конструкции и технологии изго-

© 2017 В.П. Драгунов, Р.Е. Синицкий, Д.Е. Киселёв

товления постоянно усложняются и требуют разработки все более совершенных моделей, используемых при проектировании и оптимизации МЭМС.

Одним из наиболее существенных факторов, определяющих характеристики МЭМС, являются электромеханические взаимодействия. Эти взаимодействия в первую очередь определяют диапазоны управляемого перемещения подвижных элементов МЭМС, диапазоны перестройки емкости, максимально достижимые емкости, допустимые напряжения и заряды. Поэтому возникает необходимость в оценке электромеханических взаимодействий, а значит, и в разработке математических моделей, все более адекватно учитывающих особенности этих взаимодействий в реальных устройствах.

Согласно литературным данным при анализе электромеханических взаимодействий в большинстве случаев используют модели МЭМС с параллельными электродами. Однако реально существующие технологии не позволяют гарантировать параллельность электродов, тем более в условиях серийного производства. При этом непараллельность электродов может появляться из-за технологических погрешностей при изготовлении и сборке устройства [10, 11], а также в процессе эксплуатации при изменении направления движения системы из-за появления вращающих моментов [12].

В [11] мы рассмотрели влияние непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым напряжением. В данной работе проводится исследование влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым зарядом.

1. Двухэлектродная конструкция

В качестве объекта исследования влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной конструкцией электродов использовали двухэлектродную модель переменного конденсатора, включающую два плоских непараллельных электрода (рис. 1) длиной a, шириной b, наименьшим начальным межэлектродным зазором d_0 и наибольшим начальным межэлектродным зазором d_0 и наибольшим начальным межэлектродным зазором d_0 и наибольшим начальным межэлектродным зазором $d_0 + \Delta$. В данной конструкции подвижный электрод, закрепленный на упругом подвесе, может перемещаться относительно неподвижного вдоль оси y. В расчетах также принимали, что при смещении подвижного электрода угол наклона α не изменяется.

Полагая, что в квазистатическом случае на электроды действуют только возвращающая сила упругости подвеса и электрическая сила притяжения между разноименно заряженными электродами, можно показать, что в случае с непараллельными электродами в режиме с контролируемым зарядом выражение для потенциальной энергии системы может быть представлено в виде

$$W = \frac{1}{2}ky^2 + \frac{Q^2}{2C},$$
 (1)

где k – жесткость упругого подвеса; y – величина смещения подвижного электрода от начального положения, когда минимальный межэлектродный зазор равняется d_0 ; Q – заряд на электродах конденсатора и C – емкость конденсатора с непараллельными электродами.



Рис. 1 – Двухэлектродная модель МЭМ конденсатора с непараллельными электродами:

I – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод; 3 – упругие подвесы конструкции

Fig. 1 – Two-electrode model of the MEM capacitor with non-parallel electrodes:

1-movable electrode; 2-fixed electrode; 3-elastic suspensions of construction

В нашем случае, пренебрегая особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами), зависимость емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от величины смещения подвижного электрода при малых α может быть представлена в виде

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_a b}{\Delta} \ln\left(\frac{\Delta + d_0 - y}{d_0 - y}\right),\tag{2}$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами; ϵ_0 – электрическая постоянная.

С учетом (2) выражение (1) в безразмерных переменных принимает вид

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{y}^2}{2} + \frac{\lambda \tilde{\Delta}}{\ln\left(1 + \frac{\tilde{\Delta}}{1 - \tilde{y}}\right)},\tag{3}$$

где $\tilde{W} = W / (kd_0^2)$, $\tilde{y} = y/d_0$, $\lambda = Q_{com}^2 / (2\varepsilon_0 \varepsilon_a b k d_0)$, $\tilde{\Delta} = \Delta/d_0$.

На рис. 2, *a* и δ приведены зависимости потенциальной энергии \tilde{W} от относительного смещения подвижного электрода \tilde{y} , рассчитанные с использованием (3). Рис. 2, *a* – для конденсатора с параллельными электродами при нескольких значениях приведенного заряда λ , рис. 2, δ – для конденсатора с непараллельными электродами при нескольких значениях $\tilde{\Delta}$ и неизменном заряде.

Из рис. 2, *а* видно, что в случае конденсатора с параллельными электродами при увеличении заряда на электродах конденсатора точка устойчивого равновесия, соответствующая минимуму потенциальной энергии, монотонно смещается от $\tilde{y} = 0$ до $\tilde{y} = 1$. Таким образом, в данном случае диапазон контролируемого смещения подвижного электрода простирается от 0 до d_0 .



Рис. 2 – Зависимости приведенной потенциальной энергии \tilde{W} от относительного смещения подвижного электрода \tilde{y} :

a – конденсатор с параллельными электродами $\tilde{\Delta} = 0$ и $\lambda = 0$ –1, 0,25–2, 0,5–3, 1–4, 1,5–5; δ – конденсатор с непараллельными электродами $\lambda = 0,5$ и $\tilde{\Delta} = 0$ –1, $\tilde{\Delta} = 1$ –2, $\tilde{\Delta} = 1,5$ –3, $\tilde{\Delta} = 2$ –4, $\tilde{\Delta} = 2,5$ –5

Fig. 2 – Dependences of the normalized potential energy \tilde{W} on the relative offset of a movable electrode \tilde{y} :

a – the capacitor with parallel electrodes $\tilde{\Delta} = 0$ and $\lambda = 0-1$, 0,25–2, 0,5–3, 1–4, 1,5–5; *b* – the capacitor with non-parallel electrodes $\lambda = 0,5$ and $\tilde{\Delta} = 0-1$, $\tilde{\Delta} = 1-2$, $\tilde{\Delta} = 1,5-3$, $\tilde{\Delta} = 2-4$, $\tilde{\Delta} = 2,5-5$

В случае же конденсатора с непараллельными электродами (рис. 2, δ) при увеличении наклона электродов точка устойчивого равновесия (минимума энергии) сначала тоже смещается в область больших \tilde{y} , а затем вообще исчезает. Это связано с тем, что при непараллельных электродах электростатическая сила

$$F_{Q} = F_{0,Q} \frac{\tilde{\Delta}^{2}}{(1-\tilde{y})(1-\tilde{y}+\tilde{\Delta}) \left[\ln\left(1+\frac{\tilde{\Delta}}{1-\tilde{y}}\right) \right]^{2}}, \qquad (4)$$

здесь $F_{0,Q} = Q^2 / (2\varepsilon_0 \varepsilon ab)$ – электростатическая сила притяжения, действующая в конденсаторе с двумя параллельными электродами и межэлектродным зазором d_0 , при увеличении угла наклона электродов и неизменном заряде увеличивается. В результате для данного заряда при некотором угле наклона электродов возвращающая сила упругого подвеса уже не может компенсировать электростатическую силу притяжения, и подвижный электрод начинает неконтролируемо смещаться к неподвижному до их соприкосновения (pull-in эффект).

На рис. 3 приведены зависимости нормированного смещения подвижного электрода \tilde{y} от величины приведенного заряда λ , рассчитанные для различных наклонов электродов. При этом полагали, что в квазистатическом случае на электроды действуют только возвращающая сила упругости подвеса и электрическая сила притяжения.

Видно, что при увеличении заряда смещение подвижного электрода сначала монотонно увеличивается, пока не достигнет критической точки (на рис. 3 отме-

чено жирными точками), характеризующейся значениями критического смещения \tilde{y}_{cr} и критического приведенного заряда λ_{cr} . При дальнейшем увеличении заряда подвижный электрод начнет неуправляемо смещаться к неподвижному до их соприкосновения, что и следовало из предыдущего анализа. Таким образом, в случае непараллельных электродов в режиме с контролируемым зарядом имеет место pull-in эффект в отличие от случая с параллельными электродами, где pull-in эффект не имеет места.



Рис. 3 – Зависимость нормированного смещения подвижного электрода \tilde{y} от величины приведенного заряда λ для различных наклонов электродов:

$$1 - \tilde{\Delta} = 0; \ 2 - \tilde{\Delta} = 0, 1; \ 3 - \tilde{\Delta} = 0, 5; \ 4 - \tilde{\Delta} = 1; \ 5 - \tilde{\Delta} = 2; \ 6 - \tilde{\Delta} = 4;$$
$$7 - \tilde{\Delta} = 6; \ 8 - \tilde{\Delta} = 8$$

Fig. 3 – Dependence of the normalized offset of a movable electrode \tilde{y} on value of the normalized charge λ for different inclinations of electrodes:

$$\begin{split} I - \tilde{\Delta} &= 0; \ 2 - \tilde{\Delta} &= 0, 1; \ 3 - \tilde{\Delta} &= 0, 5; \ 4 - \tilde{\Delta} &= 1; \ 5 - \tilde{\Delta} &= 2; \ 6 - \tilde{\Delta} &= 4; \\ 7 - \tilde{\Delta} &= 6; \ 8 - \tilde{\Delta} &= 8 \end{split}$$

Анализ показывает, что при очень медленном увеличении заряда зависимость значения критического смещения \tilde{y}_{cr} подвижного электрода относительно неподвижного от наклона электродов определяется выражением

$$\left(1+\tilde{\Delta}-2\tilde{\Delta}\tilde{y}_{cr}-4\tilde{y}_{cr}+3\tilde{y}_{cr}^{2}\right)\ln\left(1+\frac{\tilde{\Delta}}{1-\tilde{y}_{cr}}\right)+2\tilde{\Delta}\tilde{y}_{cr}=0.$$
(5)

Используя (5), можно найти значение \tilde{y}_{cr} для заданного $\tilde{\Delta}$ лишь численно. Для оценки значения критического смещения подвижного электрода относительно неподвижного от наклона электродов можно предложить следующее выражение:

$$\tilde{y}_{cr,O} = 1 + 0,0637\tilde{\Delta} - \sqrt{0,0637\tilde{\Delta}(1+0,036\tilde{\Delta})},$$
(6)

аппроксимирующее зависимость критического смещения от $\tilde{\Delta}$ для $0 < \tilde{\Delta} \le 7$ с погрешностью, не превышающей 1 %.

В свою очередь выражение для оценки критического заряда, при превышении которого электроды начнут неуправляемо сближаться до соприкосновения (pull-in эффект), принимает вид

$$Q_{pi} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} \ln \left(1 + \frac{\tilde{\Delta}}{1 - \tilde{y}_{cr}} \right) \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_0 \delta d_0 k \tilde{y}_{cr} (1 - \tilde{y}_{cr}) (1 + \tilde{\Delta} - \tilde{y}_{cr})} .$$
(7)

Выражения (5)–(7) определяют диапазоны управляемого смещения подвижного электрода и допустимых зарядов на электродах конденсатора.

В ряде случаев при разработке МЭМС возникает необходимость учета силы веса *F*₀ движущихся частей системы [13, 14].

Полагая, что в квазистатическом случае на электроды действуют возвращающая сила упругости подвеса, электрическая сила притяжения между разноименно заряженными электродами и сила веса F_0 , можно показать, что в случае с непараллельными электродами в режиме с контролируемым зарядом уравнение равновесия (баланса сил) может быть представлено в виде

$$ky - F_{0,Q} \frac{\Delta^2}{(d_0 - y)(\Delta + d_0 - y) \left[\ln\left(\frac{\Delta + d_0 - y}{d_0 - y}\right) \right]^2} + F_0 = 0.$$
(8)

В (8) *F*₀ принимается положительной, если эта сила стремится увеличить межэлектродный зазор, и отрицательной, если стремится уменьшить межэлектродный зазор.

Анализ показывает, что заменой переменных d_0 на $d^* = d_0 + F_0/k$ и *у* на $y^* = y + F_0/k$ уравнение (8) сводится к соответствующему уравнению для аналогичной системы, но с невесомым подвижным электродом:

$$ky^{*} - F_{0,Q} \frac{\Delta^{2}}{(d^{*} - y^{*})(\Delta + d^{*} - y^{*})\left[\ln\left(\frac{\Delta + d^{*} - y^{*}}{d^{*} - y^{*}}\right)\right]^{2}} = 0$$

На рис. 4 приведены зависимости нормированного смещения подвижного электрода \tilde{y} от величины приведенного заряда λ , рассчитанные с использованием (8) для $\tilde{F} = F_0/kd_0 = 0, 0,2$ и -0,2 при $\tilde{\Delta} = 0$ и 0,5.

Видно, что у двухэлектродной электромеханической системы с изменяющимся межэлектродным зазором учет силы веса сводится лишь к смещению начала отсчета.

В свою очередь выражения для оценки величин критического смещения и заряда с учетом веса подвижного электрода, при превышении которых электроды начнут неуправляемо сближаться до соприкосновения (pull-in эффект), в новых переменных v^* и d^* принимают вид (5) и (7) соответственно.



Puc. 4 – Зависимость нормированного смещения подвижного электрода \tilde{y} от величины приведенного заряда λ для различных наклонов электродов $\tilde{F} = -0.2$, $\tilde{\Delta} = 0 - 1$, $\tilde{\Delta} = 0.5 - 2$; $\tilde{F} = 0$, $\tilde{\Delta} = 0 - 3$, $\tilde{\Delta} = 0.5 - 4$; $\tilde{F} = 0.2$, $\tilde{\Delta} = 0 - 5$, $\tilde{\Delta} = 0.5 - 6$

Fig. 4 – Dependence of the normalized offset of a movable electrode \tilde{y} on value of the normalized charge λ for different inclinations of electrodes $\tilde{F} = -0.2$, $\tilde{\Delta} = 0 - 1$, $\tilde{\Delta} = 0.5 - 2$; $\tilde{F} = 0$, $\tilde{\Delta} = 0 - 3$, $\tilde{\Delta} = 0.5 - 4$; $\tilde{F} = 0.2$, $\tilde{\Delta} = 0 - 5$, $\tilde{\Delta} = 0.5 - 6$

2. Гребенчатая конструкция электродов

Помимо двухэлектродной конструкции электродов в МЭМС применяются переменные конденсаторы с гребенчатой (встречно-штыревой) конструкцией электродов (рис. 5). В процессе изготовления такого конденсатора электроды могут приобретать непараллельную форму в результате особенностей технологического процесса травления кремния [10]. Как правило, для этих целей используется глубокое реактивное ионное травление – «Bosh process» (DRIE).

В качестве объекта исследования применялась гребенчатая конструкция переменного МЭМ конденсатора, состоящая из двух плоских непараллельных неподвижных и одного подвижного электродов длиной a, высотой b, наименьшим и наибольшим начальным межэлектродным зазором в отсутствие заряда на электродах, соответственно d_0 и $d_0 + 2\Delta$. Подвижный электрод может перемещаться относительно неподвижных. Для дальнейших расчетов примем неизменность угла наклона электродов α при их смещении.

В случае пренебрежения особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами) зависимость полной емкости конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов и непараллельными электродами от геометрических размеров может быть рассчитана с помощью выражения [15]

$$C_{com} = \varepsilon_0 \varepsilon_{ab} \frac{1}{2\Delta} \left[\ln \left(\frac{d_0 + 2\Delta - x}{d_0 - x} \right) + \ln \left(\frac{d_0 + 2\Delta + x}{d_0 + x} \right) \right].$$
(9)



Рис. 5 – Конструкция гребенчатого МЭМ конденсатора с непараллельными электродами:

1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод. Вид сверху (а) и сечение (б). Движение осуществляется вдоль оси х

Fig. 5 – The design of the interdigitated MEM capacitor with non-parallel electrodes: l – movable electrode; 2 – fixed electrode. Top view (*a*) and section (*b*). The movement is carried out along the x – axis

При отсутствии наклона электродов (9) сводится к известному соотношению

$$C_0 = 2\varepsilon_0 \varepsilon ab \frac{d_0}{d_0^2 - x^2}.$$

В данном случае выражение для потенциальной энергии конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов имеет вид

$$W = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{Q_{com}^2}{2C_{com}},$$
 (10)

где Q_{com} – полный заряд на электродах конденсатора.

С учетом (9) выражение (10) в безразмерных переменных принимает вид

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{x}^2}{2} + \frac{2\lambda\tilde{\Delta}}{\ln\left(\frac{(1+2\tilde{\Delta})^2 - \tilde{x}^2}{1-\tilde{x}^2}\right)},\tag{11}$$

где $\tilde{W} = W / (kd_0^2)$, $\tilde{x} = x/d_0$, $\lambda = Q_{com}^2 / (2\varepsilon_0 \varepsilon abkd_0)$, $\tilde{\Delta} = \Delta / d_0$.

На рис. 6, *а* и *б* приведены зависимости потенциальной энергии \tilde{W} от относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} , рассчитанные с использованием (11) для конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов. Рис. 6, *а* – для конденсатора с параллельными электродами при нескольких значениях приведенного заряда λ , рис. 6, *б* – для конденсатора с непараллельными электродами при нескольких значениях λ и $\tilde{\Delta} = 1$.

Из рис. 6, а видно, что в случае конденсатора с параллельными электродами при увеличении заряда на электродах экстремум на зависимости потенциальной

энергии от относительного смещения подвижного электрода все время остается в точке $\tilde{x} = 0$, а значение потенциальной энергии в точке экстремума растет. Отметим также, что при увеличении заряда от $\lambda = 0$ до $\lambda = 1$ эта точка является точкой устойчивого равновесия, а при $\lambda > 1$ она становится точкой неустойчивого равновесия. В результате при $\lambda > 1$ в такой системе появляется pull-in эффект. Таким образом, в данном случае диапазон допустимых зарядов на электродах конденсатора простирается от 0 до $\lambda = 1$.

В случае конденсатора с непараллельными электродами (рис. 6, δ) при увеличении заряда на электродах конденсатора точка устойчивого равновесия (минимума энергии) тоже все время остается в точке $\tilde{x} = 0$, а значение потенциальной энергии в точке экстремума монотонно растет. Кроме того, при $\tilde{x} \neq 0$ появляются дополнительные экстремумы, соответствующие точкам неустойчивого равновесия. По мере увеличения заряда на электродах конденсатора все три экстремума сближаются и при некотором критическом значении приведенного заряда λ_{cr} сливаются. При дальнейшем увеличении заряда на электродах конденсатора остается только одна точка неустойчивого равновесия при $\tilde{x} = 0$. Таким образом, в данном случае диапазон допустимых зарядов на электродах конденсатора простирается от 0 до λ_{cr} .



Рис. 6 – Зависимости приведенной потенциальной энергии \tilde{W} от относительного смещения подвижного электрода \tilde{x} :

a – конденсатор с параллельными электродами $\tilde{\Delta}$ = 0 и λ = 0 − 1, 0,25 − 2, 0,5 − 3, 0,75 − 4, 1 − 5, 1,25 − 6; 1,5 − 7; $\tilde{\sigma}$ – конденсатор с непараллельными электродами λ = 0, $\tilde{\Delta}$ = 0 − 1; $\tilde{\Delta}$ = 1, и λ = 0,25 − 2, 0,5 − 3, 0,75 − 4, 1 − 5, 1,25 − 6, 1,5 − 7

Fig. 6 – Dependences of the normalized potential energy \tilde{W} on the relative offset of a movable electrode \tilde{x} :

a – the capacitor with parallel electrodes $\hat{\Delta} = 0$ and $\lambda = 0 - 1, 0.25 - 2, 0.5 - 3, 0.75 - 4, 1 - 5, 1,25 - 6;$ 1,5 – 7; *b* – the capacitor with non-parallel electrodes $\lambda = 0, \tilde{\Delta} = 0 - 1; \tilde{\Delta} = 1, \text{ and } \lambda = 0,25 - 2, 0,5 - 3, 0,75 - 4, 1 - 5, 1,25 - 6, 1,5 - 7$

Для анализа зависимости величины критического заряда от относительного наклона электродов $\tilde{\Delta}$ воспользуемся уравнением равновесия (баланса сил). При учете только возвращающей силы упругого подвеса и электростатической силы для конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов и непараллельными электродами в квазистатическом случае уравнение равновесия принимает вид

$$-kx + \varepsilon_0 \varepsilon_{ab} \frac{Q_{com}^2}{2\Delta C_{com}^2} \left[\frac{x}{d_0^2 - x^2} - \frac{x}{(d_0 + 2\Delta)^2 - x^2} \right] = 0.$$
(12)

Исходя из симметрии задачи: при величине заряда на электродах, равном критическому Q_{pi} , подвижный электрод будет иметь только одну точку равновесия при x = 0. В результате из (12) имеем

$$Q_{pi} = \pm \frac{1}{\tilde{\Delta}} (1 + 2\tilde{\Delta}) \ln(1 + 2\tilde{\Delta}) \times \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b k d_0}{2(1 + \tilde{\Delta})}}.$$
 (13)

При отсутствии наклона (13) преобразуется к виду

$$Q_{pi,0} = \pm \sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon a b k d_0}.$$
 (14)

На рис. 7 приведена зависимость безразмерного критического заряда $\eta_{cr} = Q_{pi}/Q_{pi,0}$ от величины $\tilde{\Delta}$. Согласно (13) и (14), данная зависимость имеет максимум при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение η_{cr} в максимуме равно 1,17.



Fig. 7 – Dependence of the dimensionless critical charge η_{cr}

on value $\tilde{\Delta}$

Таким образом, зависимость Q_{pi} от относительного наклона электродов носит немонотонный характер. Отметим также: несмотря на то что общий заряд на электродах в данном случае сохраняется, по площади электродов он распределяется неравномерно. Увеличение угла наклона электродов приводит к увеличению градиента заряда и изменяет электростатическое воздействие. Отметим также, что поверхностная плотность заряда будет прямо пропорциональна напряжению, до которого в начальный момент времени была заряжена система.

Заключение

Исследовано влияние непараллельности электродов на электромеханические взаимодействия для МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым зарядом.

Получены выражения для расчета электростатических сил, критического заряда и величины смещения подвижного электрода при различных наклонах электродов.

Показано, что в режиме с контролируемым зарядом в двухэлектродных МЭМС при увеличении относительного наклона электродов электростатическая сила увеличивается. Обнаружено, что в двухэлектродных МЭМС с непараллельными электродами возникает pull-in эффект. Установлено, что в этом случае при увеличении наклона электродов величина критического заряда уменьшается.

Показано, что в МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов в режиме с контролируемым зарядом зависимость величины критического заряда от относительного наклона электродов имеет немонотонный характер. Найдено, что макси-

мальное значение критического заряда в этом случае достигается при $\tilde{\Delta} \cong 1,354$, а значение η_{cr} в максимуме равно 1,17.

ЛИТЕРАТУРА

- Oudenhoven J.F.M., Vullers R.J.M., Schaijk R. A review of the present situation and future developments of micro-batteries for wireless autonomous sensor systems // International Journal of Energy Research. – 2012. – Vol. 36, N 12. – P. 1139–1150. – doi: 10.1002/er.2949.
- Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting / R. Torah, P. Glynne-Jones, M. Tudor, T. O'Donnell, S. Roy, S. Beeby // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19, N 12. – P. 125202. – doi: 10.1088/0957-0233/19/12/125202.
- Elvin N.G., Lajnef N., Elvin A.A. Feasibility of structural monitoring with vibration powered sensors // Smart Materials and Structures. 2006. Vol. 15, N 4. P. 977–986. doi: 10.1088/0964-1726/15/4/011.
- A MEMS self-powered sensor and RF transmission platform for WSN nodes / C. He, M.E. Kiziroglou, D.C. Yates, E.M. Yeatman // IEEE Sensors Journal. – 2011. – Vol. 11, N 12. – P. 3437–3445. – doi: 10.1109/JSEN.2011.2160535.
- Westby E.R., Halvorsen E. Design and modeling of a patterned-electret-based energy harvester for tire pressure monitoring systems // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2012. Vol. 17, N 5. P. 995–1005. doi: 10.1109/TMECH.2011.2151203.
- Fabrication and performance of silicon-embedded permanent-magnet microgenerators / F. Herrault, B.C. Yen, C.H. Ji, Z.S. Spakovszky, J.H. Lang, M.G. Allen // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2010. – Vol. 19, N 1. – P. 4–13. – doi: 10.1109/ JMEMS.2009.2036583.
- Jovanov E., Milenkovic A. Body area networks for ubiquitous healthcare applications: opportunities and challenges // Journal of Medical Systems. 2011. Vol. 35, N 5. P. 1245–1254. doi: 10.1007/s10916-011-9661-x.
- Wireless dosimeter: system-on-chip versus system-in-package for biomedical and space applications / A. Shamim, M. Arsalan, L. Roy, M. Shams, G. Tarr // IEEE Transactions on Circuits and Systems II. 2008. Vol. 55, N 7. P. 643–647. doi: 10.1109/ TCSII.2008.921573.
- MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy harvesting applications / Y. Suzuki, D. Miki, M. Edamoto, M.A. Honzumi // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2010. – Vol. 20, N 10. – P. 104002-1–104002-8. – doi: 10.1088/ 0960-1317/20/10/104002.
- 10. Wideband MEMS electrostatic vibration energy harvesters based on gap-closing interdigited combs with a trapezoidal section / R. Guilllemet, P. Basset, D. Galayko, F. Cottone,

F. Marty, T. Bourouina // Proceedings IEEE 26th International Conference on MEMS. – Taipei, 2013. – P. 817–820. – doi: 10.1109/MEMSYS.2013.6474368.

- Драгунов В.П., Доржиев В.Ю., Лойко Д.И. Влияние непараллельности электродов на характеристики микромеханических конденсаторов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 3 (32). – С. 54–64. – doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64.
- Surface micromachined MEMS capacitors with dual cavity for energy harvesting / J. Lin, J. Zhu, Y. Chang, Z. Feng, M. Almasri // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2013. – Vol. 22, N 6. – P. 1458–1469. – doi: 10.1109/JMEMS.2013.2262588.
- 13. Драгунов В.П., Драгунова Е.В. Особенности функционирования МЭМ систем // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 6 (179). – С. 43–52.
- Драгунов В.П., Драгунова Л.С. Влияние массы подвижного электрода на функционирование МЭМ систем // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 50–60. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-3-50-60.
- Non-linear MEMS electrostatic kinetic energy harvester with a tunable multistable potential for stochastic vibrations / F. Cottone, P. Basset, R. Guillemet, D. Galayko, F. Marty, T. Bourouina // Proceedings IEEE 17th International Conference on Solid State Sensors and Actuators. – Barcelona, Spain, 2013. – P. 1336–1339. – doi: 10.1109/Transducers. 2013.6627024.

INFLUENCE OF ELECTRODE NONPARALLELISM ON MEMS CHARACTERISTICS IN A CONTROLLED CHARGE MODE

Dragunov V.P., Sinitskiy R.E., Kiselev D.E.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

One of the most essential factors defining characteristics of MEMS is electromechanical interactions. Therefore, of great interest is the search for analytical expressions which allow calculating capacitances and forces with a sufficient accuracy for practical applications.

This paper presents the results of studies of an electrode nonparallelism effect on electromechanical interactions and forces in MEMS. As an example, the paper considers the microelectromechanical systems with a two-electrode and interdigitated electrode structure in the controlled charge mode. The analytic forms obtained give a possibility to evaluate the values of electrostatic attracting forces, potential energy, a critical charge and an offset of a movable electrode in case of different inclinations of electrodes in the controlled charge mode. It was found that in the controlled charge mode there is a pull-in effect in two-electrode MEMS. The paper considers an influence of the weight of a movable electrode on electromechanical interactions in two-electrode MEMS. It is shown that in the controlled charge mode in two-electrode MEMS with the interdigitated electrode structure when the electrode inclination increases, the value of the critical charge η_{cr} first increases, and then decreases. It was ascertained that the maximum value of a critical

charge is reached in the case of $\tilde{\Delta} \cong 1.354$ and the maximum value of η_{cr} is equal to 1.17.

Keywords: MEMS, energy conversion, microelectromechanical capacitor, electrostatic force, controlled charge mode, pull-in effect, relative range of the controlled offset of an electrode, critical values.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71

REFERENCES

- Oudenhoven J.F.M., Vullers R.J.M., Schaijk R. A review of the present situation and future developments of micro-batteries for wireless autonomous sensor systems. *International Journal of Energy Research*, 2012, vol. 36, no. 12, pp. 1139–1150. doi: 10.1002/er.2949.
- Torah R., Glynne-Jones P., Tudor M., O'Donnell T., Roy S., Beeby S. Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting. *Measurement Science and Technology*, 2008, vol. 19, no. 12, p. 125202. doi: 10.1088/0957-0233/19/12/125202.

- Elvin N.G., Lajnef N., Elvin A.A. Feasibility of structural monitoring with vibration powered sensors. *Smart Materials and Structures*, 2006, vol. 15, no. 4, pp. 977–986. doi: 10.1088/0964-1726/15/4/011.
- He C., Kiziroglou M.E., Yates D.C., Yeatman E.M. A MEMS self-powered sensor and RF transmission platform for WSN nodes. *IEEE Sensors Journal*, 2011, vol. 11, no. 12, pp. 3437–3445. doi: 10.1109/JSEN.2011.2160535.
- Westby E.R., Halvorsen E. Design and modeling of a patterned-electret-based energy harvester for tire pressure monitoring systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, vol. 17, no. 5, pp. 995–1005. doi: 10.1109/TMECH.2011.2151203.
- Herrault F., Yen B.C., Ji C.H., Spakovszky Z.S., Lang J.H., Allen M.G. Fabrication and performance of silicon-embedded permanent-magnet microgenerators. *Journal of Microelec*tromechanical Systems, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 4–13. doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036583.
- Jovanov E., Milenkovic A. Body area networks for ubiquitous healthcare applications: opportunities and challenges. *Journal of Medical Systems*, 2011, vol. 35, no. 5, pp. 1245–1254. doi: 10.1007/s10916-011-9661-x.
- Shamim A., Arsalan M., Roy L., Shams M., Tarr G. Wireless dosimeter: system-on-chip versus system-in-package for biomedical and space applications. *IEEE Transactions on Circuits* and Systems II, 2008, vol. 55, no. 7, pp. 643–647. doi: 10.1109/TCSII.2008.921573.
- Suzuki Y., Miki D., Edamoto M., Honzumi M.A. MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy harvesting applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, vol. 20, no. 10, pp. 104002-1–104002-8. doi: 10.1088/0960-1317/20/10/104002.
- Guillement R., Basset P., Galayko D., Cottone F., Marty F., Bourouina T. Wideband MEMS electrostatic vibration energy harvesters based on gap-closing interdigited combs with a trapezoidal section. *Proceedings IEEE 26th International Conference on MEMS*, Taipei, 2013, pp. 817–820. doi: 10.1109/MEMSYS.2013.6474368.
- Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu., Loiko D.I. Vliyanie neparallel'nosti elektrodov na kharakteristiki mikromekhanicheskikh kondensatorov [Influence of electrodes nonparallelism on micromechanical capacitor characteristics]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 54–64. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64.
- Lin J., Zhu J., Chang Y., Feng Z., Almasri M. Surface micromachined MEMS capacitors with dual cavity for energy harvesting. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 1458–1469. doi: 10.1109/JMEMS.2013.2262588.
- Dragunov V.P., Dragunova E.V. Osobennosti funktsionirovaniya MEM sistem [Specific features of MEM systems' functioning]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2015, no. 6 (179), pp. 43–52.
- Dragunov V.P., Dragunova L.S. Vliyanie massy podvizhnogo elektroda na funktsionirovanie MEM sistem [An influence of the mobile electrode weight on functioning MEMS]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2015, no. 3 (28), pp. 50–60. doi: 10.17212/1727-2769-2015-3-50-60.
- Cottone F., Basset P., Guillemet R., Galayko D., Marty F., Bourouina T. Non-linear MEMS electrostatic kinetic energy harvester with a tunable multistable potential for stochastic vibrations. *Proceedings IEEE 17th International Conference on Solid State Sensors and Actuators*. Barcelona, Spain, 2013, pp. 1336–1339. doi: 10.1109/Transducers.2013.6627024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Драгунов Валерий Павлович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры ППиМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: наноэлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 140 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: drag@adm.nstu.ru).

70

Dragunov Valery Pavlovich (b. 1947) – Doctor of Science (Eng.), associatet professor, Professor of the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanoelectronics, physics of low-dimensional structures, nano- and microsystem technology. He is the author of more than 140 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: drag@adm.nstu.ru).



Синицкий Родион Евгеньевич – родился в 1994 году, студент кафедры ППиМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sinitsky.rodion@yandex.ru).

Sinitskiy Rodion Evgenevich (b. 1994) – a student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem technology. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sinitsky.rodion@yandex.ru).



Киселев Дмитрий Евгеньевич – родился в 1995 году, студент кафедры ППиМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Е-mail: heroes-00@mail.ru).

Kiselev Dmitry Evgenevich (b. 1995) – a student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem technology. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: heroes-00@mail.ru).

> Статья поступила 28 февраля 2017 г. Received February 28, 2017

To Reference:

Dragunov V.P., Sinitskiy R.E., Kiselev D.E. Vliyanie neparallel'nosti elektrodov na kharakteristiki MEMS v rezhime s kontroliruemym zaryadom [Influence of electrode nonparallelism on MEMS characteristics in a controlled charge mode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 58–71. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

январь–март

№ 1(34)

УДК 621.311

2017

СОГЛАСОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В.З. Манусов, Д.О. Крюков, Дж.С. Ахьёев

Новосибирский государственный технический университет

Рассмотрены особенности диагностики технического состояния высоковольтного электрооборудования электрических сетей и систем электроснабжения на основе нечеткой логики экспертных оценок. На первоначальном этапе устанавливаются нечеткие отношения между признаками неисправностей (дефектов) и их возможными побудительными причинами. Специфика задачи определяется главным образом видом полученных оценок, а именно: причинно-следственных связей, между контролируемыми параметрами трансформаторного оборудования и дефектами, способными повлечь за собой их изменение и возможность дальнейшего функционирования объекта. Наряду с этим уделено большое внимание проблеме степени согласованности экспертных мнений, от которых зависит качество экспертизы текущего технического состояния исследуемого объекта. В этой связи в работе предпринята попытка дать конкретные реалистические рекомендации по применению статистических методов для анализа экспертных оценок в зависимости от текущего технического состояния электрооборудования. Приведен сравнительный анализ среднеарифметических и медианных оценок согласованности мнений экспертов. Показано, что известный среднеарифметический подход имеет такой существенный недостаток, как неустойчивость к выбросам отдельных мнений всей совокупности и смещению под действием мнений «экспертов-диссидентов». Это может быть обусловлено как их некомпетентностью, так и наивысшей компетентностью. Этих недостатков лишена медианная оценка, которая является более устойчивой к выбросам и попросту отбрасывает часть радикально отклоняющихся мнений экспертов. Впервые для этих целей использована медиана Кемени в задачах технической диагностики, которая базируется на вводе метрики в пространстве множества мнений экспертов и аксиоматическом введении расстояния между ними. Кроме того, сформирован критерий для определения оптимального количества экспертов в группе.

Ключевые слова: электроэнергетика, электрооборудование электроэнергетических систем, техническая диагностика, текущее состояние, экспертные оценки, степень согласованности, коэффициент конкордации, медиана Кемени, нечеткие причинно-следственные отношения, нечеткая логика

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-72-84

Введение

Развитие технического прогресса и усложнение электроэнергетических систем (ЭЭС) выдвигают все более строгие требования по обеспечению их надежности. Также предъявляются все более высокие требования к эксплуатационному персоналу, углубленному знанию определенных процессов, касающихся работы тех или иных звеньев технических систем. Такое положение дел неминуемо образует появление и повышение роли экспертов – специалистов в конкретных узких областях техники.

Задача экспертных оценок становится все более актуальной в связи с тотальным переходом от системы планово-предупредительных ремонтов к системе ремонтов по текущему техническому состоянию электрооборудования.

© 2017 В.З. Манусов, Д.О. Крюков, Дж.С. Ахьёев
Электроэнергетический сектор имеет свой круг задач как организационного, так и технического характера. Задачи технического характера традиционно решаются при помощи инженерных и метрологических подходов, но как было показано выше, усложнение структуры электрических сетей и систем электроснабжения, а также требований к эксплуатации электротехнического оборудования порой не позволяет рядовому специалисту сделать однозначный вывод о состоянии электроустановки. Например, силового трансформатора, на основании показаний датчиков температуры, газовых хроматографов и т. д. В связи с этим дилемма о сохранении эксплуатационного режима или же выведении из работы трансформатора для лица, принимающего решения (ЛПР), может оказаться трудноразрешимой. Здесь можно рассматривать два пути решения поставленной задачи: с одной стороны, это применение компьютеризированных экспертных систем, и с другой, сбор и обработка экспертных мнений, относительно поставленной задачи. Однако первый из двух подходов может оказаться бесполезным в случае, если задача будет иметь совершенно уникальный характер; второй же подход оказывается более трудоемким, но вместе с тем способен привести к более существенному результату. Остановимся на этом пути подробнее.

Главная особенность и преимущество, а вместе с тем и ответственная проблема экспертных оценок при определении текущего технического состояния электрооборудования заключается в ограниченности количества компетентных специалистов – экспертов в конкретных областях. Число экспертов обычно не превышает 25, что накладывает некоторые ограничения на применение статистических методов для поиска обобщенного экспертного мнения [1–2]. В меньшей степени такие ограничения испытывают алгебраические методы. Совсем избавиться от каких-то ограничений можно, непосредственно анализируя полученные экспертные оценки. Однако такой подход крайне трудоемок для лица, принимающего решения, и неминуемо вносит дополнительный вклад в субъективные мнения экспертов, поэтому в дальнейшем повествование будет касаться лишь математических методов обработки мнений экспертов.

Другая особенность, и на этот раз ключевая проблема экспертных оценок, заключается в их несогласованности. Проблема согласованности возникает особенно остро в случае с электроэнергетическим сектором, где ярко выражен дуализм мнений специалистов-теоретиков и специалистов, работающих в эксплуатации. Вполне ожидаема ситуация, что в результате экспертизы мнения распределятся по двум кластерам, соответственно в такой ситуации ни о какой согласованности речи идти не может, и в этом случае анализ нужно проводить в каждом кластере отдельно.

1. Постановка задачи

На конкретном примере покажем все этапы от анализа согласованности до поиска обобщенного мнения экспертов; дадим рекомендации по применению тех или иных методов в определенных ситуациях с учетом специфики задачи в техническом анализе возможных состояний электрооборудования. В заключение попытаемся сформулировать критерий для выбора оптимального количества экспертов.

В качестве исходных данных приняты экспертные мнения, выраженные в виде нечетких оценок от 0 до 1, табл. 1 [3–7], выражающие вероятность возникновения дефекта в трансформаторном оборудовании при отклонении от нормы контролируемых параметров.

Таблица 1 / Table 1

		Вид дефекта / Type of defects									
Контролируемый параметр (эксперт 1) / Controlled parameters (expert 1)	Дефект в обмотке / A defect in the winding	Дефект в изоляции / A defect in the insulation	Дефект сердечника / Core defect	Горячие точки / Hot spots	Дугообразование / Arcing	Пузырьки газа / Gas bubbles	Грязь в масле / Dirt in oil	Утечки в системе / Leaks in the system			
Влага в масле/ Moisture in oil	0	0	0	0,7	0	0	0	0,3			
Газы в масле/ Gases in oil	0,1	0,5	0,1	0,3	0,7	0,3	0,2	0			
Частичные разряды/ Partial discharges	0,2	0,9	0	0	0.3	0,1	0.1	0			
Температура/ Temperature	0,8	0	0,1	0,5	0	0	0	0			
Вибрация/ Vibration	0,3	0	0,7	0	0	0	0	0			
Пробивное напряжение масла/ The breakdown voltage of oil	0	0	0	0,5	0	0.2	0,7	0			
Перегревы/ Overheating	0,3	0	0,1	0,9	0	0	0	0			

Пример оценок причинно-следственных связей одного из экспертов Example of the casual relationship of an expert

Всего рассмотрено девять совокупностей мнений. Можно заметить, что одна целая таблица содержит в себе большое количество информации, неудобной для анализа. Для упрощения анализа демонстрационного примера будем изолированно рассматривать возможности возникновения различных дефектов в оборудовании в связи с исходным параметром «Газы в масле». Этот параметр выбран еще и потому, что он содержит наибольшее количество оценок по различным факторам, а значит, можно наиболее широко сравнивать имеющиеся методы. В табл. 2 приведены все экспертные мнения по выбранному параметру. Приступим к их анализу.

Для упрощения анализа будем считать оценки равномерно распределенными на множестве оценок. Будем также считать равными компетентности экспертов.

2. Проверка согласованности

Для проверки согласованности можно пойти разными путями, основные из которых изложены в [8]. Здесь же воспользуемся коэффициентом конкордации.

Для вычисления коэффициента конкордации необходимо привести полученные экспертные оценки к единому нормированному виду [1] такому, чтобы суммы оценок всех экспертов были равны некоторому числу. Сделать это проще всего, заменив нечеткие оценки их порядковыми рангами, а оценки, имеющие одинаковый ранг, заменить на среднее арифметическое двух рангов соответствующих оценок. Результаты этих преобразований отражены в табл. 3 (для удобства таблица транспонирована).

Таблица 2 / Table 2

Оценки экспертов по параметру «Газы в масле»
Estimates of the experts on the parameter "Gases in Oil"

	Газы в масле											
№ эксперта/ Expert no.	Дефект в обмотке/ A defect in the winding a	Дефект в изоляции / A defect in the insulation b	Дефект сердечника/ Core defect c	Горячие точки/ Hot spots d	Дугообразование/ Arcing e	Пузырьки газа/ Gas bubbles f	Грязь в масле/ Dirt in oil g	Утечки в системе/ Leaks in the system h				
1	0,1	0,5	0,2	0,3	0,7	0,3	0,2	0				
2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,5	0,9	0,7	0				
3	0,3	0,5	0	0,8	0,3	0,4	0,2	0				
4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,6	0,4	0,1	0				
5	0,3	0,4	0,1	0,5	0,3	0,1	0,1	0				
6	0,3	0,8	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0				
7	0,3	0,5	0	0	0,2	0,1	0,4	0				
8	0,5	0,3	0,1	0,6	0,5	0,9	0,1	0				
9	0,3	0,1	0,1	0,5	0,5	0,6	0,2	0				

Таблица 3 / Table 3

Факторы / factors Эксперты/ experts	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Сумма paнгов/ The sum of ranks	d	d2
x1	2	4	4,5	5,5	5,5	6,5	6	5,5	5	44,5	4	16
x2	7	5	7	4	7	8	8	4	2,5	52,5	12	144
x3	3,5	2	1,5	2,5	3	2,5	2	2,5	2,5	22	-18,5	342,25
x4	5,5	3	8	5,5	8	6,5	2	7	6,5	52	11,5	132,25
x5	8	6	4,5	8	5,5	4,5	5	5,5	6,5	53,5	13	169
x6	5,5	8	6	7	3	4,5	4	8	8	54	13,5	182,25
x7	3,5	7	3	2,5	3	2,5	7	2,5	4	35	-5,5	30,25
x8	1	1	1,5	1	1	1	2	1	1	10,5	-30	900
Σ	36	36	36	36	36	36	36	36	36	324		1916

Матрица рангов The matrix of rank

По каждому фактору вычисляется сумма рангов, затем вычисляется среднее арифметическое сумм рангов, равное 40,5. Далее отыскиваются отклонения d от средней арифметической сумм рангов по каждому фактору, что можно коротко записать выражением

$$d = \sum_{j=1}^{n} x_{ij} - \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} x_{ij} , \qquad (1)$$

где *т* – количество экспертов; *п* – количество факторов.

Далее можно перейти непосредственно к вычислению коэффициента конкордации по выражению

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}m^2(n^3 - n) - m\sum T_i},$$
(2)

где S – сумма квадратов отклонений сумм рангов от средней суммы, а T_i определяется как

$$T_{i} = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{n} \left(t_{j}^{3} - t_{j} \right),$$
(3)

где t_j определяется как количество повторяющихся элементов в ответах *i*-го эксперта.

Подставляя в (2) все известные величины, получим в итоге коэффициент конкордации *W*, равный 0,58.

Как и любой статистический коэффициент, коэффициент конкордации необходимо проверить на статистическую значимость, например, по критерию хиквадрат. То есть должно выполняться условие 4

$$m(n-1)W > \chi^2_{n-1,\alpha}$$
 (4)

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ имеем табличное значение хи-квадрат, равное 14,07, при этом значение статистики коэффициента равно 36,54. То есть условие 4 выполняется! Следовательно, можно утверждать, что нулевая гипотеза об отсутствии статистической связи между выборками экспертных мнений может быть отвергнута с уровнем значимости 0,05.

Тем не менее полученное значение коэффициента конкордации сообщает нам о «средней» степени согласованности экспертных мнений, что в дальнейшем может отразиться на сопоставлении методов поиска обобщенного мнения. Примем это во внимание и двинемся дальше.

3. Методы средних арифметических и медиан

Поиск среднего арифметического некоторой совокупности является стандартным подходом не только в экспертных методах, но и в техническом анализе. Однако этот метод не лишен такого недостатка, как неустойчивость к выбросам отдельных значений совокупности, ибо такие значения способны сместить среднее арифметическое достаточно существенно, в результате чего оно перестанет соответствовать интуитивному представлению о средней величине. Такого недостатка лишена медианная оценка, которая нечувствительна к выбросам и всегда определяется как 0,5-квантиль распределения или значение, делящее площадь под кривой распределения на две равные части, что достаточно хорошо соответствует интуитивному пониманию среднего значения. На деле же оба метода имеют как свои преимущества, так и недостатки. Если среднее арифметическое начинает смещаться под действием мнения экспертов-диссидентов, мнения, которые далеко не всегда оказываются неправильными (возможно именно эти эксперты обладают наивысшей компетентностью), то медианная оценка попросту «обрубает» часть информации, которая, возможно, могла бы быть ценной для ЛПР. Поэтому в соответствии с концепцией устойчивости [8] рекомендуется применять обе оценки сразу, с целью выделить выводы, получаемые одновременно в обоих методах. Результаты обработки табл. 2 отражены в табл. 4.

Таблица 4 / Table 4

Газы в масле/ Gasses in oil	Дефект в обмотке/ A defect in the winding a	Дефект в изоляции/ A defect in the insulation b	Дефект сердечника/ Core defect c	Горячие точки/ Hot spots d	Дугообразование/ Arcing e	Пузырьки газа/ Gas bubbles f	Грязь в масле/ Dirt in oil g
Среднее арифмети- ческое <i>M</i> (<i>xj</i>) / Arithmetical mean <i>M</i> (<i>xj</i>)	0,3	0,411	0,089	0,389	0,422	0,433	0,233
Meдиана/ Median	0,3	0,4	0,1	0,3	0,5	0,4	0,2

Результаты обработки экспертных оценок The results of processing of expert assessment

Заметим, что параметры d и е оказались менее устойчивыми и их средние арифметические и медианные значения разнятся практически на 0,1, из чего можно сделать неверные выводы: например, что параметр е более значим по отношению к другим, судя по медианным оценкам. При этом ситуация осложняется тем, что количество экспертов обычно невелико, а значит, говорить о статистической значимости данных оценок весьма затруднительно. Поэтому, возвращаясь к принципу устойчивости, зададимся целью дополнить оба примененных метода третьим, контрольным. И на этот раз пойдем по пути алгебраических методов.

4. Медиана Кемени

Применение медианы Кемени базируется на вводе метрики в пространство мнений экспертов и аксиоматическом введении расстояния между элементами множества мнений экспертов, причем важно, каким именно множеством представлены мнения, так как от этого зависит трудоемкость задачи. В нашем случае удобно преобразовать исходные мнения экспертов в парные сравнения, рассматривая оценки как ранги и таким образом сравнивая их между собой по каждому фактору. Пример такой матрицы показан в табл. 5.

Таблица 5 / Table 5

	а	b	с	d	e	f	g	h
a	1	1	1	1	1	1	1	0
b	0	1	0	0	1	0	0	0
с	0	1	1	1	1	1	1	0
d	0	1	0	1	1	1	0	0
e	0	0	0	0	1	0	0	0
f	0	1	0	1	1	1	0	0
g	0	1	1	1	1	1	1	0
h	1	1	1	1	1	1	1	1

Матрица парных сравнений для первого эксперта The matrix of pairwise comparisons of the 1st expert Заполнение матрицы элементами происходит по следующему правилу:

- если *x* < *y*, то 1;
- если *x* = *y* , то 1;
- если *x* > *y*, то 0,

где *х* – текущий индекс строки; *у* – текущий индекс столбца.

Всего матриц парных сравнений будет 9, по количеству экспертов. Каждая матрица парных сравнений представляется элементом множества P – множества экспертных мнений. Либо, если вводить метрику и поместить элементы множества P в пространство, то элементы будут представляться точками этого пространства, что схематично (на примере пяти экспертов) можно видеть на рис. 1.



Puc. 1 - Пространство экспертных мнений*Fig.*<math>1 - The space expert opinions

Другими словами, каждая матрица парных сравнений есть точка в пространстве экспертных мнений [9–10]. Далее аксиоматически вводится расстояние между двумя точками этого пространства, как сумма модулей разности всех элементов матриц, стоящих на эквивалентных позициях (5),

$$d(P_i, P_j) = \sum_{k=ll=l}^{n} \left| p_{i_{k,l}} - p_{j_{k,l}} \right|,$$
(5)

где p_{kl} – элемент матрицы парных сравнений, d – расстояние Кемени.

Тогда, можно определить медиану Кемени как некоторый элемент множества P, наименее удаленный от всех остальных элементов, что математически можно трактовать как минимальную сумму расстояний от фиксированного элемента множества P до всех остальных элементов данного множества:

$$M^*(P_1,...,P_m) = \arg\min_{P} \sum_{i=1}^{m} d(P,P_i)$$
 (6)

И, представив полученные расстояния в виде таблицы, по выражению (6) получим медиану Кемени.

Таблица 6 / Table 6

Суммы расстояний Кемени от мнения каждого эксперта до всех остальных

Kemeny sum of the distances from each expert opinion to all others

№ эксперта/ Expert no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сумма расстояний/ The sum of distance	129	157	107	115	129	114	184	121	126

Медианой оказалось мнение эксперта под номером 3. Добавим совокупность оценок данного эксперта в табл. 4 и отразим полученное в табл. 7.

Таблица 7 / Table 7

Газы в масле/ Gasses in oil	Дефект в обмотке/ A defect in the winding a	Дефект в изоляции/ A defect in the insulation b	Дефект сердечника/ Core defect c	Горячие точки/ Hot spots d	Дугообразование/ Arcing e	Пузырьки газа/ Gas bubbles f	Грязь в масле/ Dirt in oil g
Среднее арифметическое <i>M</i> (<i>xj</i>)/ Arithmetical mean <i>M</i> (<i>xj</i>)	0,3	0,411	0,089	0,389	0,422	0,433	0,233
Медиана/ median	0,3	0,4	0,1	0,3	0,5	0,4	0,2
Медиана Кемени: мнение экспер- та № 3 / Median Kemeni: opinion expert N 3	0,3	0,5	0	0,8	0,3	0,4	0,2

Результаты обработки экспертных оценок с медианой Кемени The results of processing of expert evaluations with the Kemeny median

Анализируя полученную таблицу, уместно вспомнить о полученном выше значении коэффициента конкордации W = 0,58. Поэтому вполне ожидаемо, что оценки эксперта, мнение которого является медианой Кемени, будут отличаться, и порой разительно, от средних и медианных оценок. Что позволяет нам сделать вывод о том, что высокая степень согласованности (порядка $W \sim 0,7-0,9$ [11–15]) является необходимым условием для целесообразности применения медианы Кемени и других непараметрических алгебраических методов.

5. Количество экспертов

Чтобы сформулировать критерий для определения максимального количества экспертов, воспользуемся результатами, представленными в табл. 5. Из полученных расстояний Кемени хорошо видно, что среди экспертов явным образом присутствует диссидент – эксперт № 7; мнение которого значительно отличается от мнений всех остальных экспертов. Обычно в подобном случае мнением этого эксперта пренебрегают в анализе оценок, но, как было сказано выше, существует вероятность того, что мнение этого эксперта находится ближе всего к истине, в то время как другие эксперты совокупно более далеки от истины. Другими словами, существует вероятность того, что мнение диссидента является самым компетентным в группе. Поскольку получение объективной оценки компетентности каждого эксперта является в общем случае невыполнимой задачей (можно рассчитывать только на субъективные мнения других экспертов или самого эксперта), то ЛПР должен принять решение об исключении или неисключении мнения эксперта из анализа [16]. Если рассматривать случай, когда ЛПР все же решает исключить мнение эксперта, то автоматически образуется вероятность того, что его мнение было наиболее значимым, и, как следствие, весь анализ других мнений оказывается ошибочным.

Вернемся к рассмотренному выше примеру. Если для упрощения принять, что мнения экспертов распределены равномерно (как было сказано выше), а их компетенции равны, то получается, что вероятность получения ошибочного результата анализа равна 1/9 = 0,111. Таким образом, мы приходим к выводу, что ввиду (как предполагается, из-за отсутствия детальной информации) равной компетентности экспертов у эксперта № 7 появляется вероятность, равная 0,111, «предсказать» наиболее близкий к истинному результат. А, следовательно, группа из оставшихся экспертов из 8 человек имеет вероятность 8/9 = 0,89, что область (далее будем называть ее рабочей областью), образованная из покрытия мнений 8 экспертов (рис. 2) окажется ближе к истине, чем мнение эксперта № 7.



в пространстве (желтым выделена рабочая область) *Fig.* 2 – A visual representation of the location of the opinions of experts in the (yellow highlighted workspace)

Учитывая вышесказанное, можно обнаружить, что при увеличении количества экспертов в рабочей области увеличится и вероятность того, что анализируемые мнения будут ближе к истине (если не будет увеличиваться количество диссидентов), а значит, ближе к истине окажется и медиана Кемени.

Теперь сформулируем критерий. Если до проведения экспертизы мы предполагаем, что в выборке окажется не более одного диссидента, и задаемся желаемой вероятностью, что рабочая область окажется ближе к истине с вероятностью α , то задаваемое количество экспертов n, мнения которых распределены равномерно, а компетентности считаются равными, должно удовлетворять выражению

$$\frac{n-1}{n} \ge \alpha \,. \tag{7}$$

Так, например, при задании желаемой вероятности $\alpha = 0,9$ требуется количество экспертов n = 10.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, сформулируем рекомендации по применению методов анализа экспертных оценок.

Согласованность экспертных мнений является ключевым фактором для адекватности трактовки результата экспертизы. Согласованность можно оценить, используя коэффициент конкордации, не забывая при этом проверять его статистическую значимость.

Высокая степень согласованности позволяет практически безошибочно полагаться на оценки эксперта(-ов), являющиеся медианой Кемени.

При недостаточной согласованности ЛПР оставляет за собой право применить классические методы поиска обобщенного мнения (ср. ариф. и медиана) и на их основе делать выводы, либо настаивать на проведении дополнительной экспертизы.

Асимметрия в распределении оценок (наличие выбросов) предупреждает нас о необходимости использования медианной оценки, при этом нужно иметь в виду, что мнения экспертов-диссидентов будут отброшены, как ошибочные.

Предпринята попытка сформулировать критерий для определения оптимального количества экспертов в рабочей группе, на основании предположения о равномерности распределения экспертных мнений, равности компетенций, а также наличия диссидентов в рабочей группе.

ЛИТЕРАТУРА

- Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. В 3 ч. Ч. 1: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 540 с.
- 2. Горский В.Г., Гриценко А.А., Орлов А.И. Метод согласования кластеризованных ранжировок // Автоматика и телемеханика. 2000. № 3. С. 159–167.
- 3. Манусов В.З., Ахьёев Дж.С. Диагностирование трансформаторного электрооборудования на основе экспертных моделей с нечеткой логикой // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 45–48.
- Manusov V.Z., Ahyoev Dzh.S. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – P. 324–329. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.324.
- 5. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: пер. с фр. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
- 6. Манусов В.З., Коваленко Д.И. Нечеткие математические модели диагностики трансформаторного оборудования // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 2. – С. 254–257.
- 7. Манусов В.З., Демидас Ю.М. Статистика дефектов, приведших к выходу из строя силовых трансформаторов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 405–407.
- 8. Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.
- Кемени Дж., Снелл Дж. Кибернетическое моделирование: некоторые приложения. М.: Советское радио, 1972. – 192 с.
- 10. Секретарев Ю.А. Получение и использование эвристической информации при принятии решений: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 36 с.
- 11. Зотьев Д.Б. К проблеме определения весовых коэффициентов на основании экспертных оценок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 75–78.
- 12. Новиков Д.А., Орлов А.И. Экспертные оценки инструменты аналитика // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79, № 4. С. 3–4.

- 13. **Хрусталев С.А., Орлов А.И., Шаров В.Д.** Математические методы оценки эффективности управленческих решений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79, № 11. С. 67–72.
- 14. **Пугач О.В.** Математические методы оценки рисков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 7. – С. 64–69.
- 15. Манусов В.З., Крюков Д.О., Ахьёев Дж.С. Согласование экспертных оценок в задаче текущей технической диагностики трансформаторного оборудования // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: VI Всероссийская научнопрактическая конференция, посвященная 70-летию Рубцовского индустриального института, 24–25 ноября 2016 г. – Рубцовск, 2016. – С. 267–275.
- 16. **Петровский А.Б.** Теория принятия решений: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2009. 400 с.

COORDINATION OF EXPERT APPRAISAL IN DIAGNOSTICS OF CURRENT CONDITION OF HIGH VOLTAGE ELECTRIC EQUIPMENT

Manusov V.Z., Kryukov D.O., Ahyoev J.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Peculiarities of diagnostics of operating conditions of high-voltage electric power networks and power supply systems based on fuzzy logic expert assessments are described. First, fuzzy relationship between failure (defect) symptoms and their possible causes are determined. The specificity of the task is determined mainly through the obtained assessment, namely: causal relationship between the monitored parameters of transformer equipment and defects that may cause a change in them and the possibility of further operation of the facility. At the same time, great attention is paid to the problem of the coherence of expert opinions determining the quality of the examination of the current operating conditions of the object under study. Therefore, in an attempt is made to give specific and realistic recommendations for the use of statistical methods for the analysis of expert appraisals based on the current technical condition of electrical equipment. A comparative analysis of the arithmetic mean and median consistency estimates of expert opinions is discussed in the article. The well-known arithmetical mean has such a major drawback as the instability of bursts of certain opinions of the group and shifts under the influence of "expert - dissident" opinions." This may be due to both their incompetence and high competence. The median estimate is deprived of these shortcomings. It is more resistant to bursts and simply discards radically diverging expert opinions. The Kemeny median was used for the first time to diagnose technical problems. It is based on the introduction of the metric in the space of a variety of expert opinions and on axiomatic introduction of the distance between them. In addition, a criterion for determining an optimal number of experts in the group is formed.

Keywords: Electricity, electrical equipment of electric power systems, technical diagnostics, current conditions, expert appraisal, degrees of consistency, concordance coefficient, Kemeny median, fuzzy causal relations, fuzzy logic.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-72-84

REFERENCES

- 1. Orlov A.I. *Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie*. V 3 ch. Ch. 1 [Organizational and economic modeling. In 3 pt. Pt. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 540 p.
- Gorskii V.G., Gritsenko A.A., Orlov A.I. Metod soglasovaniya klasterizovannykh ranzhirovok [A reconciliation method for clustered rankings]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2000, no. 3, pp. 159–167. (In Russian)

- Manusov V.Z., Ahyoev J.S. Diagnostirovanie transformatornogo elektrooborudovaniya na osnove ekspertnykh modelei s nechetkoi logikoi [Electrical transformer diagnostics based on expert models with fuzzy logic]. *Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost',* 2015, no. 5, pp. 45–48.
- Manusov V.Z., Ahyoev J.S. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 792. Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering, pp. 324–329. doi: 10.4028/ www.scientific.net/AMM.792.324.
- Kaufmann A. Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs. Paris, Masson, 1977 (Russ. ed.: Kofman A. Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv. Translated from French. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 432 p.).
- Manusov V.Z., Kovalenko D.I. Nechetkie matematicheskie modeli diagnostiki transformatornogo oborudovaniya [Indistinct mathematical models of diagnostics of the transformer equipment]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East, 2012, no. 2, pp. 254–257.
- Manusov V.Z., Demidas Yu.M. Statistika defektov, privedshikh k vykhodu iz stroya silovykh transformatorov [Statistics of defects of the power transformers which have led to failure]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East, 2009, no. 1, pp. 405–407.
- Litvak B.G. Ekspertnaya informatsiya: metody polucheniya i analiza [The expert information: the methods of obtaining and analyzing]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 184 p.
- Kemeny J.G., Snell J.L. Mathematical models in the social sciences. New York, Ginn-Blaisdell, 1962 (Russ. ed.: Kemeni Dzh., Snell Dzh. Kiberneticheskoe modelirovanie: nekotorye prilozheniya. Translated from English. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 192 p.).
- Sekretarev Yu.A. Poluchenie i ispol'zovanie evristicheskoi informatsii pri prinyatii reshenii [The receipt and use of heuristic information when making decisions]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 36 p.
- Zot'ev D.B. K probleme opredeleniya vesovykh koeffitsientov na osnovanii ekspertnykh otsenok [In problem of determining the weighting coefficients based of expert estimates]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics, 2011, vol. 77, no. 1, pp. 75–78. (In Russian)
- Novikov D.A., Orlov A.I. Ekspertnye otsenki instrumenty analitika [Expert estimations the analytics tools]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics, 2013, vol. 79, no. 4, pp. 3–4. (In Russian)
- Khrustalev S.A., Orlov A.I., Sharov V.D. Matematicheskie metody otsenki effektivnosti upravlencheskikh reshenii [The mathematical methods for evaluating the effectiveness of management decisions]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics, 2013, vol. 79, no. 11, pp. 67–72. (In Russian)
- 14. Pugach O.V. Matematicheskie metody otsenki riskov [The mathematical methods of risks estimation]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov Industrial laboratory. Materials diagnostics, 2013, vol. 79, no. 7, pp. 64–69. (In Russian)
- 15. Manusov V.Z., Kryukov D.O., Ahyoev J.S. [Coordination of experts' evaluations on the problem of current technical diagnostics of transformer equipment]. Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyanie i perspektivy: VI Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 70-letiyu Rubtsovskogo industrial'nogo instituta [The modern technique and technology: problems, status and prospects. VI All-Russian scientific-practical conference dedicated to the 70th anniversary of Rubtsovsk Industrial Institute], Rubtsovsk, 24–25 November 2016, pp. 267–275. (In Russian)
- Petrovskii A.B. *Teoriya prinyatiya reshenii* [The theory of decision making]. Moscow, Academia Publ., 2009. 400 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Манусов Вадим Зиновьевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра системы электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. Основное направление исследований: применение методов искусственного интеллекта для планирования и оптимизации режимов электроэнергетических систем. Имеет более 300 научных работ, в том числе 4 монографии. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: manusov36@mail.ru).

Manusov Vadim Zinovevich – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the use of artificial intelligence techniques for planning and optimization of electric power systems modes. He is the author of more than 300 scientific papers including 4 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: manusov36@mail.ru).



Крюков Дмитрий Олегович – студент, кафедра системы электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. Основное направление исследований: электроэнергетические устройства на основе явления высокотемпературной сверхпроводимости. Автор 5 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: fire-paladin@mail.ru).

Kryukov Dmitry Olegovich – student, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on high temperature superconducting devices in the electrical power industry. He is the author of 5 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: fire-paladin@mail.ru).



Ахьёев Джавод Саламшоевич – аспирант, кафедра системы электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. Основное направление исследований: мониторинг и диагностика текущего технического состояния высоковольтного электрооборудования на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики. Автор более 15 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Е-mail: javod_66@mail.ru).

Abyoev Javod Salamshoevich – postgraduate student, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on monitoring and diagnostics of the current technical condition of high-voltage electrical equipment based on the theory of fuzzy sets and fuzzy logic. He is The author of 15 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: javod_66@mail.ru).

Статья поступила 13 февраля 2017 г. Received February 13, 2017

To Reference:

Manusov V.Z., Krjukov D.O., Ahyoev J.S. Soglasovanie jekspertnyh ocenok pri diagnostike tekushhego tehnicheskogo sostojanija vysokovol"tnogo jelektrooborudovanija [Coordination of expert assessment in diagnosis of current condition of high voltage electric equipment]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii* [Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences], 2017, no. 1(34), pp. 72–84. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-72-84

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

январь-март

№ 1 (34)

УДК 621.311

2017

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО КОПЛАНАРНОГО РЕЗОНАТОРА, НЕПРЯМЫМ ОБРАЗОМ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИЕЙ

Е.А. Муценик, А.Н. Султанов, Б.И. Иванов

Новосибирский государственный технический университет

В данной работе приведены аналитические выражения, позволяющие на этапе проектирования системы с непрямой связью оценить такие параметры сверхпроводящего резонатора, как его фундаментальная частота и скорость испускания фотонов в волновод, а также его добротность. Данные параметры, наравне с параметрами квантовых элементов, определяют трансмиссию микроволновых непрерывных сигналов и одиночных фотонов. При учете влияния сверхпроводимости использовалась двухпотоковая модель, которая была включена в стандартный метод конформных преобразований, для расчета параметров копланарных линий.

Ключевые слова: сверхпроводящий копланарный резонатор, копланарный резонатор с непрямой связью, скорость испускания микроволновых фотонов.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-85-97

Введение

В настоящее время быстрыми темпами развивается область квантовых технологий, которая включает в себя широкий спектр как фундаментальных, так и прикладных исследований. С фундаментальной точки зрения интересно изучение взаимодействия фотонов электромагнитного поля с различными двухуровневыми системами. Для создания когерентного взаимодействия между ними используются различные резонансные системы, которые ограничивают нежелательное влияние иных мод. Подобные системы породили целую область квантовой электродинамики в резонаторах (circuitQED) [1, 2]. Особый интерес вызывают системы, в которых удается реализовать так называемый режим сильной связи, когда скорость распада и релаксации системы много меньше скорости взаимодействия между ее элементами. Такой режим позволяет осуществлять генерацию и управление неклассического света, что крайне важно с точки зрения квантовой обработки информации [3].

Реализация режима сильной связи возможна на твердотельных квантовых структурах, работающих в СВЧ-диапазоне. Один из вариантов представляет собой различные СВЧ элементы в копланарном исполнении, выполненные на одном чипе, с такими квантовыми элементами, как потоковые квантовые биты [4, 5], контакты Джозефсона, квантовые точки [6, 7] и т. д. В случае непрямой связи резонатора с искусственными двухуровневыми системами можно наблюдать эффекты электромагнитно-индуцированной прозрачности системы и различные интерференционные эффекты [8, 9]. Более того, резонаторы используются в качестве элементов для считывания состояний кубитов [10]

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда Содействия, грант № 16-19-10069.

^{© 2017} Е.А. Муценик, А.Н. Султанов, Б.И. Иванов

Также сверхпроводниковые резонаторы с непрямой связью нашли применение в однофотонных детекторах микроволновых фотонов, с использованием туннельных контактов Джозефсона [11]. Одними из важных параметров резонатора, с точки зрения реализации квантовых электромагнитных цепей, являются его фундаментальная частота и скорость испускания фотонов в волновод, которая определяется степенью их взаимодействия. В настоящее время его определяют по результатам численного моделирования путем перебора геометрических размеров элемента (ответвителя), обеспечивающего связь. Этот процесс в ряде случаев является крайне затратным по времени. В данной работе проведено численное моделирование в пакете CST MicrowaveStudio структуры сверхпроводникового резонатора (рис. 1), представленного в виде идеального проводника, и приведены аналитические выражения, связывающие параметры резонатора с непрямой связью, и его геометрические размеры. Используя данные аналитические выражения, можно достаточно быстро оценить необходимые размеры подобной структуры для заданных значений скорости испускания фотонов и фундаментальной частоты, не прибегая к численному моделированию.

1. Расчет параметров копланарного резонатора

При непрямой связи копланарного резонатора с волноводной линией возникает четвертьволновой резонанс на длине волны $\lambda = 4l$ (где l – это длина резонатора) в силу того, что один конец либо короткозамкнут на землю (в случае однофотонных детекторов на контактах Джозефсона [11]), либо представляет собой открытый конец.



Рис. 1 – Сверхпроводящий копланарный резонатор, непрямым образом связанный с волноводом. Стрелками показано условное распределение напряженности магнитного поля

Fig. 1 – Superconductivecoplanarside-coupledresonator. Arrows show the direction of the magnetic field

Максимум напряженности магнитного поля приходится на открытый конец резонатора, что позволяет размещать вблизи него потоковые кубиты или контакты Джозефсона для обеспечения их максимальной связи с полем. В данной статье численное моделирование проводилось для короткозамкнутого конца, но с точки зрения определения параметра скорости излучения такая структура не имеет принципиальных различий от случая с открытым концом, поскольку оба случая являются случаями максимального рассогласования.

Рассмотрим копланарную линию с геометрическими размерами, обозначенными на рис. 2.



top view is on the left side and cross-section view is on the right side

Погонную емкость и индуктивность такой линии можно рассчитать методом конформных преобразований, используя следующие выражения [12]:

$$L = \frac{\frac{\mu_0}{2}}{\frac{K(k)}{K(\bar{k})} + \frac{K(k_1)}{K(\bar{k}_1)}}.$$
(1)

$$C = C_{\text{возд}} + C_{\partial} = 2\varepsilon_0 \left(\frac{K(k_1)}{K(\bar{k}_1)} + \frac{K(k)}{K(\bar{k})} \right) + 2\varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \frac{K(k_d)}{K(\bar{k}_d)},$$
(2)

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_{\rm H}}{M}$ – магнитная постоянная; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{M}$ – диэлектрическая постоянная, $C_{\rm BO3d}$ – емкость при воздушном заполнении, $C_{\rm d}$ – емкость при наличии диэлектрика. В выражениях (1) и (2) присутствует полный эллиптический интеграл Лежандра первого рода:

$$K(k) = \int_{0}^{1} \frac{1}{(1-x^2)(1-k^2x^2)} dx,$$
(3)

где его модули определяются в соответствии со следующими выражениями, полученными из конформных преобразований:

$$k = \frac{\tanh\left(\frac{\pi w}{4H}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi(w+2g)}{4H}\right)},\tag{4}$$

$$k_{1} = \frac{\tanh\left(\frac{\pi w}{4H_{1}}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi(w+2g)}{4H_{1}}\right)},$$
(5)

$$k_d = \frac{\sinh\left(\frac{\pi w}{4H_1}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi(w+2g)}{4H_1}\right)}.$$
(6)

Здесь g – расстояние между линией и землей, w – ширина линии, H_1 – толщина подложки, H – толщина воздушного слоя над подложкой (обычно принимается много больше H_1). Следует отметить, что символом \bar{k} обозначается величина, рассчитываемая следующим образом: $\bar{k} = \sqrt{1-k^2}$. Эффективная диэлектрическая проницаемость, согласно ее определению, выражается как

$$\varepsilon_{\varphi \varphi \varphi} = 1 + \frac{C_{\pi}}{C_{\text{возд}}} \,. \tag{7}$$

Таким образом, погонные параметры копланарной линии при комнатной температуре полностью определяются из выражений (1)–(6). Особенность расчета линии в сверхпроводящем режиме заключается в том, что необходимо учесть влияние кинетической индуктивности, являющейся следствием инерции куперовских пар (основных носителей заряда в сверхпроводнике). При толщине проводящего слоя t (рис. 2) кинетическая индуктивность определяется следующим выражением [12]:

$$L_{\text{KИH}} = \mu_0 \lambda_L(T) \frac{C}{4ADK(k)} \left(\frac{1,7}{\sinh\left(\frac{t}{2\lambda_L(T)}\right)} + \frac{0,4}{\sqrt{\left(\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 1\right)\left(1 - \left(\frac{B}{D}\right)^2\right)}} \right).$$
(8)

Параметры А-D выражаются следующим образом:

$$A = -\frac{t}{\pi} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{2t}{\pi}\right)^2 + g^2} ,$$
$$B = \frac{g^2}{4A} ,$$
$$C = B - \frac{t}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{t}{\pi}\right)^2 + w^2} ,$$
$$D = \frac{2t}{\pi} + C .$$

При переходе в сверхпроводящий режим изменяется и комплексное волновое число, это изменение было учтено с помощью двухпотоковой модели, в рамках которой закон Ома можно записать следующим образом:

$$I = (\sigma_n - j\sigma_s)E, \qquad (9)$$

где I – ток в линии, E – напряженность электрического поля, а проводимость обусловлена вкладами от нормальных носителей заряда σ_n и от сверхпроводящих σ_s .

$$\sigma_n = \frac{n_n q^2}{m} \tau,$$

$$\sigma_s = \frac{1}{\omega \mu_0 \lambda_L^2} = \frac{n_s q^2}{m} \tau_s,$$

где *n* – это концентрация нормальных *n_n* и сверхпроводящих *n_s* носителей заряда, q – элементарный заряд, m – его масса, $\tau(\tau_s)$ – время релаксации нормального (сверхпроводящего) носителя заряда, λ_L – лондоновская глубина. Следует отметить, что обе проводимости зависят от температуры, при этом для сверхпроводящей составляющей эта зависимость обусловлена температурной зависимостью лондоновской глубины проникновения:

$$\lambda_L(T) = \frac{\lambda_L(0)}{\left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4\right)^{1/2}},\tag{10}$$

где T_c – критическая температура проводника. Поскольку общая концентрация заряда должна оставаться неизменной, в замкнутой системе $n = n_n + 2n_s$, то зависимость от температуры нормальной составляющей будет пропорциональна

$$\sim \left(\frac{T}{T_c}\right)^4$$

Волновое сопротивление копланарной линии определяется следующим выражением:

$$Z = \sqrt{\frac{L_s}{C}},\tag{11}$$

где C – погонная емкость линии, а $L_s = L_{\text{кин}} + L$ представляет собой сумму погонной (1) и кинетической (8) индуктивностей.

Зная погонные параметры, фазовую скорость в сверхпроводящем режиме определим как $v_{\Phi}^{cB} = \frac{1}{\sqrt{CL_s}}$. Теперь мы можем определить резонансную частоту

четвертьволнового сверхпроводящего резонатора:

$$f_{\rm pe3} = \frac{v_{\rm \phi}^{\rm cB}}{4(l_{\rm pe3} + l_0)} \,. \tag{12}$$

Здесь l₀- геометрическая длина ответвителя (рис. 3), обеспечивающего связь между резонатором и линией, $l_{\rm pes}$ – геометрическая длина самого резонатора.

На рис. 3 представлены две возможные геометрии ответвителя, обеспечивающего емкостную связь между резонатором и волноводной линией.







Геометрия ответвителя влияет не только на резонансную частоту, но и на скорость излучения в волновод из резонатора. В общем случае добротность резонатора определяется как

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{внутр}}} + \frac{1}{Q_{\text{связи}}},$$
(13)

где $Q_{\rm внутр}$ – добротность, обусловленная диссипативными процессами в линии и нагрузке, $Q_{\rm связи}$ – добротность, обусловленная связью с внешней средой. Поскольку $Q_{\rm связи}$ полностью определяется параметрами ответвителя, который является основным предметом исследования в данной статье, то при численном моделировании мы будем рассматривать режим без внутренних диссипаций, принимая все сигнальные и заземленные линии за идеальный проводник, пренебрегая потерями в диэлектрике. Это позволит нам определить влияние только геометрии ответвителя на скорость испускания фотонов в волновод.

2. Расчет параметров структуры с тонкопленочным *Nb* резонатором на *Si* подложке

Рассмотрим структуру с линией передачи, ширина которой составляет w = 0,15 мм, величина зазора до заземленного полигона g = 0,083 мм. Размеры резонатора следующие: ширина резонатора $w_{pe3} = 0,05$ мм, зазор до заземленного полигона $g_{pe3} = 0,03$ мм. В качестве сверхпроводника используется *Nb* с критической температурой $T_c = 9,2K$. Материал подложки – кремний (без потерь, что справедливо для $T < T_c$) с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 11,9$, высота подложки H = 525 мкм. Согласно вышеописанным формулам получаем

 $L_s = 0,406 \frac{\text{мк}\Gamma\text{H}}{\text{м}}$, $C = 171,697 \frac{\text{п}\Phi}{\text{м}}$ и волновое сопротивление Z = 48,6 Ом, которое выбрано для согласования с 50-омными выводами.

К примеру, выберем резонансную частоту, равную $f_{\rm pe3}$ = 1,612 ГГц , что соответствует длине резонатора $l_{\rm pe3}$ = 18,56 мм .

Рассмотрим две различные геометрии ответвителя, представленные на рис. 3. Сначала структуру с наличием заземленного полигона, шириной d = 0,05 мм между линией передачи и резонатором (рис. 3, *a*). Затем рассмотрим структуру без него (рис. 3, *б*).

2.1. Структура со сплошным непрерывным полигоном земли

На рис. 4 представлена зависимость резонансной частоты от длины ответвителя для структуры с заземленным полигоном между ответвителем и волноводной линией. Сплошной линией показана теоретическая зависимость, точками отмечена зависимость, полученная по результатам численного моделирования. Теоретическая кривая была получена с помощью формулы (12).



Рис. 4 – Зависимость резонансной частоты от длины ответвителя. Линией обозначена зависимость, полученная по формуле (12), точками – результаты численного моделирования

Fig. 4 – Resonance frequency dependence on of the coupler's length. Dependence derived from (12) (solid-line), simulate on results (dots)

Таким образом, мы видим, что в данном случае ответвитель модифицирует резонансную частоту в соответствии с (12).

Согласно [13] добротность связи определяется из эквивалентной схемы Нортона, в которой распределенная структура представлена в сосредоточенном базисе:

$$Q_{\text{CBR3H}} = 4\pi^2 \omega_{\text{pe3}} C_{\mathfrak{I} \mathsf{K} \mathsf{B}} \left(\frac{R^* R_p}{R^* + 2R_p} \right) \approx 2\pi^2 \omega_{\text{pe3}} C_{\mathfrak{I} \mathsf{K} \mathsf{B}} R^* , \qquad (14)$$

где $R_p = \frac{Z}{\alpha L_{\text{pe3}}}$ стремится к бесконечности, поскольку мы вначале положили по-

тери равными нулю, т. е. $\alpha = 0$. Здесь $R^* = \frac{1 + \omega_{pe3}^2 C_{cB}^2 R_H^2}{\omega_{pe3}^2 C_{cB}^2 R_H} \frac{1}{2}, C^* = \frac{2C_{cB}}{1 + \omega_{pe3}^2 C_{cB}^2 R_H^2},$

где $\omega_{pe3} = 2\pi f_{pe3}$, C_{cB} – емкость связи между резонатором и линией передачи, $R_{\rm H} = 50 \,\text{OM}$ – сопротивление нагрузки. Эквивалентные емкость и индуктивность $C_p = \frac{C(l_{pe3} + l_0)}{2}$, $L_p = L_s(l_{pe3} + l_0)$. Емкостную связь между линией передачи и

ответвителем будем рассчитывать из формул, полученных в работе [14], где определялась погонная емкость между симметричными копланарными линиями, а индуктивной связью пренебрегаем, полагая, что в рассматриваемом диапазоне длин добротность будет определяться только емкостной связью.



Рис. 5 – Эквивалентная схема резонатора, непрямым образом взаимодействующего с волноводной линией [13]
 Fig. 5 – Theequivalent scheme of a side coupled resonator [13]

Определим емкость связи при наличии заземленного полигона шириной *d* [14]:

$$C_{\rm CB} = -\frac{2\varepsilon_{3\phi\phi}\varepsilon_0 l_0}{\pi} \ln\left(1 - \left(\frac{\left(\langle w \rangle + \langle g \rangle\right) - \langle g \rangle / 4}{d + \langle w \rangle + 2\langle g \rangle}\right)^2\right) \frac{w}{w_{\rm pe3}}.$$
 (15)

Поскольку в [14] рассмотрен случай симметричных линий, а в нашем случае ширина волноводной линии отличается от ширины резонаторной линии, то в формулу (15) был внесен поправочный коэффициент, равный отношению ширины волноводной линии к ширине резонаторной линии, который был получен нами эмпирическим путем. Все значения высчитывались как средние от исходных размеров:

$$\langle w \rangle = \frac{w + w_{\text{pe3}}}{2},$$

 $\langle g \rangle = \frac{g + g_{\text{pe3}}}{2}.$

На рис. 6 приведены теоретическая зависимость добротности, рассчитанная по формуле (14) с учетом модифицированной емкости связи (15), и значения добротности, полученные из результатов численного моделирования.



Рис. 6 – Зависимость добротности копланарного резонатора от длины ответвителя. Линией обозначена зависимость, полученная по формуле (14), точками – результаты численного моделирования

Fig. 6 –The quality factor dependence on the coupler's length. The dependence derived from (14)(solidline), simulation results (dottedline)

В ходе моделирования (сплошная кривая на рис. 6) добротность определялась из АЧХ следующим выражением: $Q_{\rm M} = \frac{f_{\rm pe3}'}{\Delta f}$. Здесь Δf – ширина резонансной кривой по уровню –3 дБ, а $f_{\rm pe3}'$ – резонансная частота, полученная из моделирования. Зависимость добротности копланарного резонатора, по результатам численного моделирования, и расчетная зависимость, с учетом поправочного коэффициента для несимметричной линии, хорошо согласуются до тех пор, пока длина ответвителя не станет соизмеримой с размерами резонатора. Это означает, что заметное влияние оказывают краевые эффекты, которые не учитываются приведенными выше формулами. Более того, мы видим, что при малых длинах ответвителя теля добротность стремится к добротности открытой линии, что объясняется тем, что в этом случае практически пропадает связь волновода с резонатором, и сигнал проходит, не взаимодействуя с последним из-за экранирующих свойств непрерывного полигона земли.

3. Случай без сплошного непрерывного полигона

На рис.7 представлена зависимость резонансной частоты от длины ответвителя для структуры при отсутствии заземленного полигона между ответвителем и волноводной линией. Сплошной линией показана теоретическая зависимость, точками отмечена зависимость, полученная по результатам численного моделирования. Теоретическая кривая также была получена с помощью формулы (12).

В этом случае емкость связи определяется как

$$C_{\rm cB} = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 l_0}{\pi} \ln\left(\frac{\langle w \rangle}{\langle g \rangle / 4} \frac{\langle w \rangle}{2\langle w \rangle - \langle g \rangle / 4}\right) \frac{w}{w_{\rm pes}}.$$
 (16)



Рис. 7 – Зависимость резонансной частоты от длины ответвителя в случая отсутствия земляного полигона

Fig. 7 – The dependence of resonance frequency on the coupler's length for the case without ground strip

На рис. 8 представлены зависимости добротности копланарного резонатора от длины ответвителя, сплошная линия – расчетные значения, пунктирная – результаты моделирования. Также при соизмеримости ширины линии резонатора и длины ответвителя происходит расхождение формулы из-за краевых эффектов.



Рис. 8 – Зависимость добротности резонатора от длины ответвителя
 Fig. 8 – The dependence of the quality factor on the coupler's length

Таким образом, полученные формулы хорошо описывают зависимость добротности резонатора от геометрических размеров ответвителя. Данные добротности однозначно связаны со скоростью излучения Г из резонатора в волновод:

$$\Gamma = \frac{\omega_{\text{pe3}}}{Q}$$

Заключение

В данной работе были исследованы зависимости добротности и фундаментальной частоты сверхпроводникового копланарного резонатора, непрямым образом связанного с линией передачи, от длины ответвителя. Рассмотрены два случая копланарной структуры при наличии заземленного полигона между резонатором и линией, а также при его отсутствии. Для обеих конфигураций был определен поправочный коэффициент, позволяющий обобщить формулы [14] на случай несимметричных линий. Это дало возможность сравнить расчетные зависимости величины добротности от длины ответвителя с результатами численного моделирования. Используя полученные формулы, в проектируемую структуру можно заранее закладывать данные параметры с учетом сверхпроводимости, что должно сократить время на проектирование систем с подобным типом связи между резонатором и линией. Поскольку современные методы численного расчета СВЧ структур имеют высокую точность, то полученные результаты также являются достаточно точными.

ЛИТЕРАТУРА

- Thompson R.J., Rempe G., Kimble H.J. Observation of normal-mode splitting for an atom in an optical cavity // Physical Review Letters. – 1992. – Vol. 68. – P. 1132.
- 2. Haroche S., Raimond J.M. Exploring the quantum: atoms, cavities, and photons. Oxford: Oxford university press, 2006.
- Quantum information processing using quantum dot spins and cavity QED / A. Imamog, D.D. Awschalom, G. Burkard, D.P. Divincenzo, D. Loss, M. Sherwin, A. Small // Physical Review Letters. – 1999. – Vol. 83. – P. 4204.
- Circuit QED with a flux qubit strongly coupled to a coplanar transmission line resonator / T. Lindstrom, C.H. Webster, J.E. Healey, M.S. Colclough, C.M. Muirhead, A.Ya. Tzalenchuk // Superconductor Science and Technology. – 2007. – Vol. 20. – P. 814–821.
- Superconducting qubit-oscillator circuit beyond the ultrastrong-coupling regime / F. Yoshihara, T. Fuse, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito, K. Semba // Nature Physics. – 2017. – Vol. 13. – P. 44–47. – doi: 10.1038/nphys3906.
- Coupling a quantum dot, fermionic leads, and a microwave cavity on a chip / M.R. Delbecq, V. Schmitt, F.D. Parmentier, N. Roch, J.J. Viennot, G. Fève, B. Huard, C. Mora, A. Cottet, T. Kontos // Physical Review Letters. – 2011. – Vol. 25. – P. 256804.
- Out-of-equilibrium charge dynamics in a hybrid circuit quantum electrodynamics architecture / J.J. Viennot, M.R. Delbecq, M.C. Dartiailh, A. Cottet, T. Kontos // Physical Review B. - 2014. – Vol. 89 (16). – P. 165404.
- Zheng H., Baranger H.U. Persistent quantum beats and long-distance entanglement from waveguide-mediated interactions // Physical Review Letters. – 2013. – Vol. 110. – P. 113601.
- Transport properties of a microwave photon in a system with two artificial atoms / A.N. Sultanov, Ya.S. Greenberg, D.S. Karpov, B.I. Ivanov, S.N. Shevchenko // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2016): труды 13 международной научно-технической конференции, Новосибирск, 3–6 октября 2016 г.: в 12 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 2. – С. 38–41.
- Frequency division multiplexing readout and simultaneous manipulation of an array of flux qubits / M. Jerger, S. Poletto, P. Macha, U. Hübner, E. Il'ichev, A.V. Ustinov // Applied Physics Letters. - 2012. - Vol. 101. - P. 042604. - doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.4739454.
- Detection of weak microwave fields with an underdamped Josephson junction / G. Oelsner, C.K. Andersen, M. Rehák, M. Schmelz, S. Anders, M. Grajcar, U. Hübner, K. Mølmer, E. Il'ichev // Physical Review Applied. – 2017. – Vol. 7. – P. 014012.
- 12. **Hofmann S.** Design, fabrication and characterization of a microwave resonator for circuit QED: diploma thesis / Technical University of Munich. Munich, 2007.

- Coplanar waveguide resonators for circuit quantum electrodynamics / M. Göppl, A. Fragner, M. Baur, R. Bianchetti, S. Filipp, J.M. Fink, P.J. Leek, G. Puebla, L. Steffen, A. Wallraff // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 104. – P. 113904. – doi: http://dx.doi. org/10.1063/1.3010859.
- Martinis J.M., Barends R., Korotkov A.N. Calculation of coupling capacitance in planar electrodes [Electronic resource]. – URL: https://arxiv.org/pdf/1410.3458.pdf (accessed: 26.04.2017).

DESIGN OF SUPERCONDUCTING SIDE-COUPLED COPLANAR RESONATOR

Mutsenik E.A., Sultanov A.N., Ivanov B.I.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In this article we show analytical equations to design a side coupled coplanar resonator and predefine its fundamental frequency and photon emission rate to the waveguide as well as its Q-factor before numerical simulation. It helps to accelerate the design process and make some optimization in special cases. To define parameters of the coplanar line in the superconducting state we used two fluid modes together with the standard conformal mapping technique. We analyze two designs of side coupled quarter wavelength resonators and compare the simulation results with analytical dependences.

Keywords: Superconductive coplanar resonator, side-coupled resonator.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-85-97

REFERENCES

- 1. Thompson R.J., Rempe G., Kimble H.J. Observation of normal-mode splitting for an atom in an optical cavity. *Physical Review Letters*, 1992, vol. 68, p. 1132.
- 2. Haroche S., Raimond J.M. *Exploring the quantum: atoms, cavities, and photons*. Oxford, Oxford University Press, 2006.
- Imamog A., Awschalom D.D., Burkard G., Divincenzo D.P., Loss D., Sherwin M., Small A. Quantum information processing using quantum dot spins and cavity QED. *Physical Review Letters*, 1999, vol. 83, p. 4204.
- Lindstrom T., Webster C.H., Healey J.E., Colclough M.S., Muirhead C.M., Tzalenchuk A.Ya. Circuit QED with a flux qubit strongly coupled to a coplanar transmission line resonator. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, pp. 814–821.
 Yoshihara F., Fuse T., Ashhab S., Kakuyanagi K., Saito S., Semba K. Superconducting
- Yoshihara F., Fuse T., Ashhab S., Kakuyanagi K., Saito S., Semba K. Superconducting qubit-oscillator circuit beyond the ultrastrong-coupling regime. *Nature Physics*, 2017, vol. 13, pp. 44–47. doi: 10.1038/nphys3906.
- 6. Delbecq M.R., Schmitt V., Parmentier F.D., Roch N., Viennot J.J., Fève G., Huard B., Mora C., Cottet A., Kontos T. Coupling a quantum dot, fermionic leads, and a microwave cavity on a chip. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 25, p. 256804.
- Viennot J.J., Delbecq M.R., Dartiailh M.C., Cottet A., Kontos T. Out-of-equilibrium charge dynamics in a hybrid circuit quantum electrodynamics architecture. *Physical Review B*, 2014, vol 89 (16), p. 165404.
- 8. Zheng H., Baranger H.U. Persistent quantum beats and long-distance entanglement from waveguide-mediated interactions. *Physical Review Letters*, 2013, vol. 110, p. 113601.
- Sultanov A.N., Greenberg Ya.S., Karpov D.S., Ivanov B.I., Shevchenko S.N. Transport properties of a microwave photon in a system with two artificial atoms. *Trudy XIII mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnogo priborostroeniya"*, APEP-2016: v 12 t. [13th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2016: proceedings: in 12 vol.], Novosibirsk, 3–6 October 2016, vol. 2, pp. 38–41.
- Jerger M., Poletto S., Macha P., Hübner U., Il'ichev E., Ustinov A.V. Frequency division multiplexing readout and simultaneous manipulation of an array of flux qubits. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, p. 042604. doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.4739454.
- Oelsner G., Andersen C.K., Rehák M., Schmelz M., Anders S., Grajcar M., Hübner U., Mølmer K., Il'ichev E. Detection of weak microwave fields with an underdamped Josephson junction. *Physical Review Applied*, 2017, vol. 7, p. 014012.

- 12. Hofmann S. *Design, fabrication and characterization of a microwave resonator for circuit QED*: diploma thesis. Technical University of Munich. Munich, 2007.
- Göppl M., Fragner A., Baur M., Bianchetti R., Filipp S., Fink J.M., Leek P.J., Puebla G., Steffen L., Wallraff A. Coplanar waveguide resonators for circuit quantum electrodynamics. *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 104, p. 113904. doi: http://dx.doi.org/10.1063/ 1.3010859.
- 14. Martinis J.M., Barends R., Korotkov A.N. *Calculation of coupling capacitance in planar electrodes*. Available at: https://arxiv.org/pdf/1410.3458.pdf. (accessed 26.04.2017)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Муценик Евгения Александровна – родилась в 1992 году, магистрант кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. (Адрес: 630073, Росссия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Е-mail: mutsenik.e@gmail.com).

Mutsenik Evgeniya Alexandrovna (b. 1992) – a master student at the Department of design and technology of radio electronic devices in the Novosibirsk State Technical University. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: mutsenik.e@gmail.com).



Султанов Айдар Наильевич – родился в 1991 году, аспирант кафедры прикладной и теоретической физики, м.н.с. Лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. (Адрес: 630073, Росссия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sultanov.aydar@ngs.ru).

Sultanov Aydar Nail'evich (b. 1991) – PhD student at the Department of design and technology of radio electronic devices in the Novosibirsk State Technical University. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sultanov.aydar@ngs.ru).



Иванов Борис Игоревич – родился в 1986 году, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории криогенной квантовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Опубликовано 12 научных работ. (Адрес: 630073, Росссия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Е-mail: to ivanov boris@yahoo.com).

Ivanov Boris Igorevich (b. 1986) – Candidate of Sciences (Eng.), senior scientist in the cryogenic quantum electronics laboratory in Novosibirsk State Technical University. He is the author of 12 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: to_ivanov_boris@yahoo.com).

Статья поступила 10 марта 2017 г. Received March 10, 2017

To Reference:

Mutsenik E.A., Sultanov A.N., Ivanov B.I. Proektirovanie sverkhprovodnikovogo koplanarnogo rezonatora nepryamym obra-zom vzaimodeistvuyuego s volnovodnoi liniei [Design of superconducting side-coupled coplanar resonator]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 85–97. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-85-97

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

январь-март

№ 1 (34)

УДК 621.313.282.2

2017

СРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ ДВУХКАТУШЕЧНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ СО СВОБОДНЫМ ВЫБЕГОМ БОЙКА

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

Новосибирский государственный технический университет

Рассматриваются результаты создания комплексной динамической модели двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка. Приводится сравнение рабочих циклов электромагнитных ударных узлов, обеспечивающих наиболее рациональное формирование ударных импульсов сил при передаче энергии в деформируемую среду и характеризующихся различными способами реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, ускоряемой в магнитном поле катушек. В качестве объекта исследований рассматривается электромагнитный ударный узел двухкатушечной синхронной электромагнитной машины, получающий питание от однофазного источника напряжения промышленной частоты с заданным алгоритмом управления и включающий в себя многомассовую механическую колебательную систему с упругими связями. Создана математическая модель динамики ударного узла, обеспечивающая возможности всестороннего анализа электромеханических процессов в различных режимах. Основу комплексной модели составляют дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной системы и механическое взаимодействие поступательно движущихся масс, полученные с помощью уравнений Лагранжа второго рода. Методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink рассмотрены примеры численной реализации модели и выполнено сравнение рабочих циклов между собой. Установлена предпочтительность в использовании рабочего цикла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, обеспечивающего при прочих равных условиях работы ударного узла более рациональное формирование ударных импульсов сил и имеющего более высокую энергию удара и полезную ударную мощность при взаимодействии с деформируемой средой.

Ключевые слова: электромагнитный ударный узел, свободный выбег бойка, математическая модель, сравнение рабочих циклов, многомассовая механическая колебательная система, уравнения Лагранжа, упругие связи, энергия удара, скорость бойка.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-98-115

Введение

Электромагнитные машины возвратно-поступательного движения, созданные на базе линейных электромагнитных двигателей, получили широкое применение в промышленности для обеспечения многих технологических процессов [1–4].

Благодаря конструктивной простоте и надежности электромагнитные двигатели используются в составе электромагнитного привода прессов, виброисточников, ручного ударного электроинструмента и другого виброударного оборудования с частотой ударных воздействия до 3000 уд/мин [5–9].

Несмотря на давнее использование электромагнитных машин методы для их расчета и проектирования, как и способы реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, продолжают совершенствоваться [10–15].

Перспективным направлением исследований в данной области следует признать совершенствование ударных узлов, созданных на основе синхронных элек-

© 2017 Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

тромагнитных машин, для которых частота ударных импульсов сил равна или кратна частоте промышленной сети 50 Гц [16, 17].

Практическое использование синхронных электромагнитных машин позволяет достигать высоких удельных характеристик, а также добиваться некоторого снижения энергопотребления за счет работы ударного узла в околорезонансных режимах [18, 19].

Учитывая, что питание ударных узлов осуществляется от источника однофазного напряжения бытовой осветительной сети, то увеличение энергии удара ограничивается значениями допустимой амплитуды тока.

Одним из возможных путей снижения амплитуды импульсов тока и улучшения электромагнитной совместимости является использование рабочих циклов со свободным выбегом бойка [20, 21]. Использование рабочих циклов со свободным выбегом бойка ограничивает амплитуду тока и уменьшает влияние работы ударно узла на питающую сеть.

Свободный выбег бойка осуществляется за время бестоковой паузы в подаче импульсов напряжения, в течение которой боек движется по инерции в заданном направлении.

Первый вариант ударного узла и реализованный на его основе способ управления предусматривает свободный выбег бойка в направлении рабочего инструмента [22], второй – в направлении буферного устройства, осуществляющего его остановку и реверс при обратном ходе.

В настоящее время конфигурация и структура двухкатушечного ударного узла, реализующего свободный выбег, определены только на уровне принципа действия.

В этой связи сохраняет свою актуальность вопрос в выборе варианта ударного узла, обеспечивающего необходимую характеристику движения ударной массы бойка и рациональное формирование ударного импульса силы за время рабочего цикла.

Целью работы является создание комплексной динамической модели двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка, характеризующейся различными способами реализации движения ударной массы, и сравнение на ее основе рабочих циклов, обеспечивающих наиболее рациональное формирование ударных импульсов сил.

1. Двухкатушечный электромагнитный ударный узел со свободным выбегом бойка

Принцип действия двухкатушечного ударного узла и способы реализации рабочих циклов со свободным выбегом бойка подробно изложены в работе [23].

Работа ударного узла осуществляется при полной синхронизации положений бойка с импульсами напряжения (тока), подаваемыми на катушки прямого и обратного хода.

На рис. 1 приведены диаграммы, поясняющие работу ударного узла со свободным выбегом бойка. На диаграммах положения бойка совмещены с импульсами напряжения (тока), поступающими на катушки, и синхронизированы по времени с частотой питающего источника.

Для свободного выбега бойка в катушке прямого хода и питании от однофазного источника последовательность подачи импульсов напряжения (рис. 1, *a*) формально описывается следующими неравенствами:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t$$
, при $(k-1)2\pi \le \omega t < 2k\pi$; (1)

$$u_2(t) = U_m \sin \omega t$$
, при $(4k-3)\pi \le \omega t < (4k-1)\pi$, (2)

где k = 1, 2... – порядковый номер управляющих импульсов напряжения, подаваемых на катушки; $u_1(t)$, $u_2(t)$ – напряжение на катушке прямого и обратного хода; U_m – амплитуда напряжения; ω – циклическая частота.

На рис. 1, *б* – аналогичные диаграммы работы ударного узла со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t$$
, при $(4k-1)\pi \le \omega t < (4k+1)\pi$; (3)

$$u_2(t) = U_m \sin \omega t$$
, при $(k-1)2\pi \le \omega t < 2k\pi$. (4)

При определенном формировании в катушках импульсов тока возникает соответствующая импульсам и положениям бойка знакопеременная электромагнитная сила.





Рис. 1 – Диаграммы рабочих циклов ударного узла со свободным выбегом бойка: *а* – в катушке прямого хода; *б* – в катушке обратного хода

Fig. 1 - Diagrams of operating shock assembly cycles by coasting striker: a - in the coil forward stroke; b - in the flyback coil

Полный рабочий цикл ударного узла осуществляется за время двух периодов напряжения однофазного источника, что при частоте $f = 50 \,\Gamma$ ц обеспечивает синхронную частоту ударных импульсов сил $n_{\rm yg}$ и длительность времени рабочего цикла $t_{\rm u}$:

$$n_{\rm yg} = \frac{60 f}{2 p} = 25 \,\mathrm{c}^{-1} \,$$
 (1500 уд/мин); $t_{\rm II} = \frac{2 p}{f} = 0,04 \,\mathrm{c}$,

где 2p = 2 – число периодов напряжения в течение времени одного рабочего пикла.

Один из возможных вариантов двухкатушечного ударного узла, реализующего рабочий цикл со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, приведен на рис. 2, *a*. На рис. 2, *б* – вариант ударного узла, реализующий рабочий цикл со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода.



Рис. 2 – Двухкатушечный электромагнитный ударный узел со свободным выбегом бойка:
 а – в катушке прямого хода; б – в катушке обратного хода
 Fig. 2 – Dvuhkatushechny electromagnetic hammer assembly by coasting striker:

a – in the coil forward stroke; δ – in the flyback coil

Для реализации рабочих циклов со свободным выбегом бойка (рис. 2, a и δ) используется система из двух катушек прямого l и обратного 2 хода, заключенных в общий магнитопровод 3. При формировании в катушках импульсов тока возникает знакопеременная электромагнитная сила, обеспечивающая ускорение ударной массы бойка 4 в направлении рабочего инструмента 5 или буферной пружины 6, выполняющей остановку и реверс бойка 4. Совершая цикличные движения, боек 4 периодически взаимодействует с рабочим инструментом 5 и буферной пружиной 6. При остановке бойка 4 на обратном ходе его кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию при сжатии пружины 6, и обратно в кинетическую энергию при ускорении бойка 4 с рабочим инструментом 5 основная часть кинетической энергии передается в деформируемую среду 7.

В варианте ударного узла на рис. 2, *а* катушка *1* прямого хода обеспечивает разгон бойка *4* электромагнитными силами в двух направлениях. При обратном

ходе боек 4 ускоряется под действием электромагнитных сил катушки *1* прямого и катушки 2 обратного хода, а при прямом ходе – только от действия электромагнитных сил катушки *1* прямого хода.

В варианте ударного узла на рис. 2, δ рабочий процесс меняется на обратный. При обратном ходе боек ускоряется только от действия электромагнитных сил катушки 2 обратного хода, а при прямом ходе – от действия электромагнитных сил обеих катушек.

Усилием нажатия $F_{\rm H}$ обеспечивается необходимая устойчивая связь ударного узла с рабочим инструментом 5 при передаче ударного импульса сил в деформируемую среду 7.

Для снижения амплитуды вибраций в промежутке между основанием 8 крепления ударного узла и электроприводом установлен упругий виброизолирующий элемент 9.

2. Методы решения

Согласно установленным связям и действующим в системе обобщенным силам, расчетная схема механической части ударного узла обладает N = 4 степенями свободы и содержит в своем составе традиционные массоинерционные звенья с упругими связями, возбуждаемые внешними электромагнитными силами катушек прямого и обратного хода.

На начальном этапе полагаем, что ударного взаимодействия в механической системе не возникает. Процесс движения в системе является результатом наложения вынужденных и свободных колебаний от действия внешней периодической силы [24].

В качестве обобщенных координат здесь принимаем линейные перемещения центра масс бойка – x_1 массой m_1 , рабочего инструмента – x_2 массой m_2 , электропривода – x_3 массой m_3 , крепления – x_4 с присоединенной к нему массой m_4 .

Колебания системы в пространстве будут описываться зависимостью обобщенных координат от времени, отсчитываемых от положения статического равновесия.

Уравнения движения механической системы получим на основании уравнений Лагранжа второго рода [25]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \qquad i = 1, 2, \dots, N,$$
(5)

где T – кинетическая энергия системы; П – потенциальная энергия системы; Ф – диссипативная функция системы (функция Рэлея); $\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}$, $\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}$, Q_i – обобщенные силы упругости, сопротивления движению и внешних воздействий, соответствующие *i*-й обобщенной координате; x_i – обобщенные координаты; \dot{x}_i – обобщенные координаты; \dot{x}_i – обобщенные координаты; N – число степеней свободы механической системы (N = 4).

В выбранной системе координат принимаем положение устойчивого статического равновесия системы за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной

энергии. Последовательно определяя и внося значения производных от кинетической,

потенциальной энергии системы, функции Рэлея в уравнение (5), учитывая внеш-

ние воздействия и ранее установленные связи [24], позволяют образовать систему дифференциальных уравнений без учета ударного взаимодействия инерционных масс в следующем виде:

$$m_{1}\frac{d^{2}x_{1}}{dt^{2}} + b_{1}\left(\frac{dx_{1}}{dt} - \frac{dx_{3}}{dt}\right) + k_{1}\left(x_{1} - x_{3}\right) = f_{\mathfrak{M}}\left(i, x_{1}\right) - f_{\mathfrak{T}p_{13}}\operatorname{sign}\frac{dx_{1}}{dt};$$
(6)

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) + k_2 x_2 - k_3 \left(x_3 - x_2\right) = -f_{\text{Tp}_{23}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \quad (7)$$

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) + b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) - b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) - k_1 \left(x_1 - x_3\right) + b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) - b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_4}{dt}\right) - b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac$$

$$+k_{3}(x_{3}-x_{2})-k_{4}(x_{4}-x_{3})=-f_{_{3M}}(i, x_{1})+(f_{_{TP_{13}}}+f_{_{TP_{23}}}+f_{_{TP_{34}}})\operatorname{sign}\frac{dx_{3}}{dt}; \quad (8)$$

$$m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} + b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt}\right) + k_4 \left(x_4 - x_3\right) = -f_{\text{Tp}_{34}} \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt} - F_{\text{H}}, \tag{9}$$

где $f_{\Im M}(i, x_1) = f_{\Im M1}(i_1, x_1) + f_{\Im M2}(i_2, x_1)$ – вынуждающая электромагнитная сила; $f_{Tp_{13}}, f_{Tp_{23}}, f_{Tp_{34}}$ – силы сухого трения скольжения; F_{H} – постоянная величина усилия нажатия.

При этом механическая и магнитная системы связаны зависимостями электромагнитного усилия $f_{3M1} = f(i_1, x_1)$ и $f_{3M2} = f(i_2, x_1)$ от величины протекающего тока i_1 , i_2 и координаты x_1 положения бойка. Также магнитная и электрическая системы связаны зависимостями величины потокосцепления $\psi_1 = f(i_1, x_1)$ и $\psi_2 = f(i_2, x_1)$.

Уравнения электрического равновесия, связывающие все системы, используем в известном виде:

$$u_{1}(t) = i_{1} r_{1} + \frac{d\psi_{1}(i_{1}, x_{1})}{dt}; \qquad (10)$$

$$u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_2, x_1)}{dt}, \qquad (11)$$

где r_1 , r_2 – активные сопротивления в цепи катушек.

Положение бойка при его движении можно описать независимой системой равенств с привязкой к полюсной системе одной из катушек с помощью фиксированных координат h_1 , h_2 и h_3 относительно ударного сечения рабочего инструмента

Например, для ударного узла на рис. 2, *а* – относительно полюсной системы катушки прямого хода:

$$x_{1}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } \left| \delta_{1}^{-} \right| = h_{2} - h_{1}; \\ h_{2} - h_{1} - \left| \delta_{1}^{-} \right|, & \text{при } 0 < x_{1} \le h_{2} - h_{1}; \\ h_{2} - h_{1} + \delta_{1}^{+}, & \text{при } x_{1} > h_{2} - h_{1}, \end{cases}$$
(12)

где δ_1^- , δ_1^+ – рабочие воздушные зазоры, образованные положением бойка относительно верхней и нижней полюсной системы катушки прямого хода.

Для ударного узла на рис. 2, *б* – относительно полюсной системы катушки обратного хода:

$$x_{1}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } \delta_{2}^{+} = h_{2} - h_{1}; \\ h_{2} - h_{1} - \delta_{2}^{+}, & \text{при } 0 < x_{1} \le h_{2} - h_{1}; \\ h_{2} - h_{1} + \left|\delta_{2}^{-}\right|, & \text{при } x_{1} > h_{2} - h_{1}, \end{cases}$$
(13)

где δ_2^- , δ_2^+ – рабочие воздушные зазоры, образованные положением бойка относительно нижней и верхней полюсной системы катушки обратного хода.

Учитывая, что сила, обусловленная упругими свойствами буферной пружины, линейно зависит от координаты положения бойка, а сила сопротивления движению пропорциональна его скорости, то составляющие этих сил могут быть описаны кусочно-линейными функциями, удовлетворяющие условиям:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_{1}} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \le x_{1} < h_{3} - h_{1}; \\ k_{1} \left(x_{1} - x_{3} \right), & x_{1} \ge h_{3} - h_{1}; \end{cases}$$
(14)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_{l}} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \le x_{l} < h_{3} - h_{l}; \\ b_{l} \left(\frac{dx_{l}}{dt} - \frac{dx_{3}}{dt} \right), & x_{l} \ge h_{3} - h_{l}. \end{cases}$$
(15)

Из условия (15) следует, что процесс рассеяния энергии, вызванный диссипативными силами упругих связей, может возникать только при работе сил этих связей.

Также полагаем, что сопротивление и упругие свойства деформируемой среды, оказываемые перемещению рабочего инструмента, зависят от свойств введенных упругих связей.

Окончательно рассматривая процесс движения как результат совместного действия вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обобщенная модель динамического состояния электромеханической системы ударного узла (рис. 2, a и δ), описываемая уравнениями (6)–(11) при установленных ограничениях (12)–(15) и заданных алгоритмах управления, приводится к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} u_{1}(t) = i_{1} n_{1} + \frac{d\Psi_{1}(i_{\mu1}, x_{1})}{dt}; \\ u_{2}(t) = i_{2} r_{2} + \frac{d\Psi_{2}(i_{\mu2}, x_{1})}{dt}; \\ i_{1} = i_{n1} + i_{\mu1}; \quad i_{2} = i_{n2} + i_{\mu2}; \\ \\ m_{1} \frac{d^{2} x_{1}}{dt^{2}} = \begin{cases} N_{1} \pm f_{3M1}(i_{\mu1}, x_{1}) \pm f_{3M2}(i_{\mu2}, x_{1}) - f_{\tau p_{13}} \operatorname{sign} \frac{dx_{1}}{dt}, \\ \operatorname{ecnu} \frac{dx_{1}}{dt} > 0, \quad \operatorname{npu} \ 0 \le x_{1} < h_{3} - h_{1}; \\ -\tilde{\lambda}_{1} \pm f_{3M1}(i_{\mu1}, x_{1}) \pm f_{3M2}(i_{\mu2}, x_{1}) - f_{\tau p_{13}} \operatorname{sign} \frac{dx_{1}}{dt} \\ \operatorname{npu} x_{1} \ge h_{3} - h_{1}; \\ \pm f_{3M1}(i_{\mu1}, x_{1}) \pm f_{3M2}(i_{\mu2}, x_{1}) - f_{\tau p_{13}} \operatorname{sign} \frac{dx_{1}}{dt}, \\ \operatorname{ecnu} \frac{dx_{1}}{dt} < 0, \quad \operatorname{npu} \ 0 \le x_{1} < h_{3} - h_{1}; \\ \frac{d^{2} x_{2}}{dt^{2}} = -N_{2} - \tilde{\lambda}_{2} + \tilde{\lambda}_{3} + f_{\tau p_{23}} \operatorname{sign} \frac{dx_{2}}{dt}; \\ m_{3} \frac{d^{2} x_{3}}{dt^{2}} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_{3} + \tilde{\lambda}_{4} \pm f_{3M1}(i_{\mu1}, x_{1}) \pm f_{3M2}(i_{\mu2}, x_{2}) + \\ + (f_{\tau p_{13}} + f_{\tau p_{23}} + f_{\tau p_{34}}) \operatorname{sign} \frac{dx_{3}}{dt}; \operatorname{npu} \ 0 \le x_{1} < h_{3} - h_{1}; \\ -\tilde{\lambda}_{1} - \tilde{\lambda}_{3} + \tilde{\lambda}_{4} \pm f_{3M1}(i_{\mu1}, x_{1}) \pm f_{3M2}(i_{\mu2}, x_{2}) + \\ + (f_{\tau p_{13}} + f_{\tau p_{23}} + f_{\tau p_{34}}) \operatorname{sign} \frac{dx_{3}}{dt}; \operatorname{npu} \ x_{1} \ge h_{3} - h_{1}; \\ m_{4} \frac{d^{2} x_{4}}{dt^{2}} = \tilde{\lambda}_{4} - f_{\tau p_{34}} \operatorname{sign} \frac{dx_{4}}{dt} - F_{\mathrm{H}}, \end{cases}$$

где
$$\tilde{\lambda}_1 = k_1(x_1 - x_3) + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right);$$
 $\tilde{\lambda}_2 = k_2 x_2 + b_2 \frac{dx_2}{dt};$ $\tilde{\lambda}_3 = k_3(x_3 - x_2) + b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right);$ $\tilde{\lambda}_4 = k_4 \left(x_4 - x_3 \right) + b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right);$ $i_{\Pi 1}, i_{\Pi 2}$ - составляющие тока потерь, вызванные вихревыми токами и гистерезисом в первой и во второй ка-

потерь, вызванные вихревыми токами и гистерезисом в первой и во второй катушке; $i_{\mu 1}$, $i_{\mu 2}$ – составляющие намагничивающего тока в первой и второй катушке; N_1 и N_2 – средняя величина импульсов сил в результате взаимодействия бойка и ударного инструмента в конце упругого удара [20, 21]. Полученная система дифференциальных уравнений динамики обобщенной модели ударного узла на рис. 2, *а* и *б* позволяет производить всесторонний анализ электромеханических процессов в различных режимах, учитывающих заданную последовательность в подаче импульсов напряжения на систему катушек, нелинейности в магнитной системе, степень подвижности инерционных масс и свойства упругих связей в механической системе, сопровождаемые различного рода потерями энергии, и главное – сравнение рабочих циклов, характеризующихся различными способами реализации движения ударной массы бойка.

Решение системы дифференциальных уравнений выполнялось методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink согласно рекомендациям [26–29].

Решение полевой части задачи выполнялось с использованием стандартных программ конечно-элементного моделирования магнитного поля [30, 31], с помощью которых определялись массивы значений опорных точек статических параметров потокосцепления $\psi_1 = f(i_1, \delta_1), \ \psi_2 = f(i_2, \delta_2)$ и электромагнитного усилия $f_{\Im M1} = f(i_1, \delta_1), \ f_{\Im M2} = f(i_2, \delta_2)$ [32].

Составляющие тока потерь $i_{\Pi 1}$ и $i_{\Pi 2}$ учтены в соответствии с рекомендациями [33, 34].

Структурная схема динамической модели в программе Matlab Simulink представлена на рис. 3.

Результаты моделирования в виде временных диаграмм процесса включения вариантов ударных узлов (рис. 2, *a* и б) представлены на рис. 4 и 5.

Расчеты выполнялись при идентичных параметрах моделей: $m_1 = 0,32$ кг; $m_2 = 0,36$ кг; $m_3 = 4,1$ кг; $m_4 = 0,4$ кг; $k_1 = 21 \cdot 10^3$ H/м; $k_2 = 2 \cdot 10^6$ H/м; $k_3 = 18 \cdot 10^6$ H/м; $k_4 = 60 \cdot 10^6$ H/м; $b_1 = 8$ H·c/м; $b_2 = 0$; $b_3 = 45$ H·c/м; $b_4 = 20$ H·c/м; $f_{\text{тр}13} = 2$ H; $f_{\text{тр}23} = 9$ H; $f_{\text{тр}34} = 5$ H.

Магнитопровод выполнен из электротехнической стали, близкой по магнитным свойства к стали марки 1212, сечением 710 мм². Боек – цельнометаллический, изготовлен из конструкционной стали 40ХН.

Количество витков и активное сопротивления катушек для конструкции ударного узла на рис. 2, *a*: $w_1 = 1525$, $r_1 = 12,8$ Ом ; $w_2 = 1290$, $r_2 = 11,9$ Ом . Для конструкции ударного узла на рис. 2, *б*: $w_1 = 1290$, $r_1 = 11,9$ Ом ; $w_2 = 1525$, $r_2 = 12,8$ Ом.

Действующее значение напряжения однофазного источника U = 220 В; частота 50 Гц.

Необходимая для работы ударного узла последовательность чередования периодических импульсов напряжения (тока) формировалась с помощью управляемых вентилей, реализованных с помощью блока «Electrical subsystem».

Сравнение на первый взгляд идентичных рабочих циклов выявило существенную разницу в выходных показателях ударных узлов (рис. 2), характеризующихся различными способами реализации движениям ударной массы бойка.

Для ударного узла (рис. 2, *a*) максимальные значения показателей по энергии удара и полезной механической мощности составили: $A_{yg} = 10,8 \text{ Дж}$; $P_{\text{мех}} = 271 \text{ Br}$. Это приблизительно на 20 % выше, чем для ударного узла на рис. 2, *б*, имеющего максимальные значения этих показателей: $A_{yg} = 8,8 \text{ Дж}$; $P_{\text{мех}} = 221 \text{ Br}$.



Puc. 3 – Структурная схема динамической модели в программе Matlab Simulink *Fig. 3* – Block diagram of the dynamic model in the program Matlab Simulink

Разницу в результатах поясняют диаграммы скорости движения и амплитуды колебаний бойка. Использование рабочего цикла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода обеспечивает скорость бойка в конце рабочего цикла $v_{\max 1} = 8,24$ м/с (рис. 4, *e*), что выше по сравнению с рабочим циклом со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода, скорость которого не превышает значения $v_{\max 1} = 7,45$ м/с (рис. 5, *e*).

Также реализация способа движения ударной массы бойка в варианте ударного узла на рис. 2, a обеспечивает более высокую амплитуду колебаний по отношению к варианту на рис. 2, δ .



Рис. 4 – Временные диаграммы процесса включения ударного узла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода (рис. 2, *a*):

а – напряжение на катушке прямого хода; б – напряжение на катушке обратного хода; в – ток катушки прямого хода; г – ток катушки обратного хода; д – рабочий ход бойка; е – скорость бойка

Fig. 4 – Timing diagrams of the process incorporating percussion unit by coasting striker in the coil forward run (Fig. 2, *a*):

a – voltage at the coil forward stroke; δ – the voltage on the flyback coil; *e* – the coil current of the forward stroke; *e* – Reverse coil current; ∂ – working stroke of the striker; *e* – the speed of the striker

Таким образом, по результатам моделирования следует очевидная предпочтительность в использовании рабочего цикла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, обеспечивающего при прочих равных условиях наиболее рациональное формирование ударных импульсов сил и имеющего более высокие показатели на выходе.


Рис. 5 – Временные диаграммы процесса включения ударного узла со свободным выбегом бойка в катушке обратного хода (рис. 2, б):

a – напряжение на катушке прямого хода; δ – напряжение на катушке обратного хода; e – ток катушки обратного хода; ∂ – рабочий ход бойка; e – скорость бойка

Fig. 5 – Timing diagrams of the process incorporating percussion unit by coasting striker in flyback coil (Fig. 2, *δ*.):

a – voltage at the coil forward stroke; δ – the voltage on the flyback coil; e – the coil current of the forward stroke; e – Reverse coil current; ∂ – working stroke of the striker; e – the speed of the striker

Заключение

Создана комплексная динамическая модель двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка, отличающаяся различными способами реализации движения ударной массы и наиболее полно отражающая взаимосвязи в электромеханической системе при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой.

Методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink рассмотрены примеры численной реализации модели и выполнено сравнение рабочих циклов между собой.

Установлена предпочтительность в использовании рабочего цикла со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, обеспечивающего при прочих рав-

ных условиях работы ударного узла более рациональное формирование ударных импульсов сил и имеющего более высокую энергию удара и полезную ударную мощность на выходе.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. 2012. № 1. С. 72–75.
- 2. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. Новосибирск: Наука, 1981. 150 с.
- Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
- 4. Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н. Электромагнитный привод линейных машин. Новосибирск: Наука, 1985. 153 с.
- 5. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 256–259.
- 6. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В. Электромагнитные прессы. Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
- 7. Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р., Гумерова М.Б. Математическое моделирование динамических режимов электромагнитных демпфирующих элементов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 5 (40). – С. 86–90.
- 8. Нейман В.Ю. Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 105–112.
- 9. Нейман В.Ю., Петрова А.А. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. 2007. № 9. С. 47а–50.
- 10. Татевосян А.А., Татевосян А.С. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325, № 4. С. 121–132.
- 11. Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р. Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 50–55.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (58). – С. 246–256.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214– 218.
- 14. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
- 15. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. № 2. С. 310–313.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
- Нейман В.Ю., Нейман Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем принудительного охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // Журнал Сибирского Федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 2. – С. 166–175.

- Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы: коллективная монография / Новосибирский государственный технический университет; под ред. В.Н. Аносова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. С. 155–169.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 280–285.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–114.
- 22. А. с. 1525856 СССР, МКИ Н 02 Р 7/62. Способ управления двухкатушечным электромагнитным двигателем / А.А. Перьев, Е.М. Тимошенко, А.Л. Осокин, В.М. Борисов. – № 4104981/24-07; заявл. 30.05.86; опубл. 30.11.89, Бюл. № 44.
- Перьев А.А. Обоснование технических характеристик ручных электромагнитных машин с повышенной энергией ударов // Импульсные линейные электрические машины: сборник научных трудов / отв. ред. Н.П. Ряшенцев. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 71–81.
- 24. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 6. С. 35–40.
- 25. Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1983. 576 с.
- 26. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75–87.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
- 30. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. М.: Академия, 2005. 336 с.
- Татевосян А.С., Татевосян А.А. Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 96 с.
- 32. Нейман Л.А., Шабанов А.С., Нейман В.Ю. Решение задачи учета нелинейных свойств динамической модели электромагнитного привода // Теория и практика современной науки: материалы XIX Международной научно-практической конференции. – М., 2015. – С. 58–63.
- 33. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.
- 34. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.

COMPARISON OF THE OPERATING CYCLES DYNAMICS OF THE TWO-INDUCTOR SYNCHRONOUS IMPACT ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH HEAD FREE RUNNING-OUT

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The results of development of a complex dynamical model of the two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with head free running-out are considered. The electromagnetic impact unit operating cycles are compared. Such units provide the most rational force impulse generation when energy is transferred to a deformable medium. They are featured by different ways of head impact mass reciprocated motion implementation. The impact mass is accelerated by the inductor magnetic field. The electromagnetic synchronous two-inductor machine impact unit is taken as a test object. The impact unit is powered from a 50 Hz single-phase voltage source with a certain control algorithm. It has a multi-mass mechanical oscillatory system with spring linkages. The impact unit dynamics mathematical model has been created to provide the capabilities of the detailed analysis of electromechanical processes in different modes. This complex model is based on differential equations describing the non-linear system electrical balance and mechanical interaction of directly moving masses. These equations were derived from the Lagrange equation of the second type. The examples of the model numeric implementation analysis and the operating cycle comparison were made by structured modeling methods and tools in Matlab Simulink. It has been established that the operating cycle with head running-out in the forward stroke inductor is preferable as it provides the most rational mode of impact impulse generation when other operating conditions are the same as in other cases. This cycle provides a higher useful impact energy and impact power when the head interacts with a deformable medium.

Keywords: electromagnetic impact unit, head free running-out, mathematical model, operating cycle comparison, multi-mass mechanical oscillatory system, Lagrange equations, spring linkages, impact energy, head velocity.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-98-115

REFERENCES

- Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drives for impulse and vibroimpulse technologies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
- Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malov A.T. *Elektroprivod s lineinymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electric linear electromagnetic motors]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 150 p.
- Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineinyi impul'snyi elektromagnitnyi privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive the machine with autonomous-powered]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2006. 284 p.
- 4. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitnyi privod lineinykh mashin* [The electromagnetic linear actuator machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Nizkochastotnye udarnye elektromagnitnye mashiny i tekhnologii [Low-frequency impact electromagnetic machines and technology]. *Aktual'nye* problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building, 2014, no. 1, pp. 256– 259.
- 6. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
- Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gumerova M.B. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh rezhimov elektromagnitnykh dempfiruyushchikh elementov [Mathematical modeling of dynamic modes of electromagnetic damping elements]. *Vestnik Ufimskogo* gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University, 2010, vol. 14, no. 5 (40), pp. 86–90.

- Neyman V.Yu. Rezhimy forsirovannogo akkumulirovaniya magnitnoi energii v impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigatelyakh [Modes of accelerated accumulation of magnetic energy in a pulse of electromagnetic linear motors]. Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university, 2003, no. 1, pp. 105–112.
- Neiman V.Yu., Petrova A.A. Sravneniye sposobov forsirovki impulsnykh lineynykh elektromagnitnykh dvigateley [Comparison of methods for forcing pulse linear electromagnetic motors]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50. (In Russian)
- Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Raschet optimal'nykh parametrov elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya [The calculation of the optimal parameters of the vibrational motion of the electromagnetic actuator]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 121–132. (In Russian)
- Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Periodicheskie rezhimy v elektromagnitnykh vibratsionnykh preobrazovatelyakh [Periodic modes in the electromagnetic vibration converters]. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University, 2010, vol. 14, no. 1 (36), pp. 50–55.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Povyshenie tochnosti analiticheskogo rascheta radial'nykh sil odnostoronnego magnitnogo prityazheniya nekoaksial'nykh elementov magnitoprovoda [Improving the accuracy of analytical calculation unilateral radial forces of magnetic attraction coaxial magnetic elements]. Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university, 2015, no. 1 (58), pp. 246–256.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primenenie metoda provodimostei dlya ucheta sily odnostoronnego magnitnogo prityazheniya asimmetrichnogo elektromagnita [Application conductivities method to account for the strength of a unilateral asymmetric magnetic attraction of the electromagnet]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University, 2015, no. 2 (97), pp. 214–218.
- Neyman V.Yu. Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyanie sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [Influence of major proportions electromagnets sizes on the value of constructive factor and indicator of profitability]. Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.
- Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [On the method for choosing the type of electromagnet on the values of constructive factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2011, no. 2, pp. 310–313.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. Sovremennye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines, 2014, no. 2, pp. 109–110.
- Neyman V.Yu., Neyman L.A. Otsenka konstruktivnogo sovershenstva sistem prinuditel'nogo okhlazhdeniya sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya [Impact synchronous electromagnetic machines forced cooling systems constructions estimation]. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 166–175.
- Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh protsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin [On the question of the rationalization the working process and the selection of designs schemes electromagnetic percussion machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004, pp. 155–169.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Novye konstruktivnye resheniya problemy tochnoi sinkhronizatsii vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya boika neupravlyaemoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya [The new design address the precise timing of the reciprocating movement of the striker unguided electromagnetic machine percussion]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 280–285.

- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of dynamics of two-inductor synchrnous impact electromagnetic machines with free head running-out]. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University, 2016, no. 5, pp. 32– 40.
- 21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s dvukhstoronnim vybegom boika [A dynamic model of the impact single-inductor synchronous electromagnetic machine with two-side head running-out]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2016, no. 3 (32), pp. 98–114.
- Per'ev A.A., Timoshenko E.M., Osokin A.L., Borisov V.M. Sposob upravleniya dvukhkatushechnym elek-tromagnitnym dvigatelem [A method for controlling the electromagnetic motor dvuhkatushechnym]. Inventor's Certificate USSR, no. 1525856, 1989.
- Per'ev A.A. Obosnovanie tekhnicheskikh kharakteristik ruchnykh elektromagnitnykh mashin s povyshennoi energiei udarov [Justification of specifications manual electromagnetic machines with high energy shocks]. *Impul'snye lineinye elektromagnitnye mashiny* [Pulsed electric linear machine]. Ed. by N.P. Ryashentsev. Novosibirsk, IGD SO AN SSSR Publ., 1991, pp. 71–81.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatel'nogo dvizheniya s uprugimi svyazyami [Mathematical model of electromechanical system with vibrational motion of elastic connections]. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University, 2015, no. 6, pp. 35–40.
- 25. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 576 p.
- Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroistv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
- 27. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Dinamicheskaya model' elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya dlya sistem generirovaniya nizkochastotnykh vibratsii [The dynamic model of the electromagnetic actuator of the vibrational motion for systems generate highfrequency vibration]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2015, no. 3 (28), pp. 75–87.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki elektromagnitnogo udarnogo uzla s uprugimi svyazyami [A dynamic mathematical model of the electromagnetic impact unit with spring linkages]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2016, no. 2 (31), pp. 94– 107.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.
- 30. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Methods for calculating the magnetic systems of electric devices: magnetic circuit, field and program FEMM]. Moscow, Academia Publ., 2005. 336 p.
- Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A. Raschet elektricheskikh i magnitnykh polei metodom konechnykh elementov s primeneniem kompleksa programm ELCUT [Calculation of electric and magnetic fields by finite element method using ELCUT programs in]. Omsk, OmSTU Publ., 2015. 96 p.
- 32. Neyman L.A., Shabanov A.S., Neyman V.Yu. [The solution of the problem accounting nonlinear properties of the dynamic model of the electromagnetic actuator]. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki*: materialy XIX mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [The theory and practice of modern science: proceedings of the XIX International scientific and practical conference]. Moscow, 2015, pp. 58–63. (In Russian)
- 33. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovode [Simulation of processes in an elec-

114

tromagnetic vibration converter with power loss in the steel magnetic core]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 73–78.

34. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeistvii i nizkochastotnykh vibratsii [Simulation of dynamic processes in the electromagnetic energy converters for generating the force effects systems and low-frequency vibrations]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и технологии. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna (b. 1966) – PhD (Eng.), associate professor, associate professor at the Electrotechnological Units Department of the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machines and technology. She is the author of 100 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman31@gmail.com)



Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Автор и соавтор более 200 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich (b. 1960), D. Sc. (Eng.), professor, head of the Department of Theory of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His eesearch interests cover power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 200 scientific papers and educational tutorials. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Статья поступила 14 февраля 2017 г. Received February 14, 2017

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Sravnenie dinamiki rabochikh tsiklov dvukhkatushechnykh sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Comparison of the operating cycles dynamics of the two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with head free running-out]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 98–115. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-98-115

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

январь—март

№ 1 (34)

— ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ =

УДК 621.3.049.77.002.5

2017

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МЭМС С УЧЕТОМ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В 3D-ПРИБЛИЖЕНИИ

Д.И. Остертак

Новосибирский государственный технический университет

При проектировании емкостных микроэлектромеханических систем (МЭМС) необходимо рассчитывать электрические емкости и электростатические силы, действующие между различными элементами конструкции. Эти параметры зачастую оценивают при помощи аналитических выражений, которые не учитывают краевые эффекты, либо с использованием численных методов, учитывающих краевые эффекты, но требующих больших временных затрат и мощных компьютеров, что затрудняет дальнейшие процессы оптимизации. На начальных этапах разработки МЭМС требуются быстрые, точные и наглядные методы расчета электростатических взаимодействий. Поэтому аналитические выражения, позволяющие вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью, представляют очень большой интерес. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований электростатических взаимодействий в МЭМС с плоскопараллельными электродами в 3D-приближении. Методом конечных элементов рассчитаны зависимости емкости и сил от величины межэлектродного зазора, толщины электродов и соотношения сторон электродов, на основе этого получены аппроксимационные формулы для расчета емкости и сил с учетом краевых эффектов. Проводится сравнение экспериментальных и теоретических результатов, показано их хорошее совпадение. Оценены пределы применимости полученных формул, учитывающих краевые эффекты в 3D-, 2D- и 1D-приближениях.

Ключевые слова: МЭМС, плоскопараллельный конденсатор, электрическая емкость, электростатические силы, краевые эффекты, метод конечных элементов, аппроксимационные формулы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-116-132

Введение

При проектировании емкостных микроэлектромеханических систем (МЭМС) возникает необходимость в расчете емкостей и электростатических сил между различными узлами системы, имеющими различные потенциалы. Обычно такой расчет проводится на основе упрощенных аналитических выражений, наиболее часто используется классическая формула для идеального плоского конденсатора (ИПК), не учитывающая влияние краевых эффектов, которое становится особенно существенным, когда расстояние между электродами соизмеримо с их линейными размерами.

Численные расчеты с использованием метода конечных (МКЭ) или граничных (МГЭ) элементов позволяют оценить электростатические взаимодействия в МЭМС с учетом краевых эффектов. Данные методы, однако, требуют больших затрат времени и мощной вычислительной техники, что существенно усложняет

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания, шифр проекта 8.6847.2017/БЧ, тема проекта: «Разработка теоретических основ построения измерительного оборудования для телекоммуникационных систем, содержащего мощные СВЧ аттенюаторы, полосовые фильтры с заданными частотами режекции и микрополосковые печатные антенны».

дальнейшие процессы оптимизации и проектирования МЭМС с одновременным учетом электрических и механических взаимодействий. На начальных этапах проектирования МЭМС желательно иметь быстрые и наглядные методы расчета. Особый интерес представляют аналитические методы, позволяющие вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью.

В литературе имеются аналитические выражения для расчета емкостей и электростатических сил с учетом краевых эффектов [1–11], однако некоторые из них учитывают только влияние конечной ширины [1–7] и длины электродов [8–10], а некоторые – конечной ширины и толщины электродов [7]. Бо́льший практический интерес представляют аналитические выражения, которые бы учитывали одновременно конечную ширину, длину и толщину электродов (3D-приближение).

В данной работе проводится экспериментальное и теоретическое исследование зависимостей электрической емкости и электростатических сил в МЭМС с плоскопараллельной двухэлектродной структурой от геометрических параметров электродов в 3D-приближении, предлагаются соответствующие аппроксимационные формулы, полученные на основе рассчитанных данных.

1. Методика эксперимента

На рис. 1 приведена конструкция двухэлектродного плоскопараллельного конденсатора, используемого для измерения и расчета емкости системы в зависимости от межэлектродного зазора *d*.

Данная конструкция представляла собой два прямоугольных алюминиевых электрода с одинаковой длиной a = 98,58 мм, шириной b = 26,92 мм и толщиной h = 1,2 мм, межэлектродный зазор величиной d был заполнен воздухом. Электроды закреплялись на диэлектрических подложках, которые в свою очередь монтировались на штативах измерительного прибора ИЗА-2, что позволяло устанавливать межэлектродный зазор d с точностью 0,5 мкм.

Для измерения емкости использовался цифро-

вой LCR измеритель Е7-8, позволяющий измерять

емкости от 0,01 пФ до 100 мкФ с погрешностью

Рис. 1 – Схема МЭМС, используемая для измерения и расчета емкости

Fig. 1 – MEMS structure used for measurements and modeling

±2,5 %. Паразитная емкость между электродами составляла от 1,5 до 3,6 пФ и в дальнейшем вычиталась из экспериментальных зависимостей.

2. Методика расчета

Расчет зависимостей емкости C от межэлектродного зазора d при различных соотношениях длины a и ширины b электродов, а также толщины h и ширины b электродов проводился с использованием МКЭ в пакете ANSYS, погрешность расчетов составляла не более 0,03 %. В областях с резким пространственным изменением электрического поля плотность сетки была значительно выше, чем в остальных областях. В качестве граничных условий задавалась воздушная окружающая среда, в случае постоянного напряжения полагалось, что потенциал одного из электродов был 1 В, а другого 0 В, в случае постоянного заряда один из электродов имел заряд +1 Кл, второй –1 Кл.

3. Результаты расчетов и эксперимента

На рис. 2 представлены зависимости емкости от отношения величины межэлектродного зазора *d* к ширине электрода *b*. Белыми маркерами обозначены экспериментальные результаты, сплошной серой линией с треугольными маркерами – расчет МКЭ, черной штриховой линией – расчет по формуле ИПК.



 Рис. 2 – Зависимости емкости от нормированной величины межэлектродного зазора
 Fig. 2 – Dependences of capacitance on normalized value of interelectrode gap

Из рис. 2 видно, что зависимость емкости, рассчитанная с использованием формулы ИПК (черная штриховая линия), с увеличением межэлектродного зазора d все больше расходится с экспериментом, что связано с проявлением краевых эффектов, не учитываемых моделью ИПК. Для конструкции, изображенной на рис. 1, оценки показывают, что для d/b < 0,02 и d/b < 0,05 значения емкостей, полученные экспериментально, превышают значения, найденные по формуле ИПК, на 10 и 16 % соответственно. С ростом отношения d/b погрешность расчетов с использованием формулы ИПК неуклонно растет, и при d/b = 0,2 различие с экспериментом составляет уже около 45 %, а при d/b = 1 – примерно 165 %, т. е. в данном случае для вычисления емкости формулу ИПК использовать нельзя.

Согласно рис. 2 зависимость, рассчитанная в рамках МКЭ, в диапазоне $0,002 \le d/b \le 1,33$, расходится с экспериментом не более чем на 5 %, что может быть связано с погрешностью измерений и вполне приемлемо для практических применений.

Для дополнительного подтверждения точности расчетов электрической емкости МКЭ в системе ANSYS был проведен их сравнительный анализ с экспериментальными результатами работ [8–9], где измерялась зависимость электрической емкости от межэлектродного зазора для конструкции, представляющей собой два квадратных алюминиевых электрода со стороной 25 см и толщиной 11 мкм, межэлектродный зазор был заполнен воздухом. Из-за погрешности измерений и вклада паразитной емкости расхождение между расчетами при помощи МКЭ с экспериментальными данными составило не более 10 % в диапазоне $0,01 \le d/b \le 1,55$, что также вполне приемлемо для практических применений.

Кроме того, результаты расчетов в рамках МКЭ сравнивались с табличными данными из [11], при этом расхождение составляло не более 5 %. Поскольку расчеты емкости с использованием МКЭ обладают достаточной точностью, то дальнейший анализ проводился на его основе.

4. Анализ полученных результатов

Как отмечалось выше, при проектировании МЭМС наиболее удобным является использование аналитических выражений. Для расчета зависимости емкости от величины межэлектродного зазора наибольшее распространение получила формула ИПК

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{d},\tag{1}$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды между электродами, *a*, *b* и *d* – длина, ширина электрода и межэлектродный зазор, соответственно.

Однако, как показано выше, оценки емкости, полученные с использованием модели ИПК, могут иметь значительную погрешность, которая неуклонно растет с увеличением межэлектродного зазора d.

Бесконечно-длинные электроды с нулевой толщиной. Анализ литературных данных [1–7] показывает, что наиболее точное выражение для расчета емкости с учетом краевых эффектов при $d/b \le 2$ для бесконечно длинных ($a/b \rightarrow \infty$) и бесконечно тонких (h/b = 0) электродов имеет вид [3]

$$C_{1\mathrm{D}} = C_0 \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln \left[(2\pi)^{1,04} \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \right) \right] \right] \right\} = C_0 \Phi_{1\mathrm{D}} \,. \tag{2}$$

Оценки показывают, что (2) позволяет рассчитывать емкости с погрешностью менее 0,6 % (относительно численных расчетов МКЭ) при $d/b \le 2$, $a/b \to \infty$ и h/b = 0. Для данного случая на рис. 3, *а* представлены зависимости нормированной емкости C/C_0 от отношения d/b, сплошная линия – расчет с использованием (2), квадраты – численный расчет МКЭ, из рисунка видно, что результаты очень хорошо согласуются между собой. Из рис. 3, *а* также видно, что с ростом отношения d/b влияние краевых эффектов увеличивается, так при d/b = 2 емкость, найденная численно, будет практически в 3 раза превосходить емкость, найденную в рамках модели ИПК, т. е. в таких случаях формулу (1) использовать нельзя.

Бесконечно-длинные электроды с конечной толщиной. В случае если электроды имеют конечную толщину h/b > 0, влияние краевых эффектов усиливается. В литературе имеется выражение для оценки емкости с учетом толщины электродов h при $a/b \rightarrow \infty$, считающееся наиболее точным в данном случае и именуемое модифицированной формулой Пальмера–Янга [7]:

$$C_{2\mathrm{D}}^{\Pi\mathfrak{R}} = C_0 \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln\left(2\pi\frac{b}{d}\right) + \ln\left[1 + 2\frac{h}{d} + 2\sqrt{\frac{h}{d} + \left(\frac{h}{d}\right)^2}\right] \right] \right\}.$$
 (3)



Рис. 3 – Зависимости нормированной емкости C/C_0 от нормированного зазора d/b при различных отношениях a/b и h/b

Fig. 3 – Dependences of normalized capacitance C/C_0 on normalized interelectrode gap d/b at different ratios of a/b and h/b

Анализ показывает, что (3) имеет достаточно узкие диапазоны применимости: погрешность расчетов увеличивается с ростом как толщины электродов h, так и межэлектродного зазора d. Например, при d/b = 0,5 и h/b = 0,1 погрешность расчетов составит около 2,5 %, а при h/b = 0,5 и том же d/b – около 5 %. При d/b = 2 и h/b = 1 выражение (3) становится плохо применимым, поскольку погрешность в этом случае достигает 19 %.

Однако если формулу (3) модифицировать следующим образом:

$$C_{2D}^{I} = C_0 \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln \left[(2\pi)^{1,04} \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \right) \right] + \theta_1 \ln^{1,16} \Omega \right] \right\} = C_0 \Phi_{2D}^{I} , \qquad (4)$$

где $\Omega = 1 + 2h/d + 2\sqrt{h/d + h^2/d^2}$, $\theta_1 = 1,268/[1+0,2(h/b)^{-0,449}]$ – коэффициент учитывающий отношение между толщиной *h* и шириной *b* электродов, то точность вычислений заметно повышается. Анализ показывает, что погрешность расчетов с использованием (4) при $d/b \le 2$ и $h/b \le 1$ составляет менее 1,3 % (относительно численных расчетов), что вполне достаточно для практических применений.

Для данного случая на рис. 3, *а* представлены зависимости нормированной емкости C/C_0 от отношения d/b при h/b = 0, 0,05, 0,2, 0,5 и 1 (где линии – расчет с использованием (4), фигуры – численный расчет МКЭ), из которых видно, что результаты очень хорошо согласуются между собой.

Из зависимостей рис. 3, *а* видно, что с ростом d/b влияние толщины *h* электродов на электрическую емкость усиливается: так, если при d/b = 0,02 отношение емкостей для h/b = 1 и h/b = 0 составляло всего 1,037, то при d/b = 0,2 оно составляет примерно 1,18, а при d/b = 2 – уже 1,33.

Прямоугольные электроды с нулевой толщиной. Для плоскопараллельного конденсатора с бесконечно тонкими электродами (h/b=0), но когда длина a и ширина b электродов соизмеримы между собой, в литературе [8, 9] имеется формула для расчета емкости с учетом краевых эффектов, которая считается наиболее точной:

$$C_{2D}^{II} = C_0 \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln \left[2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \left(1 + \frac{b}{a} \right) \right) \right] \right] + \frac{d}{\pi a} \left[1 + \ln \left[2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \left(1 + \frac{a}{b} \right) \right) \right] \right] \right\}.$$
(5)

Оценки показывают, что погрешность формулы (5) относительно численных расчетов составляет не более 3 % при $d/b \le 2$ и любых значениях a/b. Точность расчетов можно несколько повысить, если модифицировать (5) следующим образом:

$$C_{2D}^{\text{III}} = C_0 \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln^{\beta_1} \Psi_1 \right] + \frac{d}{\pi a} \left[1 + \ln^{\beta_2} \Psi_2 \right] \right\} = C_0 \Phi_{2D}^{\text{III}}, \tag{6}$$

где $\Psi_1 = (2\pi)^{1,04} (b/d+0,75(1+b/a)), \quad \Psi_2 = (2\pi)^{1,04} (a/d+0,75(1+a/b)),$ а $\beta_1 = 1-0,036(b/a), \quad \beta_2 = 1-0,036(a/b)$ – коэффициенты учитывающие отношение сторон *a* и *b*. Анализ показывает, что погрешность расчетов с использованием (6) при $d/b \le 2$ и любых значениях a/b составляет менее 2,1 %.

Для данного случая на рис. 3, a-c представлены зависимости нормированной емкости C/C_0 от отношения d/b при h/b = 0 и a/b = 1, 2, 5 и ∞ , сплошные линии – расчет с использованием (6), квадраты – численный расчет МКЭ, из рисунка видно, что результаты очень хорошо согласуются между собой. Очевидно, что при уменьшении отношения a/b вклад краевых эффектов в электрическую емкость растет, особенно это заметно при увеличении d/b: так, если при d/b = 0,02 отношение емкостей для a/b = 1 и $a/b \rightarrow \infty$ составляло всего 1,034, то при d/b = 0,2 оно составляет примерно 1,2, а при d/b = 2 – уже 1,87.

Прямоугольные электроды с конечной толщиной. Для случаев, когда длина a и ширина b электродов соизмеримы, но при этом они имеют еще и конечную толщину h/b > 0, в литературе не встречается аналитических выражений.

Если скомбинировать формулы (4) и (6), то получится выражение, которое будет учитывать влияние краевых эффектов за счет сторон a, b и толщины h (3D-приближение):

$$C_{3D} = C_0 \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \ln^{\beta_1} \Psi_1 + \xi_1 \theta_1 \ln^{1,16\gamma_1} \Omega \right] + \frac{d}{\pi a} \left[1 + \ln^{\beta_2} \Psi_2 + \xi_2 \theta_2 \ln^{1,16\gamma_2} \Omega \right] \right\} = C_0 \Phi_{3D},$$
(7)

где $\theta_2 = 1,268/[1+0,2(h/a)^{-0,449}]$ – коэффициент, учитывающий отношение толщины *h* и длины *a* электрода (аналогично θ_1 в (4)). Кроме того, в (7) появляются коэффициенты $\gamma_1 = [1+1,277(a/b)^{-0,841}]^{-1}$, $\gamma_2 = [1+1,277(b/a)^{-0,841}]^{-1}$, учитывающие отношение между сторонами электродов *a* и *b*, а также коэффициенты $\xi_1 = [1+8,244(a/b)^{-1,777}]^{-1} + [0,247+0,073(a/b)^{1,308}]^{-1}(h/b)^{0,38}$ и $\xi_2 = [1+8,244(b/a)^{-1,777}]^{-1} + [0,247+0,073(b/a)^{1,308}]^{-1}(h/a)^{0,38}$, которые учитывают соотношения *a/b*, *h/b* и *h/a*.

Оценки показывают, что погрешность формулы (7) при $d/b \le 2$, $h/b \le 1$ и любых значениях a/b составляет менее 3,2 % (относительно численных расчетов).

На рис. 3, a-e изображены зависимости нормированной емкости C/C_0 от отношения d/b при различных соотношениях a/b и h/b (где линии – расчет с использованием выражения (7), фигуры – численный расчет МКЭ), из которых видно, что (7) достаточно хорошо описывает численные результаты.

Из зависимостей рис. З можно заметить, что как с ростом толщины h электродов, так и с уменьшением отношения a/b влияние краевых эффектов увеличивается. Причем это влияние оказывается взаимосвязанным, т. е. чем больше толщина h, тем сильнее растет вклад краевых эффектов при уменьшении a/b, и наоборот, чем меньше a/b, тем сильнее проявляет себя толщина h.

Так, например, при d/b = 2 и a/b = 5 отношение емкостей для h/b = 1 и h/b = 0,2 составляет примерно 1,31, однако если уменьшить a/b до 1, то отношение между емкостями для тех же величин h/b и d/b составит уже около 1,51. Если же, например, при d/b = 2 и h/b = 0,2 отношение емкостей для a/b = 1 и a/b = 5 составляет примерно 1,7, то для h/b = 1 и прежних a/b и d/b это отношение составит уже 1.95.

Примечательно, что выражение (7) для оценки емкости в 3D-приближении при h/b = 0 превращается в выражение (6), при $a/b \rightarrow \infty$ – в выражение (4), при h/b = 0 и $a/b \rightarrow \infty$ – в выражение (2), а при h/b = 0, $a/b \rightarrow \infty$ и $d/b \rightarrow 0$ – в выражение (1). Таким образом, формула (7) является универсальной.

В таблице представлены диапазоны отношения d/b, при которых погрешность в оценке емкости с помощью представленных формул не превышает 10 %.

Из таблицы видно, что наиболее узкие диапазоны применимости имеет формула ИПК (1), формула (2) для C_{1D} более применима для бесконечно длинных и достаточно тонких прямоугольных электродов, когда $a/b \rightarrow \infty$ и $h/b \le 0.05$. Формула (4) для C_{2D}^{I} наиболее точна для отношения $a/b \rightarrow \infty$ и любых толщин вплоть до h/b = 1. Формула (6) для C_{2D}^{III} , напротив, более точна без учета толщины (h/b = 0), однако позволяет вычислять емкость для любых отношений a/b. И наконец, формула (7) для C_{3D} является универсальной и позволяет для представленных в таблице параметров a/b, h/b и $d/b \le 2$ рассчитывать емкость с погрешностью менее 3,2 %.

	Формула	h/b = 0	$h/b \le 0,05$	$h/b \le 0,2$	$h/b \le 0,5$	$h/b \leq 1$
	d/b					
$a/b \rightarrow \infty$	$C_{0}(1)$	\le 0,0608	\leq 0,0461	\leq 0,0373	≤ 0,0321	\leq 0,0288
	$C_{1D}(2)$	≤ 2	≤ 2	\leq 0,4546	\leq 0,1377	\leq 0,09
	$C_{2D}^{I}(4)$	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
	$C^{\rm III}_{\rm 2D}(6)$	≤ 2	≤ 2	\leq 0,4546	≤ 0,1377	\leq 0,09
	$C_{3D}(7)$	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
<i>a/b</i> ≥ 5	$C_{0}(1)$	\leq 0,05	\leq 0,0364	\leq 0,0288	\leq 0,0242	≤ 0,0211
	$C_{1D}(2)$	\leq 0,727	\le 0,284	\leq 0,1014	$\leq 0,06$	\leq 0,0437
	$C_{2D}^{I}(4)$	\leq 0,727	\leq 0,582	\leq 0,404	\leq 0,284	\leq 0,2085
	$C^{\rm III}_{2\rm D}(6)$	≤ 2	≤ 2	≤ 0,2123	\leq 0,0823	\leq 0,0538
	$C_{3D}(7)$	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
$a/b \ge 2$	$C_{0}(1)$	\leq 0,04	\le 0,0278	\leq 0,0217	\leq 0,018	≤ 0,0153
	$C_{1D}(2)$	\leq 0,2187	\le 0,0957	\leq 0,0487	\leq 0,0329	≤ 0,0251
	$C_{2D}^{I}(4)$	\leq 0,2187	≤ 0,1512	\leq 0,1046	\leq 0,0773	\le 0,0586
	$C^{\rm III}_{2\rm D}(6)$	≤ 2	≤ 2	≤ 0,1274	\leq 0,052	\leq 0,033
	$C_{3D}(7)$	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
$a/b \ge 1$	$C_{0}(1)$	\le 0,03	\leq 0,02	≤ 0,0152	\leq 0,0124	\leq 0,0105
	$C_{1D}(2)$	\leq 0,0912	\leq 0,043	\leq 0,0256	\leq 0,0187	\leq 0,0146
	$C_{2D}^{I}(4)$	≤ 0,0912	\leq 0,0574	\le 0,0405	\leq 0,0307	≤ 0,0239
	$C^{\rm III}_{2\rm D}(6)$	≤ 2	≤ 1,976	\le 0,0679	\leq 0,0328	≤ 0,0219
	$C_{3D}(7)$	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2

Диапазоны применимости выражений (1), (2), (4), (6) и (7) для оценки емкости с погрешностью не более 10 %



Рис. 4 – Диапазоны применимости формулы ИПК (1)
с погрешностью менее 10 %Fig. 4 – The range of applicability of equation (1) with
accuracy of 10 %

На рис. 4 в виде заштрихованных площадей представлены диапазоны, при которых формула ИПК (1) позволяет рассчитывать электрическую емкость с погрешностью менее 10 % для a/b = 1, 2, 5 и ∞ . Из рисунка видно, что как с ростом отношения h/b, так и с уменьшением отношения a/b диапазон допустимых значений d/b сужается. Например, для случая наиболее сильного вклада краевых эффектов при a/b = 1 формула (1) будет иметь погрешность менее 10 % при $d/b \le 0,03$ для бесконечно тонких (h/b = 0) электродов и при $d/b \le 0,0105$ для h/b = 1, при дальнейшем увеличении толщины h допустимый диапазон d/b будет еще у́же.

5. Электростатические силы в 3D-приближении

При приложении между электродами электрического напряжения V или сообщении электродам зарядов +Q и -Q (рис. 5) возникает электростатическая сила притяжения, стремящаяся уменьшить величину зазора между электродами. Компонента F электрической силы может быть рассчитана из зависимости изменения емкости системы C от величины межэлектродного зазора d при постоянном напряжении V (рис. 5, a) или постоянном заряде Q (рис. 5, δ) на обкладках конденсатора. В основе данного подхода лежат соотношения, связывающие силу F и потенциальную энергию U:

$$F = -\frac{\partial U}{\partial d},\tag{8}$$

где $U = CV^2/2 = Q^2/(2C)$.



Рис. 5 – Модель МЭМС, используемая в расчетах электростатической силы:

a – при постоянном напряжении; δ – при постоянном заряде Fig. 5 – MEMS model used for electrostatic force calculation: a – by constant voltage; b – by constant charge

Анализ показывает, что влияние краевых эффектов сказывается не только на оценках электрической емкости, но и на электростатических силах.

В рамках модели ИПК из выражений (1) и (8) получаются формулы для расчета электростатических сил при постоянном напряжении:

$$F_0^V = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon S V^2}{2d^2} = -\frac{C_0 V^2}{2d},$$
(9)

и постоянном заряде:

$$F_0^Q = -\frac{Q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon ab} \,. \tag{10}$$

Выражения (9) и (10) не учитывают влияние краевых эффектов на электростатические силы, используя (7) и (8), можно получить выражения для расчета электростатических сил с учетом краевых эффектов при постоянном напряжении

$$F_{3\mathrm{D}}^{V} = \frac{-C_{0}V^{2}}{2d} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{(2\pi)^{1,04}\beta_{1}\ln^{\beta_{1}-1}\Psi_{1}}{\Psi_{1}} + 1,16\gamma_{1}\theta_{1}\xi_{1}\frac{h/b}{h/d + 0,5(1-1/\Omega)}\ln^{1,16\gamma_{1}-1}\Omega + \frac{h}{2} \frac{h}{h/d} \right] \right\}$$

$$\left. + \frac{(2\pi)^{1,04}\beta_2 \ln^{\beta_2 - 1}\Psi_2}{\Psi_2} + 1,16\gamma_2 \theta_2 \xi_2 \frac{h/a}{h/d + 0,5(1 - 1/\Omega)} \ln^{1,16\gamma_2 - 1}\Omega \right] \right\}$$
(11)

и постоянном заряде

+

$$F_{3D}^{Q} = \frac{-Q^{2}}{2\varepsilon_{0}\varepsilon ab\Phi_{3D}^{2}} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{(2\pi)^{1,04}\beta_{1}\ln^{\beta_{1}-1}\Psi_{1}}{\Psi_{1}} + 1,16\gamma_{1}\theta_{1}\xi_{1}\frac{h/b}{h/d + 0,5(1-1/\Omega)}\ln^{1,16\gamma_{1}-1}\Omega + \frac{(2\pi)^{1,04}\beta_{2}\ln^{\beta_{2}-1}\Psi_{2}}{\Psi_{2}} + 1,16\gamma_{2}\theta_{2}\xi_{2}\frac{h/a}{h/d + 0,5(1-1/\Omega)}\ln^{1,16\gamma_{2}-1}\Omega \right\}.$$
 (12)

Анализ показывает, что используя выражения (11) и (12), можно оценить значения электростатических сил с погрешностью менее 10 % (относительно численных расчетов) при $d/b \le 1$, $h/b \le 1$ и любых значениях a/b.

Выражения (11) и (12) для оценки электростатических сил в 3D-приближении при h/b = 0 превращаются в выражения для оценки сил в 2D-приближении:

$$F_{2\mathrm{D},1}^{V} = \frac{-C_0 V^2}{2d} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{\beta_1 \ln^{\beta_1 - 1} \Psi_1}{b/d + 0,75(1 + b/a)} + \frac{\beta_2 \ln^{\beta_2 - 1} \Psi_2}{a/d + 0,75(1 + a/b)} \right] \right\},$$
 (13)

$$F_{2\mathrm{D},1}^{Q} = \frac{-Q^{2}}{2\varepsilon_{0}\varepsilon ab \left(\Phi_{2\mathrm{D}}^{\mathrm{III}}\right)^{2}} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{\beta_{1} \ln^{\beta_{1}-1} \Psi_{1}}{b/d + 0,75(1 + b/a)} + \frac{\beta_{2} \ln^{\beta_{2}-1} \Psi_{2}}{a/d + 0,75(1 + a/b)} \right] \right\}, \quad (14)$$

позволяющие оценить значения электростатических сил с погрешностью менее 10 % (относительно численных расчетов) при $d/b \le 1$, h/b = 0 и любых значениях a/b.

Для бесконечно длинных прямоугольных электродов $(a/b \rightarrow \infty)$ (11) и (12) превращаются в формулы

$$F_{2\mathrm{D},2}^{V} = \frac{-C_0 V^2}{2d} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{b/d + 0.75} + 1.16\theta_1 \frac{h/b}{h/d + 0.5(1 - 1/\Omega)} \ln^{0.16} \Omega \right] \right\}, \quad (15)$$

$$F_{2\mathrm{D},2}^{Q} = \frac{-Q^{2}}{2\varepsilon_{0}\varepsilon ab(\Phi_{2\mathrm{D}}^{\mathrm{I}})^{2}} \times \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{b/d + 0,75} + 1,16\theta_{1} \frac{h/b}{h/d + 0,5(1 - 1/\Omega)} \ln^{0.16} \Omega \right] \right\},$$
(16)

позволяющие оценить значения электростатических сил с погрешностью менее 3 % (относительно численных расчетов) при $d/b \le 1$, $h/b \le 1$ и $a/b \to \infty$.

При h/b = 0 и $a/b \rightarrow \infty$ (11) и (12) превращаются в выражения

$$F_{1D}^{V} = \frac{-C_0 V^2}{2d} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi (b/d + 0,75)} \right\},$$
(17)

$$F_{\rm 1D}^Q = \frac{-Q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon a b \Phi_{\rm 1D}^2} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi (b/d + 0, 75)} \right\},\tag{18}$$

позволяющие оценить значения электростатических сил с погрешностью менее 2 % (относительно численных расчетов) при $d/b \le 1$, h/b = 0 и $a/b \rightarrow \infty$.

При h/b = 0, $a/b \rightarrow \infty$ и $d/b \rightarrow 0$ (11) и (12) превращаются в формулы (9) и (10), соответственно, которые не учитывают краевые эффекты.

На рис. 6 представлены зависимости нормированных значений электростатической силы при постоянном напряжении от нормированного зазора d/b для a/b = 5 и h/b = 0,01, 0,2 и 1, фигуры – численный расчет МКЭ, линии – расчет с помощью выражения (11). Значения силы нормировались на соответствующие значения силы, найденные с помощью формулы ИПК (9).



Рис. 6 – Зависимости нормированных значений электростатической силы при постоянном напряжении от величины d/b для a/b = 5 и h/b = 0.01, 0.2, 1

Fig. 6 – Dependences of normalized electrostatic force values on normalized interelectrode gap d/b for a/b = 5 and h/b = 0,01, 0,2, 1 by constant voltage

Из рис. 6 видно, что при увеличении зазора d численно рассчитанные значения силы начинают превосходить значения силы, рассчитанные при помощи формулы ИПК (9), причем это расхождение увеличивается с ростом толщины h. Например, при h/b = 0,01 и d/b = 0,2 отношение между значениями силы, найденными численно и по формуле ИПК, будет около 1,07, при h/b = 0,2 и том же значении d/b почти 1,12, при h/b = 1 и d/b = 0,2 это отношение становится равным 1,14, а при h/b = 1 и d/b = 1 это отношение становится равным 1,52. Анализ показывает, что наибольшую погрешность в оценке электростатической силы при постоянном напряжении модель ИПК (9) имеет при a/b = 1, причем эта погрешность растет как с ростом толщины электродов, так и с ростом межэлектродного зазора. Например, при a/b = 1, h/b = 1 и d/b = 1 и d/b = 1 это отношение становится непримение станових.

На рис. 7 представлены зависимости нормированных значений электростатической силы при постоянном заряде от нормированного зазора d/b для a/b = 1 и h/b = 0,01, 0,2 и 1, фигуры – численный расчет МКЭ, линии – расчет с помощью выражения (12). Значения силы нормировались на соответствующие значения силы, найденные с помощью формулы ИПК (10).



Рис. 7 – Зависимости нормированных значений электростатической силы при постоянном заряде от величины d/b для a/b = 1 и h/b = 0,01, 0,2, 1

Fig. 7 – Dependences of normalized electrostatic force values on normalized interelectrode gap d/b for a/b = 1 and h/b = 0,01, 0,2, 1 by constant charge

Из рис. 7 видно, что при увеличении зазора d численно рассчитанные значения силы начинают уменьшаться относительно значений силы, рассчитанных при помощи формулы ИПК, которые согласно (10) не зависят от d. Анализ показывает, что наибольшую погрешность в оценке электростатической силы при постоянном заряде модель ИПК имеет при a/b = 1, причем эта погрешность растет с ростом толщины электродов и межэлектродного зазора. Например, при h/b = 0,01 и

d/b = 0,2 отношение между значениями силы, найденными численно и по формуле ИПК (10), будет 0,433, при h/b = 0,2 и d/b = 0,2 оно будет 0,337, при h/b = 1 и том же значении d/b – почти 0,217, а при h/b = 1 и d/b = 1 это отношение становится равным примерно 0,045, т.е. значения сил будут отличаться примерно в 22 раза, в таких случаях модель ИПК применять нельзя.

На рис. 8 в виде заштрихованных площадей представлены диапазоны, при которых (9) позволяет рассчитывать электростатическую силу при постоянном напряжении с погрешностью менее 10 % для a/b=1, 5 и ∞ . Из рисунка видно, что как с ростом отношения h/b, так и с уменьшением отношения a/b диапазон допустимых значений d/b сужается. Для случая наиболее сильного вклада краевых эффектов при a/b=1 формула (9) будет иметь погрешность менее 10 % при $d/b \le 0,267$ для бесконечно тонких (h/b=0) электродов и при $d/b \le 0,092$ для h/b=1, при дальнейшем увеличении толщины h допустимый диапазон d/b будет сужаться.



Fig. 8 – The range of applicability of equation (9) with accuracy of 10%

На рис. 9 в виде заштрихованных площадей представлены диапазоны, при которых (10) позволяет рассчитывать электростатическую силу при постоянном заряде с погрешностью менее 10 % для a/b = 1, 5 и ∞ . Из рисунка видно, что как с ростом отношения h/b, так и с уменьшением отношения a/b диапазон допустимых значений d/b сужается. Для случая наиболее сильного вклада краевых эффектов при a/b = 1 формула (10) будет иметь погрешность менее 10 % при $d/b \le 0,0107$ для бесконечно тонких (h/b = 0) электродов и при $d/b \le 0,0044$ для h/b = 1, при дальнейшем увеличении толщины h допустимый диапазон d/b будет еще у́же.





accuracy of 10 %

Из анализа зависимостей рис. 4, 8 и 9 можно сделать вывод о том, что модель ИПК более применима для расчета электростатической силы при постоянном напряжении, менее применима для расчета электрической емкости и практически неприменима для расчета электростатической силы при постоянном заряде.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований электрической емкости и электростатических сил в МЭМС с плоскопараллельными электродами в 3D-приближении.

Приведены экспериментально полученные зависимости емкости от величины межэлектродного зазора, показано, что с увеличением зазора вклад краевых эффектов растет, и при d/b = 1 различие между расчетами по формуле ИПК (без учета краевых эффектов) и экспериментальными данными составляет примерно 165 %.

С использованием МКЭ рассчитаны зависимости емкости и электростатических сил от величины межэлектродного зазора, толщины электродов и соотношения сторон электродов с учетом краевых эффектов. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов, показано их хорошее совпадение.

Получены аппроксимационные формулы для расчета емкости и сил с учетом краевых эффектов. Оценены пределы применимости полученных формул, учитывающих краевые эффекты в 3D-, 2D- и 1D-приближениях. Данные формулы позволяют рассчитывать электрическую емкость при $d/b \le 2$, $h/b \le 1$ и любых значениях a/b с погрешностью менее 3,2 %, а электростатические силы при постоянном напряжении и постоянном заряде при $d/b \le 1$, $h/b \le 1$ и любых a/b с погрешностью менее 10 %, что вполне достаточно для практических применений.

Показано, что при межэлектродных зазорах, соизмеримых с линейными размерами электродов и толщиной электродов, расчеты емкости и электростатических сил без учета краевых эффектов приводят к большим ошибкам и могут быть использованы с погрешностью не более 10 % лишь при $d/b \le 0,03$ для бесконечно тонких (h=0) электродов и при $d/b \le 0,0105$ для h=b для оценки емкости; при $d/b \le 0,267$ для h = 0 и при $d/b \le 0,092$ для h = b для оценки электростатической силы при постоянном напряжении; при $d/b \le 0,0107$ для h = 0 и при $d/b \le 0,0044$ для h = b для оценки электростатической силы при постоянном заряде.

ЛИТЕРАТУРА

- Palmer H.B. Capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation // Electrical Engineering. 1937. Vol. 56, iss. 3. P. 363–368. doi: 10.1109/EE.1937.6540485.
- 2. Elliot R.S. Electromagnetics: history, theory, and applications. New York: McGraw-Hill, 1966. 631 p.
- 3. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. 1. Расчет емкостей // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 7. – С. 37–41.
- 4. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Ч. 2. Расчет электростатических сил // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – № 8. – С. 40–47.
- 5. Драгунов В. П., Остертак Д.И. Расчет нормальной составляющей электростатической силы в МЭМС // Сборник научных трудов НГТУ. 2009. № 1 (55). С. 40–45.
- 6. Драгунов В.П., Колчужин В.А., Остертак Д.И. Влияние краевых эффектов на электрическую емкость в МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2009. № 2 (13). С. 97–105.
- 7. Leus V., Elata D. Fringing field effect in electrostatic actuators // Technical Report ETR. 2004. Vol. 2. P. 2–15.
- Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Влияние краевых эффектов на функционирование МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 1. – С. 48–61.
- 9. Доржиев В.Ю., Драгунов В.П., Остертак Д.И. Расчет емкости МЭМС в 2Dприближении // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 4 (62). – С. 73–80.
- Hosseini M., Zhu G., Peter Y.-A. A new formulation of fringing capacitance and its application to the control of parallel-plate electrostatic micro actuators // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2007. – Vol. 53, iss. 2. – P. 119–128. – doi: 10.1007/s10470-007-9067-3.
- 11. **Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г.** Расчет электрической емкости. Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981. 288 с.

AN ANALYSIS OF ELECTROSTATIC INTERACTIONS IN PARALLEL-PLATE MEMS WITH REGARD TO FRINGING FIELD EFFECTS WITHIN A 3D-APPROACH

Ostertak D.I.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

During the process of designing capacitive microelectromechanical systems (MEMS) it is necessary to calculate electric capacitance and electrostatic forces acting between different elements of the construction. These parameters are often evaluated using analytical expressions which do not take into account fringing field effects or by means of numerical computation which takes into account these effects but requires a lot of time and powerful computers that hamper further optimization. At initial stages of MEMS design it is essential to have fast, accurate and evident methods of electrostatic interaction calculation. Therefore analytical expressions allowing evaluating capacitances and electrostatic forces with an accuracy sufficient for practical application are of great interest. This work is devoted to experimental and theoretical study of electrostatic interactions in parallel-plate MEMS within a 3D-approach. Dependences of capacitance and electrostatic forces on the interelectrode gap, electrode thickness, and the length-to-width ratio are calculated using the finite element method. On the basis of the calculation approximation formulas for capacitance and electrostatic forces evaluation taking into account fringing field effects have been obtained. A comparison between experimental and theoretical results demonstrates a good coincidence. Applicability limits of the formulas obtained with regard to fringing field effects within 3D, 2D, and 1D-approaches are estimated.

Keywords: MEMS, parallel-plate capacitor, capacitance, electrostatic forces, fringing field effects, finite element method, approximation formulas.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-116-132

REFERENCES

- Palmer H.B. Capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation. *Electrical Engineering*, 1937, vol. 56, iss. 3, pp. 363–368. doi: 10.1109/ EE.1937.6540485.
- 2. Elliot R.S. *Electromagnetics: history, theory, and applications*. New York, McGraw-Hill, 1966. 631 p.
- Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskie vzaimodeistviya v MEMS s ploskoparallel'nymi elektrodami. Ch. 1. Raschet emkostei [Electrostatic Interactions in MEMS with Plane-Parallel Electrodes. Pt. 1. Estimation of the capacitance]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2010, no. 7, pp. 37–41.
- Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskie vzaimodeistviya v MEMS s ploskoparallel'nymi elektrodami. Ch. 2. Raschet elektrostaticheskikh sil [Electrostatic interactions in MEMS with plane-parallel electrodes. Pt. 2. Estimation of electrostatic forces]. *Nano- i* mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique, 2010, no. 8, pp. 40–47.
- Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet normal'noi sostavlyayushchei elektrostaticheskoi sily v MEMS [Calculation of the normal component of the electrostatic force in MEMS]. Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university, 2009, no. 1 (55), pp. 40–45.
- Dragunov V.P., Kolchuzhin V.A., Ostertak D.I. Vliyanie kraevykh effektov na elektricheskuyu emkost' v MEMS [Fringing field effect on electric capacitance in MEMS]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2009, no. 2 (13), pp. 97–105.
- 7. Leus V., Elata D. Fringing field effect in electrostatic actuators. *Technical Report ETR*, 2004, vol. 2, pp. 2–15.
- Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Vliyanie kraevykh effektov na funktsionirovanie MEMS [Fringing field effects influence on MEMS functioning]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2016, no. 1, pp. 48–61.
- Dorzhiev V.Yu., Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet emkosti MEMS v 2D-priblizhenii [Calculation of MEMS capacity in 2D-approximation]. Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university, 2010, no. 4 (62), pp. 73–80.
- Hosseini M., Zhu G., Peter Y.-A. A new formulation of fringing capacitance and its application to the control of parallel-plate electrostatic micro actuators. *Analog Integrated Circuits* and Signal Processing, 2007, vol. 53, iss. 2, pp. 119–128. doi: 10.1007/s10470-007-9067-3.
- 11. Iossel' Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskii M.G. *Raschet elektricheskoi emkosti* [Electric capacitance calculation]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 288 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Остертак Дмитрий Иванович – родился в 1983 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса 20. E-mail: ostertak@ngs.ru, ostertak@corp.nstu.ru).

Ostertak Dmitriy Ivanovich (b. 1983) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor of the department of semiconductor devices and microelectronics at the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem engineering. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 20, Kark Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ostertak@ngs.ru, ostertak@corp.nstu.ru).

Статья поступила 22 февраля 2017 г. Received February 22, 2017

To Reference:

Ostertak D.I. Analiz elektrostaticheskikh vzaimodeistvii v ploskoparallel'nykh MEMS s uchetom kraevykh effektov v 3D-priblizhenii [An analysis of electrostatic interactions in parallel-plate MEMS with regard to fringing field effects within a 3D-approach]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 116–132. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-116-132