научный журнал ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2016

июль-сентябрь

№ 3 (32)



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. Г.В. Майер, д-р физ.-мат. наук, проф. 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. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2016 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

July – September	№ 3 (32)
	July – September



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. G.V. Mayer, D.Sc. (Phys.&Math.), 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 Prospect, 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, 2016 r.

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Калытка В.А., Баймуханов З.К., Мехтиев А.Д. Нелинейные эффекты при поляризации диэлектриков со сложной кристаллической структурой	7
Коскин А.П., Толстихина Д.В. Разработка метода исследования катализаторов для гетерогенного нитрования ароматических соединений	.22
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ	
Абрамов Е.Ю. Экспериментальное исследование энергетических параметров тяговых подстанций горэлектротранспорта	.33
Васюков В.Н., Зайцева А.Ю. Иерархическая конечнозначная гиббсовская модель для сегментации текстурных изображений	.43
<i>Драгунов В.П., Доржиев В.Ю., Лойко Д.И.</i> Влияние непараллельности электродов на характеристики микромеханических конденсаторов	.54
Клячкин В.Н., Карпунина И.Н. Использование методов статистического контроля для оценки стабильности работы агрегатов	.65

Коваль М.В., Девятков Г.Н. Синтез компактных широкополосных согласующе-симметрирующих устройств на отрезках связанных линий передачи	73
<i>Мезенцев Ю.А., Эстрайх И.В.</i> Задачи и алгоритмы оптимизации расписаний параллельно- последовательных систем с неопределенными маршрутами обслуживания	83
<i>Нейман Л.А., Нейман В.Ю.</i> Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка	98
<i>Шульц Т.Е., Гусев А.А.</i> Сравнительный анализ трехфазных трехуровневых квазиимпедансных инверторов Т-типа	115

PROCEEDINGS OF RUSSIAN HIGHER EDUCATION ACADEMY OF SCIENCES

2016	July-September	№ 3 (32)
	CONTENTS	
PHYSICAL AND	MATHEMATICAL SCIENCES	
Kalvtka V.A., B	aimukhanov Z.K., Mekhtiev A.D.	
Non – linear eff	ects under polarization of dielectrics	
with a compoun	d crystalline structure	7
Koskin A.P., To	olstikhina D.V.	
Development of	a catalyst study method for heterogeneous aro-	22
matic compound	ı mirauon	
TECHNICAL SCI	ENCES	
Abramov E.Y.		
Experimental in	vestigation of energy parameters	
of urban electric	c transport traction substations	
Vasvukov V.N.,	Zaitseva A.Yu.	
A hierarchical f	initely valued gibbs model for texture image	
segmentation		43
C C		
Dragunov V P	Dorzhiev V Yu – Lovko D I	
Influence of ele	ctrode nonparallelism	
on micromechar	nical capacitor characteristics	
	I	•
Khuachbin I/ N	Kannunina I N	
The use of statis	, <i>Aurpunina 1.1</i> . stical control methods	
for device opera	ition stability assessment	65
for device opera	and swoning ussessment	

Koval M.V., Devyatkov G.N.	
Synthesis of compact broadband balun	
on the coupled transmission lines	73
Mezentsev Yu.A., Estraykh I.V.	
Problems and optimization algorithms of parallel-serial systems	
schedules with undefined service routes	33
Neyman L.A., Neyman V.Yu.	
A dynamic model of the impact single-inductor synchronous	
electromagnetic machine with two-side head running-out	98
Shults T.E., Husev O.O.	
Comparative analysis of three-phase three-level	
T- source inverters	15

2016

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 539.2+537.226

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ СО СЛОЖНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

В.А. Калытка¹, З.К. Баймуханов², А.Д. Мехтиев¹

¹ Карагандинский государственный технический университет ² Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина

Методами квазиклассической кинетической теории диэлектрической релаксации исследуется механизм миграционной поляризации в диэлектриках со сложной кристаллической структурой (кристаллы с водородными связями (КВС), керамика и другие слоистые материалы) в переменном электрическом поле в области слабых полей. Кинетическое уравнение Больцмана строится в приближении интеграла столкновений для системы невзаимодействующих ионов (релаксаторов), двигающихся в поле одномерного кристаллического потенциального рельефа, возмущенного внешним (поляризующим) электрическим полем. Влияние фононной подсистемы не учитывается. Кристаллическая решетка принята идеальной – не рассматриваются рекомбинационные процессы и диссоциация носителей заряда (релаксаторов) на ловушках. Коэффициенты кинетического уравнения, равные скорости вероятности термически активируемых (классических) переходов релаксаторов через потенциальный барьер (в направлении по внешнему полю и против поля соответственно), вычисляются в линейном приближении по полю. Решение линеаризованной системы уравнений Фоккера-Планка и Пуассона строится для модели блокирующих электродов в стационарном режиме поляризации в бесконечном приближении теории возмущений и в квадратичном приближении по поляризующему полю. Построенные для стационарно периодического процесса объемно-зарядовой поляризации выражения для комплексной диэлектрической проницаемости отличаются от классического закона дисперсии Дебая. Доказывается, что отличный от нуля дипольный момент диэлектрика генерируется только на нечетных гармониках переменного поля, что может служить основой для разработки СВЧ-генераторов, работающих на утроенных частотах радиодиапазона.

Ключевые слова: твердые диэлектрики; слоистые кристаллы; кристаллы с водородными связями (КВС); миграционная поляризация; комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП).

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-7-21

Введение

Диэлектрики со сложной структурой кристаллической решетки (керамика, кристаллы с водородными связями (КВС) и др.) находят широкое применение в высоковольтной и кабельной технике, лазерной технике, строительных технологиях и др. Техническая керамика применяется в промышленной электротехнике и электроэнергетике в качестве изоляционного материала и для механической фиксации токоведущих частей электрогенераторов ТЭС. КВС классифицируют, с точки зрения минералогии, как слоистые кристаллы (слоистые силикаты, кристаллогидраты и др.), а по электрофизическим свойствам, как протонные полупроводники и диэлектрики [1]. Нелинейные квантовые свойства КВС, при их объемно-зарядовой поляризации в области слабых полей, определяют эти материалы в качестве активных элементов МДП-структур и СВЧ-генераторов, топливных элементов в водородной энергетике и элементов лазеров [2, 3].

По данным экспериментов по измерению спектров диэлектрических потерь и токов термостимулированной деполяризации (ТСТД) в КВС, в диапазоне температур T = 70...450 K, при напряженностях поляризующего поля $E_0 \approx 100...1000$ кВ/м, про-

© 2016 В.А. Калытка, З.К. Баймуханов, А.Д. Мехтиев

является протонная проводимость, сводящаяся к диффузионному переносу протонов по водородным связям в электрическом поле [1, 4]. Экспериментальные данные по диэлектрической релаксации и проводимости в КВС в области сверхнизких температур (4...25 K) отсутствуют [5]. Сегнетоэлектрические свойства кристаллов типа KDP, DKDP могут быть объяснены структурной перестройкой водородной подрешетки, обусловленной квантовыми переходами протонов вблизи точки фазового перехода второго рода [6].

Экспериментальные исследования диэлектрических свойств КВС начаты в работах Воробьева Г.А., Тонконогова М.П., Блистанова А.А., Поплавко Ю.М., Тимохина В.М., Миронова В.А., которыми измерены частотно-температурные спектры тангенса угла диэлектрических потерь tg δ и диэлектрической проницаемости ε' при температурах выше 190 К и частотах 50...107 Гц, в кристаллах онотского талька $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$, мусковита $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$, в гипсе $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$, медном купоросе $CuSO_4 \cdot 2H_2O$, $CuSO_4 \cdot 3H_2O$, и выявлены два-три монорелаксационных частотных максимума $tg\delta(v)$, обусловленных переориентацией молекул H₂O в электрическом поле и нелинейной релаксацией объемного заряда [1, 5]. При измерении температурных спектров $tg \delta(T)$ при частоте поляризующего поля $v = 7 \cdot 10^6$ Гц в онотском тальке обнаружены 4 монорелаксационных максимума при температурах $T_{\text{max}} = 160$ K, 220 K, 265 K, 310 K, а в гипсе при T_{max} = 145 К, 210 К, 270 К, 320 К [1]. Толщина экспериментальных образцов, как и при измерении спектров плотности ТСТД в халькантите и флогопите, составляла d = 30 мкм [1]. Измеритель добротности BM-560 позволил измерить $tg \delta \ge 3 \cdot 10^{-4}$, а электрическую емкость до долей пикофарады. Ошибка при измерении tg δ в этом диапазоне довольно значительна (при tg $\delta \le 10^{-4}$, $\delta = 40...50$ %, при tg $\delta \ge 10^{-3}$ $\delta = 6...10$ %) [1]. Тем не менее, учитывая сложность измерения диэлектрических потерь в КВС, низкотемпературную ветвь (50...100 К) температурного спектра tg $\delta(T)$ в настоящее время экспериментально выявить не удается [5].

При теоретическом описании спектров tg $\delta(T)$ в КВС с помощью феноменологических теорий Дэвидсона–Коула, Гаврильяка–Негами, Фьюса–Кирквуда, Дебая, Аррениуса и т. д. [7, 8] молекулярный механизм релаксационных процессов при установлении инерционной поляризации (времени установления поляризации $\tau_{inp} > 10^{-10}$ с) не рассматривался.

Линейная кинетическая теория [4] исследует релаксацию только одного типа носителей заряда – протонов, двигающихся по водородным связям с различными значениями параметров U_0 (энергия активации), v_0 (собственная частота колебаний), n_0 (равновесная концентрация) в окрестностях температур $T_{\rm max}$ экспериментальных максимумов ${\rm tg} \, \delta_{\rm exp}(T)$, соответствующих различным типам релак-

саторов: дефекты Бьеррума (ионизационные H_3O^+ , OH^- и ориентационные *L*-, *D*-дефекты); молекулы структурной и адсорбированной воды [1]. При расчете теоретических зависимостей $tg\delta_{theory}(T)$ вычисленные $v_{0,t}$, $n_{0,t}$ и измеренные значения $v_{0,e}$, $n_{0,e}$ согласуются в окрестностях температур T_{max} первых четырех максимумов $tg\delta_{exp}(T)$ для онотского талька и гипса. При этом значения tg $\delta_{\text{theory}}(T_{\text{max}})$, $U_{0,t}$ и tg $\delta_{\exp}(T_{\text{max}})$, $U_{0,e}$ при температурах максимумов $T_{\text{max}} = 310$ К (в тальке), $T_{\text{max}} = 320$ К (в гипсе) не согласуются, что указывает на недостаточность линейного приближения для исследования высокотемпературного максимума, связанного с нелинейной релаксацией объемного заряда [5].

В связи с этим актуально построение нелинейной кинетической теории, позволяющей исследовать молекулярный механизм релаксационной поляризации в диэлектриках (в том числе в КВС, корундо-циркониевой керамике (КЦК)) с помощью общей системы кинетических уравнений, независимо от параметров кристаллической решетки, типа и параметров дефектов структуры, в широком диапазоне температур и напряженностей поляризующего поля. При этом вычисление поляризации должно строиться с учетом нечетных по полю членов, начиная с третьего порядка теории возмущений в функциях пространственных переменных и времени $\vec{P}(\vec{r}; t; \vec{E}; \vec{E}^3; \vec{E}^5; ...)$.

1. Спектры комплексной диэлектрической проницаемости

В диэлектрике, в периодическом электрическом поле $\vec{E}(t) = \vec{E}_0 \exp(i\omega t)$ вектор электростатической индукции $\vec{D} = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \vec{E}(t)$, $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}(t) + \vec{P}$ вычисляется с учетом комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) $\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}' - i\hat{\varepsilon}''$, где $\hat{\varepsilon}' = \text{Re}(\hat{\varepsilon})$, $\hat{\varepsilon}'' = \text{Im}(\hat{\varepsilon}) -$ вещественная и мнимая компоненты КДП. Вектор поляризации $\vec{P} = \vec{P}_{\infty} + \vec{P}_{rp}$ будем строить с учетом как безынерционной (оптической) $\vec{P}_{\infty} = \hat{\alpha}_{\infty} \vec{E}$, так и инерционной (релаксационной) поляризации $\vec{P}_{rp} = \hat{\alpha}_{rp}\vec{E}$, где $\hat{\alpha}_{\infty}$, $\hat{\alpha}_{rp} -$ комплексные коэффициенты поляризации (ККП), отражающие молекулярный механизм соответственно оптической (время релаксации $\tau_{opt} \le 10^{-12}$ с) и релаксационной (время релаксации $\tau_{rp} \ge 10^{-10}$ с) поляризации [9]. Основной вклад в коэффициент $\hat{\alpha}_{\infty}$ вносит электронная, упруго-ионная и упруго-дипольная поляризация. В диэлектриках со сложной кристаллической структурой, по результатам измерений спектров tg $\delta(v)$, при постоянной температуре поляризации $T_p \approx 70...1250$ К и напряженности поляризующего поля $E_0 \approx 100...1000$ кВ/м экспериментальные максимумы (tg δ)_{тах} реализуются при частотах поля $v_{max} \approx 1$ кГц...10 МГц (радиочастотный диапазон) [1], что позволяет определить

диэлектрическую проницаемость в области оптических частот как $\varepsilon_{\infty} = 1 + \frac{\alpha_{\infty}}{\epsilon_0}$,

где $\,\alpha_{\infty}=\hat{\alpha}_{\infty}^{(\omega=\,0)}-$ вещественная величина. Тогда, КДП кристалла

$$\hat{\varepsilon}(\omega,T) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\hat{\alpha}_{rp}(\omega,T)}{\varepsilon_0} \,. \tag{1}$$

Слоистый диэлектрик – сложная кристаллическая структура, состоящая из ионной, дипольной подсистем и молекул структурной (связанной) и встроенной (межслоевой) воды [10]. Дефекты структуры решетки также образуют отдельные подсистемы (междоузельные ионы, анионные и катионные вакансии, А-, К-диполи; диполоны (ассоциированные вакансии разных знаков) и др.) [11].

Каждая из подсистем имеет определенную пространственную структуру и описывается соответствующим потенциалом взаимодействия структурных элементов. В данной работе потенциалы взаимодействия внутри подсистем и между подсистемами рассматривать не будем, ограничиваясь молекулярными параметрами (энергия активации, частота собственных колебаний, равновесная концентрация, постоянная решетки) основных структурных элементов подсистем и дефектов структуры.

Поскольку слоистые диэлектрики характеризуются неоднородной структурой, в этих материалах под действием электрического поля происходит накопление электрического заряда на границах раздела и на поверхности электродов, что приводит к формированию, в пространстве между электродами пространственно неоднородно распределенного заряда, что и определяет релаксационную поляризацию как миграционную. В КВС, в области слабых полей, при температурах T = 70...450 К, по данным экспериментов [11], основной вклад в поляризацию вносят термически активируемые (область высоких температур T > 100 K) [1, 4] и квантовые (область низких температур T = 70...100 K) [2, 3] переходы протонов по водородным связям, со смещением протона относительно положения равновесия на большие расстояния, в направлении силовых линий электрического поля – протонно-релаксационная поляризация.

В общем, при математическом описании кинетики релаксационной поляризации принимаем в качестве релаксаторов (основных носителей заряда) наиболее подвижные частицы, при заданных параметрах кристаллической решетки и внешнего поля (частота, амплитуда напряжения, волновой вектор). Как правило, в области слабых полей в диэлектриках релаксаторами являются ионы обоих знаков заряда и молекулы воды. Кристаллическую решетку принимаем идеальной, т. е. пренебрегаем как диссоциацией релаксаторов, так и их рекомбинацией на ловушках. Аналитический вид невозмущенного кристаллического потенциального поля определяется механизмом взаимодействия релаксаторов с фоновым силовым полем, образованным слабо подвижными частицами (тяжелыми ионами, молекулами, полярными группами, кластерами и др.). Расчет компонент ККП

$$\hat{\alpha}_{rp}'(\omega,T) = \operatorname{Re}\left(\frac{\left\langle \vec{P}_{rp}^{(\omega)}(\vec{r};t) \right\rangle}{\vec{E}}\right), \quad \hat{\alpha}_{rp}''(\omega,T) = \operatorname{Im}\left(\frac{\left\langle \vec{P}_{rp}^{(\omega)}(\vec{r};t) \right\rangle}{\vec{E}}\right) \text{ сводится к усреднению}$$

вектора поляризации $\vec{P}^{(\omega)}(\vec{r}; t)$ по пространственным переменным \vec{r} , с помощью неравновесной функции распределения релаксаторов, вычисляемой из решения кинетического уравнения Больцмана, в приближении интеграла столкновений [12],

$$\frac{\partial f^{(\omega)}(\vec{\mathbf{r}};t)}{\partial t} = \operatorname{St}\left(f^{(\omega)}(\vec{\mathbf{r}};t)\right).$$
(2)

Уравнение (2) описывает релаксацию системы при ее слабых отклонениях от состояния равновесия, когда $f^{(\omega)}(\vec{r};t) \approx f^{(0)}(\vec{r}) + \delta f^{(\omega)}(\vec{r};t)$, где $\delta f^{(\omega)}(\vec{r};t) << f^{(0)}(\vec{r})$ есть малая поправка к равновесной функции распределения $f^{(0)}(\vec{r})$. Принимаем концентрацию релаксаторов $n^{(\omega)}(\vec{r};t) = Nf^{(\omega)}(\vec{r};t) \approx n^{(0)}(\vec{r}) + \delta n^{(\omega)}(\vec{r};t)$ [9, 11], где $\delta n(\vec{r};t) = n(\vec{r};t) - n_0(\vec{r})$ есть концентрация избыточная в сравнении с $n_0(\vec{r})$; $N = \int_V n_0(\vec{r}) dV$ – полное количество данного сорта релаксаторов в системе. Поскольку в слоистых диэлектриках релаксационное движение ионов в электрическом поле протекает в направлении кристаллической оси (перпендикулярно плоскостям спайности), ограничимся моделью одномерного потенциального рельефа. Очевидно, что вероятность перехода катионов по полю выше, чем против поля, а для анионов наоборот. Из условия переходов катионов между соседними состояниями равновесия (потенциальными ямами) номера i - 1, i, i + 1, на основании (2) имеем систему кинетических уравнений (применимых также при описании релаксации анионов) [1]

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = A_{i-1,i}^{(-)} n_{i-1} - \left(A_{i,i-1}^{(+)} + A_{i,i+1}^{(-)}\right) n_i + A_{i+1,i}^{(+)} n_{i+1},$$
(3)

где n_i – концентрация ионов в *i*-м состоянии; $A_{i,j}^{(\pm)} = \frac{v_0}{2} \exp\left[-\frac{U_0 \pm \left|\Delta U_{i,j}\right|}{k_{\rm B}T}\right]$ – ве-

роятность перехода иона, в единицу времени, из состояния *i* в *j* по полю $A_{i,j}^{(-)}$, или против поля $A_{i,j}^{(+)}$; v_0 – собственная частота колебаний иона в невозмущенной *i*-й потенциальной яме; $\Delta U_{i,j}$ – обусловленное внешним полем приращение высоты потенциального барьера U_0 при переходе иона из состояния *i* в *j*, вычисляется для сравнительно невысоких частот поля (1 кГц...10 МГц), когда процессами запаздывания можно пренебречь,

$$\left|\Delta U_{i,j}\right| = \begin{cases} \frac{q}{\left|\phi(x_{i},t) - \phi\left(x_{i} + \frac{a}{2}, t\right)\right|, \ i < j}{q\left|\phi\left(x_{i} - \frac{a}{2}, t\right) - \phi(x_{i}, t)\right|, \ i > j}, \end{cases}$$
(4)

где q – заряд иона; φ – потенциал электрического поля; a – параметр решетки. Принимая напряженность электрического поля в области *i*-й потенциальной ямы $E(x_i;t) = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}\Big|_{x=x_i}$ слабо изменяющейся функцией координаты $E(x_i;t) \approx E_i(t)$,

вычисляем, приближенно поправку $\left|\Delta U_{i,j}\right| = \left| q \int_{x_i}^{x_j} E(x;t) dx \right| \approx \approx \frac{qE_i a}{2}$. В области

слабых полей $\frac{\left|\Delta U_{i,j}\right|}{k_BT}$ <<1, вычисляя скорость вероятности переходов ионов, в

линейном приближении $A_{i,j}^{(\pm)} \approx \frac{v_0}{2} \exp\left[-\frac{U_0}{k_B T}\right] \left(1 \mp \frac{qE_i a}{2k_B T}\right)$, обозначая кинетиче-

ские коэффициенты $a_0 = \frac{v_0}{2} \exp\left[-\frac{U_0}{k_B T}\right], \ b_0 = \frac{1}{k_B T} a_0$, получаем

$$A_{i,i\pm 1}^{(\mp)} = a_0 \pm \frac{qab_0}{2} E_i; \ A_{i\pm 1,i}^{(\pm)} = A_0 \mp \frac{qab_0}{2} E_{i\pm 1}.$$
(5)

Подстановка выражений (5) в (3) дает

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = a_0 (n_{i-1} + n_{i+1} - 2n_i) + \frac{b_0 q a}{2} (n_{i-1} E_{i-1} - n_{i+1} E_{i+1}).$$
(6)

Представляя напряженность электрического поля и концентрацию ионов в состояниях (i-1) и (i+1) приближенно $E_{i\pm 1} \approx E_i \pm a \frac{\partial E}{\partial x}\Big|_{x=x_i}$, $n_{i\pm 1} \approx n_i \pm a \frac{\partial n}{\partial x}\Big|_{x=x_i}$ +

 $+\frac{a^2}{2}\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}\Big|_{x=x_i}$, на основании (6), после замены переменной $\Delta n = n(x, t) - n_0$, где

 n_0 — равновесная концентрация ионов, принимая в данной модели величиной постоянной во всем температурном диапазоне, с учетом уравнения Пуассона (вытекающего из уравнения Даламбера, при малых значениях волнового вектора)

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty} \Delta n(x,t), \qquad (7)$$

получаем нелинейное дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial(\Delta n)}{\partial t} = D \frac{\partial^2(\Delta n)}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial(\Delta n E)}{\partial x} - \frac{q n_0 \mu}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty} \Delta n - \frac{\mu q a^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty} \Delta n \frac{\partial^2(\Delta n)}{\partial x^2} \,. \tag{8}$$

В (8) приняты обозначения: $D = a_0 a^2 -$ коэффициент диффузии; $\mu = q a^2 b_0 -$ коэффициент подвижности. Выполняя в (8) замену переменных $\xi = \frac{x}{a}$, $\tau = a_0 t$,

$$\rho = n - n_0$$
, $z = \frac{E}{E_0}$, где E_0 – напряженность однородного стационарного электри-

ческого поля и вводя обозначения $\eta = \frac{\mu q}{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty a_0}$, $\theta = \frac{q n_0 \mu}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty a_0} = 2\eta n_0$, $\gamma = \frac{\mu a E_0}{D}$, получаем уравнение

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \rho}{\partial \xi^2} - \gamma \frac{\partial (\rho z)}{\partial \xi} - \theta \rho - \eta \rho \frac{\partial^2 \rho}{\partial \xi^2}.$$
(9)

В области слабых полей $\gamma = \frac{\mu a E_0}{D} \approx \frac{q a E_0}{k_B T} << 1$ решение уравнения (9), совместно с (7), может строиться методами теории возмущений в виде степенных рядов

$$\rho(\xi; \tau) = \sum_{k=1}^{+\infty} \gamma^k \rho_k(\xi; \tau), \ z(\xi; \tau) = \sum_{k=0}^{+\infty} \gamma^k z_k(\xi; \tau) .$$
(10)

Очевидно, что выражение $\gamma^2 \eta \rho_1 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial \xi^2}$ появляется в (9) только во втором приближении теории возмущений, что позволяет линеаризовать (9) и перейти к урав-

олижении теории возмущении, что позволяет линеаризовать (9) и переити к уравнению типа Фоккера–Планка

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \rho}{\partial \xi^2} - \gamma \frac{\partial (\rho z)}{\partial \xi} - \theta \rho .$$
(11)

В начальный момент времени ρ(ξ;0) = 0. Из уравнения неразрывности тока

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial (n \cdot E)}{\partial x} \Leftrightarrow q \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial \overline{j}_x}{\partial x} = 0, \qquad (12)$$

при блокирующих электродах $\vec{j}_x(0; t) = \vec{j}_x(d; t) = 0$ имеем

$$\frac{\partial \rho}{\partial \xi}\Big|_{\xi = \left[0; \frac{d}{a}\right]} = \left[\gamma(n_0 + \rho)z\right]\Big|_{\xi = \left[0; \frac{d}{a}\right]}.$$
(13)

На основании (7), используя граничное условие $\int_{0}^{d} E(x,t)dx = V_0 \exp(i\omega t)$, где

 V_0 , $\,\omega\,$ – соответственно амплитуда и частота ЭДС [1], имеем

$$\frac{\partial z}{\partial \xi} = \varphi \rho, \quad \int_{0}^{d/a} z d\xi = \frac{d}{a} \exp\left(\frac{i\omega}{a_0}\tau\right), \quad (14)$$

где $\varphi = \frac{aq}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty E_0}$. Вычисляем «нулевое» безразмерное поле в виде $z_0(\xi; \tau) = \exp\left(\frac{i\omega}{a_0}\tau\right)$. В последующих приближениях $(k \ge 1)$: $\int_0^{d/a} z_k(\xi; \tau) d\xi = 0$.

Подставляя ряды (10) в (11), (13), (14) в асимптотическом пределе, вычисляем плотность пространственного распределения объемного заряда в первых трех приближениях теории возмущений k = 1, 2, 3:

$$\rho_1(\xi;\tau) = \frac{2aN_0}{d} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n \left(1 - (-1)^n\right)}{\frac{1}{\tau_n} + i\frac{\omega}{a_0}} \cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right) \times \exp\left(\frac{i\omega\tau}{a_0}\right);\tag{15}$$

$$\rho_{2}(\xi;\tau) = \frac{4a^{4}qN_{0}^{2}}{d^{3}\varepsilon_{0}\varepsilon_{\infty}E_{0}}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^{s}(1-(-1)^{s})^{2}(1-(-1)^{n})}{\frac{\pi^{2}s^{2}a^{2}}{d^{2}}\left(\frac{1}{\tau_{s}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{n}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)}\right)\cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right)\times$$

$$\times \exp\left(\frac{i\omega\tau}{a_{0}}\right) + \frac{4a^{2}N_{0}}{d^{2}}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^{s}(1-(-1)^{s})(1+(-1)^{n})}{\left(\frac{1}{\tau_{s}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{n}}+2i\frac{\omega}{a_{0}}\right)}\right)\times$$

$$\times \frac{n^{2}}{s^{2}-n^{2}}\cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right)\exp\left(2i\frac{\omega}{a_{0}}\tau\right);$$
(16)

$$\begin{split} \rho_{3}(\xi,\tau) &= \frac{8a^{7}q^{2}N_{0}^{3}}{d^{5}\varepsilon_{0}^{2}\varepsilon_{w}^{2}}E_{0}^{2}}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{s=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\times\\ &\times \left(\frac{(-1)^{s}(1-(-1)^{s})^{2}\left(1-(-1)^{m}\right)^{2}\left(1-(-1)^{n}\right)\cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right)}{\frac{\pi^{2}s^{2}a^{2}}{d^{2}}\frac{\pi^{2}m^{2}a^{2}}{d^{2}}\left(\frac{1}{\tau_{s}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{m}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\times\left(\frac{1}{\tau_{n}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\right)\times\\ &\times \exp\left(\frac{i\omega\tau}{a_{0}}\right) + \frac{8a^{5}qN_{0}^{2}}{d^{4}\varepsilon_{0}\varepsilon_{w}E_{0}}\sum_{s=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\times\\ &\times \left(\frac{(-1)^{s}(1-(-1)^{s})^{2}(1-(-1)^{m})(1+(-1)^{n})\cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right)}{\frac{\pi^{2}s^{2}a^{2}}{d^{2}}\left(\frac{1}{\tau_{s}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{m}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{n}}+2\frac{i\omega}{a_{0}}\right)}\right)\times\\ &\times \frac{n^{2}}{m^{2}-n^{2}}\exp\left(2\frac{i\omega}{a_{0}}\tau\right) - \frac{8a^{4}qN_{0}^{2}}{d^{4}\varepsilon_{0}\varepsilon_{w}E_{0}}\sum_{s=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\times\\ &\times \left(\frac{(-1)^{s}(-1)^{m}(1-(-1)^{s})(1-(-1)^{m})^{2}(1+(-1)^{n})\cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right)}{\frac{\pi^{2}n^{2}a^{2}}{d^{2}}\left(\frac{1}{\tau_{s}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{m}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{n}}+2\frac{i\omega}{a_{0}}\right)}\right)\times\\ &\times \frac{n^{2}\exp\left(2\frac{i\omega}{a_{0}}\tau\right)}{s^{2}-n^{2}} - \frac{8a^{4}qN_{0}^{2}}{d^{3}\varepsilon_{0}\varepsilon_{w}E_{0}}\sum_{s=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\times\\ &\times \left(\frac{(-1)^{s}(-1)^{m}(1-(-1)^{s})(1-(-1)^{m})}{\frac{\pi na}{d}\left(\frac{1}{\tau_{s}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{m}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{n}}+2\frac{i\omega}{a_{0}}\right)}\right)\frac{\pi n}{4}\times\\ &\times \{\delta(n-m-s)+\delta(n-m+s)-\delta(n+m-s)\}\times\cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right)\exp\left(2\frac{i\omega}{a_{0}}\tau\right)+\frac{8a^{3}N_{0}}{d^{3}}\times\\ &\times \sum_{s=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{(-1)^{s}(1-(-1)^{s})(1-(-1)^{m})}{\left(\frac{1}{\tau_{s}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{m}}+2\frac{i\omega}{a_{0}}\right)}\right)\times\\ &\times \frac{n^{2}m^{2}}{(m^{2}-n^{2})(s^{2}-m^{2})}\cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right)\exp\left(3\frac{i\omega}{a_{0}}\tau\right). \quad (17)$$

В (15)–(17) τ_n , τ_m , τ_s – соответственно безразмерное время релаксации для релаксационных мод номера *n*, *m*, *s*. Размерное время релаксации для *n*-й релаксационной моды вычисляется из выражения $T_n = \frac{\tau_n}{a_0}$ и равно $T_n = \frac{T_{nD}T_M}{T_{nD} + T_M}$.

 $T_{nD} = \frac{T_D}{n^2}$ – диффузионное время релаксации для *n*-й, а $T_D = \frac{d^2}{\pi^2 D}$ – для первой релаксационной моды. Максвелловское время релаксации от номера моды не зависит, $T_M = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}{q n_0 \mu}$. Для релаксационных мод номера *m*, *s* пишем выражения T_s , T_m . В (17) четвертое слагаемое можно интерпретировать как нелинейное взаимодействие двух релаксационных мод, причем члены с δ-символами Кронекера описывают процессы рождения $\delta(m+s-n)$ и уничтожения $\delta(m+n-s)$, $\delta(m-s-n)$ *n*-релаксационных мод.

Вычисления в следующих приближениях теории возмущений (k = 4,5 и т. д.) из сравнения с (15)–(17) позволяют записать рекуррентное выражение

$$\begin{split} \rho_{k1}^{(\omega)}(\xi,\tau) &= -\frac{4aN_0}{d} \frac{8^{k-1}a^{k-1}q^{k-1}N_0^{k-1}}{\pi^{2(k-1)}\varepsilon_0^{k-1}\varepsilon_\infty^{k-1}E_0^{k-1}} \times \\ &\times \sum_{n_1=1}^{\infty} \sum_{n_2=1}^{\infty} \cdots \sum_{n_k=1}^{\infty} \left| \frac{\sin^2\left(\frac{\pi n_1}{2}\right)\sin^2\left(\frac{\pi n_2}{2}\right) \cdots \sin^2\left(\frac{\pi n_k}{2}\right)}{n_1^2 \cdot n_2^2 \cdot \dots \cdot n_k^2 \left(\frac{1}{\tau_{n_1}} + i\frac{\omega}{a_0}\right) \left(\frac{1}{\tau_{n_1}} + i\frac{\omega}{a_0}\right) \cdots \left(\frac{1}{\tau_{n_k}} + i\frac{\omega}{a_0}\right)} \right) \times \\ &\times \cos\left(\frac{\pi na}{d}\xi\right) \exp\left(\frac{i\omega\tau}{a_0}\right); \quad (18) \\ \rho_{k2}^{(2\omega)}(\xi,\tau) &= \frac{16(k-1)a^2N_0^2}{d^2} \frac{8^{k-2}a^{k-2}q^{k-2}N_0^{k-2}}{\pi^{2(k-2)}\varepsilon_0^{k-2}\varepsilon_\infty^{k-2}E_0^{k-2}} \times \\ &\times \sum_{n_1=1}^{\infty} \sum_{n_2=1}^{\infty} \cdots \sum_{n_k=1}^{\infty} \left| \frac{n_k^2 \cos^2\left(\frac{\pi n_k}{2}\right)\sin^2\left(\frac{\pi n_{k-1}}{2}\right)\sin^2\times}{n_1^2 \cdot n_2^2 \cdot \dots \cdot n_{k-2}^2\left(n_k^2 - n_{k-1}^2\right)\left(\frac{1}{\tau_{n_{k-1}}} + i\frac{\omega}{a_0}\right)} \right)} \times \\ &\times \cos\left(\frac{\pi n_k a}{d}\xi\right) \frac{\exp\left(2\frac{i\omega}{a_0}\tau\right)}{\frac{1}{\tau_{n_k}} + 2\frac{i\omega}{a_0}}. \quad (19) \end{split}$$

Далее, в бесконечном приближении теории возмущений $(k \rightarrow \infty)$ на частотах поля ω, 2ω имеем

$$\rho^{(\omega)}(x,t) = -\frac{4aN_0\gamma}{d\left(1 - \frac{8aqN_0\Lambda\gamma}{\pi^2\varepsilon_0\varepsilon_\infty E_0}\right)} \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{\sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right)}{\frac{1}{\tau_n} + i\frac{\omega}{a_0}}\right] \cos\left(\frac{\pi nx}{d}\right) \exp(i\omega t); \quad (20)$$

$$\rho^{(2\omega)}(x,t) = \frac{16a^2N_0\gamma^2}{d^2\left(1 - \frac{8aqN_0\Lambda\gamma}{\pi^2\varepsilon_0\varepsilon_\infty E_0}\right)^2} \times \frac{16a^2N_0\gamma^2}{\pi^2\varepsilon_0\varepsilon_\infty E_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{n^2\cos^2\left(\frac{\pi n}{2}\right)\sin^2\left(\frac{\pi s}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi nx}{d}\right)}{(n^2 - s^2)\left(\frac{1}{\tau_s} + i\frac{\omega}{a_0}\right)\left(\frac{1}{\tau_n} + 2\frac{i\omega}{a_0}\right)}\right] \exp(2i\omega t). \quad (21)$$

В (20), (21) принято обозначение $\Lambda = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi s}{2}\right)}{s^2\left(\frac{1}{\tau_s} + i\frac{\omega}{a_0}\right)}$. Поскольку $\gamma = \frac{\mu a E_0}{D}$,

зависимость $\rho^{(\omega)}(x, t)$, $\rho^{(2\omega)}(x, t)$ от напряженности поляризующего поля соответственно линейная и квадратичная.

Суммарная поляризация $P_{rp} = P(x, t) = qx\rho(x, t)$ при частотах переменного поля $\omega, 2\omega, P^{(\omega; 2\omega)}(x,t) = P^{(\omega)}(x,t) + P^{(2\omega)}(x,t)$, усредненная по толщине кристалла $P(t) = \frac{q}{d} \int_{0}^{d} x \rho(x, t) dx$, с учетом (21), (22) $P(t) = P^{(\omega)}(t) = \langle P^{(\omega)}(x, t) \rangle$ гене-

рируется только на основной частоте ω

$$P^{(\omega)}(t) = \frac{8aqN_0\gamma}{\pi^2 \left(1 - \frac{8aqN_0\Lambda\gamma}{\pi^2\varepsilon_0\varepsilon_\infty E_0}\right)} \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{\sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right)}{n^2 \left(\frac{1}{\tau_n} + i\frac{\omega}{a_0}\right)}\right] \exp(i\omega t), \qquad (22)$$

а на четной частоте 2 ω поляризация равна нулю: $P^{(2\omega)}(t) = \langle P^{(2\omega)}(x,t) \rangle = 0$, т. е. $\langle P^{(\omega;2\omega)}(x,t) \rangle = P^{(\omega)}(t)$. Согласно $P^{(\omega)}(t) = \hat{\alpha}_{rp}^{(\omega)} E(t)$, в силу (1), вычисляем ККП и КДП:

$$\hat{\alpha}_{rp}^{(\omega)} = \varepsilon_0 \varepsilon_{\infty} \frac{\Gamma_1^{(\omega)} - i\Gamma_2^{(\omega)}}{1 - \Gamma_1^{(\omega)} + i\Gamma_2^{(\omega)}}, \ \hat{\varepsilon}^{(\omega)} = \frac{\varepsilon_{\infty}}{1 - \Gamma_1^{(\omega)} + i\Gamma_2^{(\omega)}}.$$
(23)

В (23) приняты обозначения:

$$\Gamma_{1}^{(\omega)} = \frac{4}{\pi^{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\frac{T_{n}}{T_{M}} \left(1 - (-1)^{n} \right)}{n^{2} \left(1 + \omega^{2} T_{n}^{2} \right)} \right]; \ \Gamma_{2}^{(\omega)} = \frac{4}{\pi^{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\frac{\omega T_{n}^{2}}{T_{M}} \left(1 - (-1)^{n} \right)}{n^{2} \left(1 + \omega^{2} T_{n}^{2} \right)} \right].$$
(24)

Выражения (23) и (24) отличаются от классического закона Дебая [9]. Отделяя в (23) вещественную и мнимую компоненты КДП, имеем

$$\begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}^{(\omega)} \end{bmatrix}' = \operatorname{Re}\begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}^{(\omega)} \end{bmatrix} = \varepsilon_{\infty} \frac{1 - \Gamma_{1}^{(\omega)}}{\left(1 - \Gamma_{1}^{(\omega)}\right)^{2} + \left(\Gamma_{2}^{(\omega)}\right)^{2}};$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}^{(\omega)} \end{bmatrix}'' = \operatorname{Im}\begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}^{(\omega)} \end{bmatrix} = \varepsilon_{\infty} \frac{\Gamma_{2}^{(\omega)}}{\left(1 - \Gamma_{1}^{(\omega)}\right)^{2} + \left(\Gamma_{2}^{(\omega)}\right)^{2}}.$$
(25)

Формулы (25) позволяют рассчитать частотно-температурные спектры КДП в бесконечном приближении теории возмущений и в линейном приближении по полю.

2. Влияние нелинейных эффектов на комплексную диэлектрическую проницаемость

В выражении (17) слагаемое

$$\rho_{33}^{(3\omega)}(x,t) = -\frac{64a^3 N_0}{d^3} \sum_{s=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \times \left(\frac{m^2 n^2 \sin^2\left(\frac{\pi s}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\pi m}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi n x}{d}\right) \exp\left(3i\omega t\right)}{\left(\frac{1}{\tau_s} + i\frac{\omega}{a_0}\right) \left(\frac{1}{\tau_m} + 2i\frac{\omega}{a_0}\right) \left(\frac{1}{\tau_n} + 3i\frac{\omega}{a_0}\right) (m^2 - n^2)(s^2 - m^2)}\right)$$
(26)

дает в третьем приближении теории возмущений *k* = 3 ненулевой вклад в поляризацию,

$$\gamma^{3} P_{33}^{(3\omega)}(t) = \frac{128\mu^{3}a^{6}qN_{0}E_{0}^{3}}{\pi^{2}d^{2}D^{3}} \sum_{s=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \times \left(\frac{m^{2}\sin^{2}\left(\frac{\pi s}{2}\right)\cos^{2}\left(\frac{\pi m}{2}\right)\sin^{2}\left(\frac{\pi n}{2}\right)}{\left(\frac{1}{\tau_{s}}+i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{m}}+2i\frac{\omega}{a_{0}}\right)\left(\frac{1}{\tau_{n}}+3i\frac{\omega}{a_{0}}\right)(m^{2}-n^{2})(s^{2}-m^{2})}\right) \times \\ \times \cos\left(\frac{\pi nx}{d}\right)\exp(3i\omega t).$$

$$(27)$$

Очевидно, что дальнейшее вычисление функций $\gamma^4 P_{43}^{(3\omega)}(t)$, $\gamma^5 P_{53}^{(3\omega)}(t)$, $\gamma^k P_{k3}^{(3\omega)}(t)$ и т. д. позволит рассчитать поляризацию на первых двух нечетных частотах ω , 3ω :

$$P^{(\omega;3\omega)}(t) = \hat{\alpha}^{(\omega)} E(t) + \hat{\alpha}^{(3\omega)} E^3(t) .$$
(28)

При этом КПП и КДП определяются в квадратичном приближении по полю:

$$\hat{\alpha}^{(\omega;3\omega)} = \hat{\alpha}^{(\omega)} + \hat{\alpha}^{(3\omega)} E^2(t), \ \hat{\varepsilon}^{(\omega;3\omega)} = \hat{\varepsilon}^{(\omega)} + \hat{\varepsilon}^{(3\omega)} E^2(t).$$
⁽²⁹⁾

В рамках данной работы ограничение линейным приближением по полю при определении релаксационной поляризации (22) также обосновано тем, что диэлектрические потери в диэлектриках измеряются в основном при настройке электротехнических схем на основную частоту ω .

Выводы

 Разработан механизм формирования объемно-зарядовой поляризации, заключающийся в возбуждении под действием внешнего переменного электрического поля релаксационных мод.

2. Показано, что линеаризация нелинейной системы уравнений Фоккера– Планка и Пуассона возможна только при временах, значительно превосходящих максимальное время релаксации моды с наибольшей длиной волны, равной удвоенной толщине диэлектрика. В этом случае процесс можно считать стационарно периодическим.

3. Получены выражения для распределения объемного заряда на кратных частотных гармониках. Доказано, что отличный от нуля дипольный момент имеют только нечетные частотные гармоники и, следовательно, только они могут быть сгенерированы во внешней цепи при релаксации объемного заряда в переменном электрическом поле. Это явление может служить основой создания генераторов СВЧ путем утроения частот радиодиапазона.

4. Для стационарно периодического процесса объемно-зарядовой поляризации получено выражение для комплексной диэлектрической проницаемости (КДП), отличающееся от выражения Дебая.

5. Разработаны теоретические основы методики прогнозирования качества электрической изоляции и проектирование активных элементов микроэлектроники, оптоэлектроники и лазерной техники.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Тонконогов М.П. Диэлектрическая спектроскопия кристаллов с водородными связями. Протонная релаксация // УФН. 1998. Т. 168, № 1. С. 29–54.
- 2. Квантовые эффекты при термодеполяризации в сложных кристаллах с водородными связями / М.П. Тонконогов, Т.А. Кукетаев, К.К. Фазылов, В.А. Калытка // Известия вузов. Физика. 2004. Т. 47, № 6. С. 8–15.
- Анненков Ю.М., Калытка В.А., Коровкин М.В. Квантовые эффекты при миграционной поляризации в нанометровых слоях протонных полупроводников и диэлектриков при сверхнизких температурах // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 31–37.
- Теория электретного состояния в кристаллах с водородными связями / М.П. Тонконогов, Т.А. Кукетаев, Ж.Т. Исмаилов, К.К. Фазылов // Известия вузов. Физика. – 1998. – Т. 41, № 6. – С. 77–82.

- 5. Размерные эффекты в слоях нанометровой крупности при установлении поляризации в кристаллах с водородными связями / М.П. Тонконогов, Т.А. Кукетаев, К.К. Фазылов, В.А. Калытка // Известия вузов. Физика. 2005. Т. 48, № 11. С. 6–15.
- 6. Левин А.А., Долин С.П., Зайцев А.Р. Распределение заряда, поляризация и свойства сегнетоэлектриков типа КН2Р04 (КДР) // Химическая физика. 1996. Т. 15, № 8. С. 84–92.
- 7. Young G., Salomon R.E. Dielectric behavior of ice with HCl impurity // The Journal of Chemical Physics. 1968. Vol. 48, iss. 4. P. 1635–1644.
- Cole R.H., Worz O. Dielectric properties of Ice I // Physics of Ice: Proceedings of the International Symposium on Physics of Ice, Munich, Germany, 9–14 September 1968. – New York: Plenum Press, 1969. – P. 546–554.
- Новиков Г.Ф. Явления переноса, электропроводность в диэлектриках: учебное пособие к курсу лекций. Воронеж; Черноголовка: [б. и.], 2000. 203 с.
- 10. Потапов А.А., Мецик М.С. Диэлектрическая поляризация. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 263 с.
- 11. Тимохин В.М., Тонконогов М.П., Миронов В.А. Типы и параметры релаксаторов в кристаллогидратах // Известия вузов. Физика. 1990. Т. 33, № 11. С. 82–87.
- 12. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. 528 с.

NON-LIEAR EFFECTS UNDER POLARIZATION OF DIELECTRICS WITH A COMPOUND CRYSTALLINE STRUCTURE

Kalytka V.A.¹, Baimukhanov Z.K.², Mekhtiev A.D.¹

¹ Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan ² Kazakh Agrotechnical University named after S. Seyfullin, Astana, Kazakhstan

The molecular mechanism of migratory (interlayer) polarization in dielectrics with a compound crystalline structure (hydrogen bonded crystals (HBC) and other layered materials) in an alternating electric field in the limits of low fields is investigated with the help of methods of the kinetic theory of dielectric relaxation. The Boltzmann kinetic equation is constructed in the collision integral approximation for the ensemble of non - interacting particles (ions) moving in the one-dimensional crystalline potential image with the parabolic shape barriers disturbed by an external (polarizing) electric field. According to this model ions under polarization move along the electric field lines parallel to the crystal axis. Influence of a phonon subsystem on relaxation processes is not accounted for. The recombination and dissociation of ions are not studied. Coefficients of the kinetic equation are calculated in the linear polarizing field approximation with respect to only thermally activated (classical) transitions of particles through a potential barrier. The non-linear kinetic phenomena during interlayer polarization in HBCs are researched based on the Boltzmann statistics for the subsystem of ions distributed by the levels of non-disturbed quasicontinuous spectra. A linearized system of Fokker-Plank and Poisson equations is solved for the model of blocking electrodes in the stationary polarization mode in the endless approximation of the perturbation theory and in the quadratic approximation of the polarizing field. Expressions built for the stationary periodic process of volume-charge polarization for complex dielectric permittivity differ from the classical Debye dispersion equation. It is proved that a non-zero dielectric dipole moment is generated in an alternating electrical field only on the odd harmonic that can serve as a basis for the development of super-high-frequency generators (SHFG) working at triple frequencies

Keywords: Solid dielectrics; layered crystals; hydrogen bonded crystals (HBC); migratory polarization; complex dielectric permittivity (CDP).

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-7-21

REFERENCES

 Tonkonogov M.P. Dielektricheskaya spektroskopiya kristallov s vodorodnymi svyazyami. Protonnaya relaksatsiya [Dielectric spectroscopy of crystals with hydrogen bonds. Proton relaxation]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Physics-Uspekhi, 1998, vol. 168, no. 1, pp. 29–54. (In Russian)

- Tonkonogov M.P., Kuketayev T.A., Fazylov K.K., Kalytka V.A. Quantum effects under thermostimulated depolarization in compound hydrogen-bonded crystals. *Russian Physics Journal*, 2004, vol. 47, no. 6, pp. 583–590. Translated from *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2004, vol. 47, no. 6, pp. 8–15.
- Annenkov Yu.M., Kalytka V.A., Korovkin M.V. Quantum effects under migratory polarization in nanometer layers of proton semiconductors and dielectrics at ultralow temperatures. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 35–41. Translated from *Izvestiya vysshikh* uchebnykh zavedenii. Fizika, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 31–37.
- Tonkonogov M.P., Kuketayev T.A., Ismailov Zh.T., Fazylov K.K. Teoriya elektretnogo sostoyaniya v kristallakh s vodorodnymi svyazyami [Theory of the electret state in crystals with hydrogen bonds]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 1998, vol. 41, no. 6, pp. 77–82. (In Russian)
- Tonkonogov M.P., Kuketayev T.A., Fazylov K.K., Kalytka V.A. Dimensional effects in nanosized layers under establishing polarization in hydrogen-bonded crystals. *Russian Physics Journal*, 2005, vol. 48, no. 11, pp. 1110–1121. Translated from *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, vol. 48, no. 11, pp. 6–15.
- Levin A.A., Dolin S.P., Zaitsev A.P. Raspredelenie zaryada, polyarizatsiya i svoistva segnetoelektrikov tipa KN2R04 (KDR) [Charge distribution, polarization, and properties of KH2PO4(KDP) type ferroelectrics]. *Khimicheskaya fizika – Chemical Physics Reports*, 1996, vol. 15, no. 8, pp. 84–92. (In Russian)
- Young G., Salomon R.E. Dielectric behavior of ice with HCl impurity. *The Journal of Chemical Physics*, 1968, vol. 48, no. 4, pp. 1635–1644.
- Cole R.H., Worz O. Dielectric properties of Ice I. *Physics of Ice: Proceedings of the Interna*tional Symposium on Physics of Ice, Munich, Germany, 9–14 September 1968. New York, Plenum Press, 1969, pp. 546–554.
- 9. Novikov G.F. *Yavleniya perenosa, elektroprovodnost' v dielektrikakh* [The phenomena of transfer, conductivity are in dielectrics]. Voronezh, 2000. 203 p.
- Potapov A.A., Metsik M.S. *Dielektricheskaya polyarizatsiya* [Dielectric polarization]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 1986. 263 p.
- 11. Timokhin V.M., Tonkonogov M.P., Mironov V.A. Tipy i parametry relaksatorov v kristallogidratakh [Relaxer types and parameters in crystal hydrates]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Soviet Physics Journal*, 1990, vol. 33, no. 11, pp. 82–87. (In Russian)
- 12. Lifshits E.M., Pitaevskii L.P. *Fizicheskaya kinetika* [Physical kinetics]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 528 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Калытка Валерий Александрович – родился в 1976 году, канд. физ.-мат. наук, доктор PhD (по направлению «Физика»), доцент кафедры «Энергетические системы» Карагандинского государственного технического университета. Область научных интересов: теоретическая и математическая физика; физика твердого тела; диэлектрическая спектроскопия; физика конденсированного состояния. Опубликовано более 110 научных трудов. (Адрес: 100000, Казахстан, г.Караганда, пр. Бульвар Мира, 56. Е-mail: kalytka@mail.ru).

Kalytka Valeriy Alexandrovich (was born in 1976 year) – Candidate of Sciences (Phys.& Math.), Doctor of Philosophy (in Phys.), associate professor at «Power engineering systems» department in Karaganda state technical university (KSTU). His scientific investigate (research) interests are currently focused on theoretical and mathematical physics, Solid state physics, dielectric spectroscopy and Physics of condensed media. He is the author (and coauthor) of more than 110 scientific proceedings. (Address: 56, Bulvar Mira Av., Karaganda, 100000, Kazakhstan. E-mail: kalytka@mail.ru).



Баймуханов Зейн Кайрбекович – родился в 1974 году, канд. физ.мат. наук, зав. кафедрой «Информационные системы» Казахского агротехнического университета (КазАТУ) им. С. Сейфуллина. Область научных интересов: экспериментальная физика; математическое моделирование физического эксперимента; физика конденсированного состояния. Опубликовано более 50 научных трудов. (Адрес: 010002, Казахстан, г. Астана, ул. Победы, 62. Е-mail: zein.77@mail.ru).

Baimukhanov Zein Kairbekovich (was born in 1974 year) – Candidate of Sciences (Phys. & Math.), chief at «Information systems» department in Kazakhstan agrotechnical university of S. Seifullin. His scientific investigate (research) interests are currently focused on experimental physics, mathematical modeling of physical experiment and Physics of condensed media. He is the author (and coauthor) of more than 50 scientific proceedings. (Address: 62, Pobeda St., Astana, 010002, Kazakhstan. E-mail: kalytka@mail.ru).



Мехтиев Али Джаванширович – родился в 1972 г., канд. техн. наук, зав. кафедрой «Энергетические системы» Карагандинского государственного технического университета. Область научных интересов: радиотехника и приборостроение, технологии и системы связи, теплоэнергетика и электроэнергетика. Адрес: 100000, Казахстан, г. Караганда, пр. Бульвар Мира, 56. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Mekhtiev Ali Dzhavanshirovich – (was born in 1972 year) – Candidate of Technical Sciences, chief at «Power engineering systems» department in Karaganda state technical university (KSTU). His scientific investigate (research) interests are currently focused on radio electronics engineering and device construction, technologies and communication system chair, heart and power engineering. He is the author (and coauthor) more than 200 scientific proceedings. (Address: 56, Bulvar Mira Av., Karaganda, 100000, Kazakhstan. E-mail: barton.kz@mail.ru).

> -Статья поступила 12 июля 2016 г. Received July 12, 2016

To Reference:

Kalytka V.A., Baimukhanov Z.K., Mekhtiev A.D. Nelineinye effekty pri polyarizatsii dielektrikov so slozhnoi kristallicheskoi strukturoi [Non-linear effects under polarization of dielectrics with compound crystalline structure]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 7–21. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-7-21

2016

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

июль-сентябрь ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 54.057

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОГО НИТРОВАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

А.П. Коскин¹, Д.В. Толстихина²

¹Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН ²Новосибирский государственный технический университет

В промышленности процесс нитрования бензола осуществляют в жидкофазном режиме в присутствии экологически небезопасной серной кислоты (синтез нитробензола – более 5 млн т в год). Замена серной кислоты гетерогенным кислотным катализатором является экологически безопасной альтернативой, отвечающей принципам «зеленой» химии. Статья посвящена разработке метода тестирования гетерогенно-кислотных каталитических систем газофазного нитрования, в том числе метода анализа реакционных смесей, полученных в результате тестовой реакции.

В результате работы найдены оптимальные реакционные условия газофазного нитрования бензола азеотропным раствором азотной кислоты (160 °С, соотношение азотная кислота: бензол = 0,76, ток инертного газа 40 мл/мин). Разработан метод анализа реакционных смесей, основанный на измерении плотностей органической фазы, позволяющий проводить тестирование большого количества твердокислотных систем, которое необходимо для нахождения эффективной и стабильной каталитической системы нитрования. Получены уравнения, связывающие мольную долю нитробензола (конверсия бензола) и плотность смеси. Для апробирования методики на реальных реакционных смесях в ходе выполненной работы были синтезированы и исследованы в идентичных условиях гетерогеннокаталитические системы нитрования бензола на основе оксида молибдена и композиты сульфатированный перфторполимер/носитель.

Ключевые слова: «зеленая» химия; газофазное нитрование, гетерогенное нитрование, кислотный катализ, нитрование ароматических соединений.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-22-32

Введение

Нитрование бензола азотной кислотой в промышленности осуществляют в жидкофазном режиме в присутствии экологически небезопасной серной кислоты (синтез нитробензола – более 5 млн т в год) [1–3]. Серная кислота не расходуется в реакции, однако дезактивируется реакционной водой и, таким образом, нуждается в регенерации путем удаления воды. Данная стадия требует значительных энергетических затрат и сопряжена с проблемами охраны окружающей среды. Замена серной кислоты гетерогенным кислотным катализатором, нерастворимым в условиях нитрования, является экологически безопасной альтернативой, отвечающей принципам «зеленой» химии [4]. Процесс гетерогенно-каталитического нитрования активно изучается начиная с 1980-х годов [1]. Среди исследованных в газофазном нитровании групп катализаторов следует выделить: алюмосиликаты (деалюминированный НҮ, морденит [5], модифицированные природные алюмосиликаты, в частности монтмориллонит [6]); смешанные металл-оксидные системы, приготовленные на основе оксидов металлов IV и VI групп Периодической

№ 3 (32)

Работа выполнена при поддержке РАН и ФАНО России (проект V.45.3.5).

системы элементов [7–8]; классические кислоты, нанесенные на различные носители [9–10]; перфторалкансульфокислоты и композиты на их основе [11–12].



Анализ литературных данных выявил затруднительность выбора наиболее эффективной каталитической системы. Различными авторами сравнения испытанных каталитических систем проводились в несопоставимых реакционных условиях. Таким образом, подбор наиболее эффективной системы должен заключаться в скрининге каталитической активности наиболее перспективных каталитических систем в идентичных реакционных условиях. Это подразумевает необходимость анализа большого количества реакционных смесей газофазного нитрования. Анализ реакционной смеси, заключающийся в нахождении конверсий бензола и азотной кислоты, не может быть реализован непосредственно в потоке (on-line режим) из-за неоднородности смеси и наличия коррозионно-активной азотной кислоты. Измерение конверсии бензола в известных литературных источниках заключалось в сборе реакционной смеси за определенный временной промежуток, разделении фаз смеси, дополнительной нейтрализации и сушке органической фазы. Полученные пробы анализировалась газохроматографически. В данной статье применен метод анализа реакционной смеси, основанный на измерении плотности органической фазы (смесь нитробензол-бензол-азотная кислота). Это ускоряет методику тестирования и позволяет проводить тестирование большого количества твердокислотных систем, которое необходимо для нахождения эффективного и стабильного катализатора газофазного нитрования бензола. Разработанная методика анализа протестирована в серии реакций газофазного и жидкофазного нитрования бензола для систем МоО₃/оксидный носитель [8], композитов на основе сульфатированного перфторполимера (СФП/носитель) [11–12], которые являются наиболее перспективными в процессе газофазного нитрования бензола.

1. Экспериментальная часть

Каталитические системы MoO_3/SiO_2 (MoO_3/Al_2O_3) с содержанием оксида молибдена 20 вес.% синтезировали золь-гель методом из гептамолибдата аммония и тетраэтоксисилана (нитрата алюминия) (образцы sg- MoO_3/SiO_2 , sg- MoO_3/Al_2O_3), а также методом пропитки готового носителя SiO_2 (Al_2O_3) по влагоемкости (образцы wi- MoO_3/SiO_2 , wi- MoO_3/Al_2O_3) согласно [8].

При синтезе композитов на основе сульфатированного перфторполимера (Нафион, Nf) нанесение кислотной фазы композита осуществляли в виде SO₃Hформы полимера (Nf–SO₃H), растворенной в смеси низкомолекулярных спиртов (10 вес. %, MeOH–iPrOH–H₂O) [13]. Композиты синтезировались методом пропитки по влагоемкости (wi-Nf/УHB, wi-Nf/SiO₂) и золь-гель методом осаждения тетраэтоксисилана в присутствии раствора сульфополимера (sg-Nf/SiO₂). Для перевода образцов в протонированную H-форму проводили обработку композитов 1М раствором азотной кислоты при 70 °C. Для определения концентрации кислотных центров на поверхности исследуемых каталитических систем применялась методика спиновых зондов, в качестве которых используются катион-радикалы, возникающие в результате адсорбции донорных молекул антрацена, согласно [14]. Данные исследования кислотности представлены в виде удельного количества регистрируемых по ЭПР катионрадикалов. Величины удельной поверхности (S_{уд}, м²/г) синтезированных образцов находили методом низкотемпературной адсорбции азота (Micrometrics).



Рис. 2 – Схема реакционной установки газофазного нитрования ароматических соединений

Fig. 2 – The scheme of gas phase aromatic nitration reactor

Для исследования каталитической активности использовали бензол (99,7 %), азотную кислоту (в виде азеотропного (68 вес.%) раствора). Реактор газофазного нитрования ароматических соединений состоял из трех последовательно соединенных секций (рис. 2):

1 – испаритель-смеситель потоков субстрата (140...200 °С), снабженный жидкостными линиями (ароматического субстрата, азотной кислоты и воды) и линией инертного газа (азот, 10-80 мл/мин). Подача субстратов в жидкостные линии осуществлялась с помощью инфузионных насосов НИШ-01 с весовыми скоростями потоков (WHSV_B и WHSV_{NA}): бензол – 1,42 г/(г_{кат}·ч), азотная кислота 0,87 г/(г_{кат}·ч) (для стандартного эксперимента);

2 – термостатируемый (140...200 °С) проточный реактор (материал пирексовое стекло; длина 10 см, внутренний диаметр 8 мм) с навеской катализатора 1...5 г (фракции 0,25...0,5; 0,5...1 или 1...1,5 мм).

3 – Секция конденсации реакционной смеси. В первом варианте (3-А) газовый поток реакционной смеси барботировали через охлаждаемый раствор NaOH. Образующийся органический слой отделяли и осушали (MgSO₄). Конверсию бензола (C_B) анализировали газохроматографически (Кристалл-2000М), рассчитывая параметры STY (= C_B·WHSV_B/100%·1ч, $\Gamma_{NB}/(\Gamma_{kar}\cdot ч)$, где WHSV_B – весовой поток субстрата, отнесенный к массе катализатора в один час). Содержание примесей анализировали с помощью метода ВЭЖХ согласно [11]. Конверсию азотной кислоты (C_{NA}) определяли обратным титрованием частично нейтрализованного раствора щелочи. Селективность разложения азотной кислоты (S_{NO}) рассчитывалась из разности конверсий азотной кислоты C_{NA} и бензола C_B. Во втором варианте (3-B) продукты конденсировались в охлаждаемом холодильнике (10 °C). Конденсиро-

ванная реакционная смесь разделялась и анализировалась схожим образом. Также для оценки использовали метод определения конверсии бензола (C_B) по плотности органической фазы ($d_{o\phi}$). Для проведения анализов селективности процесса нитрования (концентрация нитрофенолов и динитробензола в реакционной смеси) предпочтительным является сбор смеси по методу «В», так как примесные нитрофенолы, образуя соли, переходят в водную фазу. Для нахождения C_B по плотности предпочтителен метод «А», из-за высокой взаимной растворимости пары нитробензол–азотная кислота [2].

Для нитрования в жидкофазном (периодическом) режиме 10 мл бензола, эквимолярное количество концентрированной азотной кислоты, 10 мл дихлорэтана и 0,1 г катализатора помещали в коническую колбу (100 мл, перемешивание 300 грm), снабженную насадкой Дина–Старка и обратным холодильником [8]. Охлажденные пары конденсировались в обратном холодильнике и собирались в нижней части насадки Дина–Старка.

2. Разработка методики анализа реакционной смеси

Разработанный метод анализа реакционной смеси основан на измерении плотности органической фазы (ОФ). Метод заключался в отборе и взвешивании аликвоты ОФ при нормальных условиях. Мольная дольная нитробензола, численно равная конверсии бензола, определялась по предварительно построенной калибровочной кривой ($C_B = f(d_{o\phi})$, рис. 3). Для калибровочных экспериментов использовали серию смесей чистых компонентов (нитробензол (99,7 %, d = 1,214 г/мл (лит. 1,198 [15])), бензол (99,7 %, d = 0,889 г/мл (лит. 0,874 [15]))). Аликвота (±0,01 мл) полученного раствора термостатировалась, взвешивалась (±0,001 г), а также анализировалась газохроматографически.



Рис. 3 – Зависимость плотности смеси бензол/нитробензол от мольной доли нитробензола (\blacksquare – 20 °C; • – 30 °C; ▲ – 40 °C) *Fig.* 3 – Dependence of benzene-nitrobenzene mixture density of nitrobenzene molar fraction (\blacksquare – 20 °C; • – 30 °C; ▲ – 40 °C)

Полученная зависимость плотности смеси от мольной доли нитробензола имела практически аддитивный (линейный) характер. Наибольшее отклонение от аддитивной зависимости вида (1):

$$d_{\rm o\phi}(x_{\rm NB}) = x_{\rm NB}d_{\rm NB} + (1 - x_{\rm NB})d_{\rm B} \tag{1}$$

наблюдалось в области мольной доли нитробензола $\chi_{NB} \sim 0,6$, что обусловлено уплотнением молекул в смеси. Была отмечена существенная зависимость плотности от температуры аликвоты, что может вносить существенную погрешность в определение мольной доли нитробензола в смеси. Таким образом, необходимо предварительное термостатирование смеси ($20 \pm 0,2$ °C). Зависимость в координатах (d_{mix} ; C_B) достаточно точно аппроксимируется эмпирической формулой (2)

$$C_{\rm B} = \left(-1,072 - 0,160d_{\rm o\phi} + 1,538d_{\rm o\phi}^2\right)100.$$
⁽²⁾

Для реальных реакционных смесей при расчете конверсии бензола по плотности органической фазы был использован ряд приближений. Во-первых, предполагалось, что реакционная смесь не содержит примесных нитрофенолов, динитробензола и азотной кислоты. Согласно данным ВЭЖХ во всех реакционных смесях газофазного нитрования бензола концентрации побочных органических продуктов не превышают 500 ррт и, таким образом, не вносят существенного отклонения в значение плотности. Во-вторых, не проводилась дополнительная дегазация аликвот, чтобы избежать частичного испарения компонентов органической фазы. Растворимость компонентов воздуха и инертного газа в реакционной смеси велика, однако не вносит существенной погрешности в метод определения плотности (в частности, дегазация исходного бензола при барботировании гелием дала следующие значения плотности: 0,88 г/мл для насыщенного воздухом и 0,889 г/мл для дегазированного бензола). Несмотря на низкую взаимную растворимость компонентов систем нитробензол-вода (~0,0019 г/мл) и бензол-вода (~0,0018 г/мл), растворимость нитробензола существенно возрастает в присутствии азотной кислоты. В зависимости от концентрации азотной кислоты растворимость нитробензола (и азотной кислоты в нитробензоле) может достигать 30 мас.%, в зависимости от концентрации кислоты (при 25 °C) [2]. Следовательно, органическая фаза реакционной смеси может содержать большое количество HNO₃. Для исключения стадии дополнительной нейтрализации органической фазы нами была изменена схема блока сбора смеси в реакционной установке газофазного нитрования бензола (3-В, см. рис. 2). При барботировании газового потока реакционной смеси через раствор щелочи происходит нейтрализация непрореагировавшей азотной кислоты. Таким образом, в отделенной для отбора аликвоты органической фазе не содержится следов кислот.

3. Гетерогенно-кислотное нитрование ароматических соединений

Для выбранного типа реактора оптимальным оказалось проведение процесса на фракции гранул катализатора wi-MoO₃/SiO₂ 0,25–0,5 мм (выход нитробензола: $C_B = 81 \%$, для WHSV_B – 1,42 г/($\Gamma_{\text{кат}}$ ·ч), соотношение потоков: азотная кислота/бензол – 0,76, поток инерта 20 мл/мин). Использование катализатора с меньшим размером фракции приводило к существенному увеличению сопротивления каталитического слоя катализатора газовому потоку. Схожие закономерности наблюдались и для других каталитических систем.

Газофазное нитрование ароматических соединений целесообразно проводить в диапазоне между точкой кипения азеотропного раствора азотной кислоты $(T_{\text{кип}} = 121 \text{ °C})$ и термической стабильностью азотной кислоты. При температурах больше 180 °C начинается необратимый процесс разложения азотной кислоты с образованием менее реакционно-способных оксидов азота и снижением селективности процесса по азотной кислоте (например, при 190 °C селективность образования оксидов азота (S_{NO}) превышала 7%). Оптимальной температурой реакции газофазного нитрования бензола оказался диапазон 160...170 °C (рис. 4).





Уменьшение скорости подачи субстратов (WHSV, $\Gamma/(\Gamma_{\kappa ar}, \Psi))$ (и соответственно увеличение времени контакта) приводит к повышению конверсии и выхода целевого продукта, однако производительность катализатора по нитробензолу (STY_{NB}, г продукта/г катализатора в час) при этом снижается. Предельно допустимый суммарный поток pearentroв WHSV_B + WHSV_{NA} зависит от текстурных характеристик используемых каталитических систем и может быть оценен исходя из значений предельной сорбции бензола используемым катализатором. Оптимальными, с точки зрения производительности катализаторов, значениями WHSV_в для испытанных систем 20 мас.% MoO_3/SiO_2 ($S_{yg} = 178 \text{ м}^2/\text{г}$) и 20 мас.% Nf/SiO₂ (S_{уд} = 156 м²/г) были 1,57 и 1,42 г/($\Gamma_{\kappa a \tau} \cdot ч$) соответственно (при соотношении потоков WHSV_B: WHSV_{NA} = 1 : 0.76). При превышении этих потоков конверсия бензола существенно снижалась. В оптимальных условиях после 5 часов реакции производительность (STY) для 20 мас.% MoO₃/SiO₂ и 20 мас.% Nf/SiO₂ составляла 1,51 и 1,29 г_{NB}/(г_{кат} · ч). При превышении этих значений на поверхности катализаторов, предположительно, образуется пленка бензола, блокирующая активные центры, что приводит к снижению конверсии.

Процесс газофазного нитрования предпочтительно проводить при избытке бензола. Это обусловлено двумя факторами: во-первых, повышение потока бензола способствует увеличению элюирующей силы потока, что необходимо для удаления продуктов реакции с поверхности катализатора. Во-вторых, для масштабирования процесса нитрования принципиальное значение имеет наиболее полное превращение азотной кислоты, при ее минимальной степени разложения. Это обусловлено необходимостью стадии концентрирования сырого нитробензола (отгонка не прореагировавшего бензола). Накапливаемая в этом случае примесь азотной кислоты (из-за частичной растворимости HNO₃ в нитробензоле) повышает риск взрывоопасности процесса.

Наиболее эффективное молярное соотношение «азотная кислота : бензол» = 0,7...0,8 для всех испытанных каталитических систем. Повышение соотношения приводило к существенному увеличению вклада окислительного процесса и снижению селективности процесса нитрования (например, в случае соотношения «азотная кислота : бензол» = 1 образовывалось до 800 ррт нитрофенолов и регистрировалась высокая степень разложения азотной кислоты до оксидов азота). Дополнительный поток инертного газа также необходим для облегчения десорбции продуктов реакции, которые блокируют активные центры катализатора. При снижении скорости тока инертного газа существенно сокращается время стабильной работы катализатора из-за блокирования активных центров продуктами реакции (рис. 5).



Puc. 5 – Влияние тока инертного газа на конверсию бензола *Fig.* 5 – Influence of inert flow on benzene conversion

При подборе реакционных условий жидкофазного нитрования ароматических соединений показана необходимость использования концентрированной азотной кислоты и проведения реакции в условиях азеотропной отгонки выделяющейся в ходе реакции нитрования воды. Для этого в реакционную смесь добавляется двухлористый растворитель (хлористый метилен (DCM) или 1,2-дихлорэтан (DCE)). Вода отгоняется в виде паров состава ~4 об.% H₂O в дихлорэтане (температура кипения 73 °C), таким образом, концентрация азотной кислоты в реакционной смеси поддерживалась близкой к концентрированной. При выдерживании смеси DCE-H₂O в верхней части насадки Дина–Старка водный слой отделяется (верхний слой) и органический растворитель может быть возвращен в реакционную смесь. Для всех испытанных образцов реакция полностью протекала за 6 ч (достигалась максимальная величина конверсии исходного субстрата). При проведении рецикла нитрования на использованном катализаторе существенной дезактивации для испытанных образцов не найдено. При снижении температуры ниже 70 °С и использовании разбавленной азотной кислоты скорость нитрования быстро снижалась.

Высокая активность систем на основе оксида молибдена обусловлена суперкислотными свойствами нанодиспергированного MoO₃ на поверхности оксидного носителя. Этого удается достичь при совместном осаждении молибдена и кремния в виде аморфных гидроксидных форм с последующим прокаливанием полученного предшественника (золь-гель метод синтеза MoO₃/SiO₂). Другая перспективная в газофазном нитровании система состоит из сульфатированного полимера, нанесенного на поверхность носителя, устойчивого в среде азотной кислоты. СФП (Нафиона, Nf) представляет собой сополимер тетрафторэтилена и перфтористого соединения. Чистый СФП не применим в кислотном катализе изза малой величины удельной поверхности. Кроме того, основная масса сульфогрупп экранирована слоями полимера и недоступна для катализа. Использование Нафиона в катализе в виде его композитов Нафион/носитель позволяет улучшить текстурные характеристики катализатора и повысить доступность сульфогрупп.

Данные каталитической активности синтезированных образцов представлены в таблице (T = 160 °C, WHSV_B = 1,42 г/(г_{кат}·ч), NA/B = 0,76). Наблюдалась прямая зависимость между кислотностью образцов и их каталитической зависимостью. Была отмечена пониженная стабильность образцов на основе оксида алюминия и углеродных нановолокон, в этом случае происходит постепенное растворение и окисление носителей, соответственно. Анализ реакционных смесей газофазного нитрования осуществлялся как по плотности, так и газохроматографически. Отклонение между двумя методами не превышало 3 % (для выхода нитробензола). При проведении рецикла нитрования на использованном катализаторе существенной дезактивации для испытанных образцов не найдено.

Каталитическая активность и физико-химические свойства молибден-оксидных систем и композитов на основе сульфатированного перфторполимера

Образец, метод приготовления	Катал	итическая С _В (%	ФХ-свойства		
	ГФ-нитрование		ЖФ-нитрование	Кислотность по	
	0—1 ч	4–5 ч	(после 6 ч)	ЭПР, 1/г·10 ¹⁶	З _{уд} , м /1
MoO ₃ /SiO ₂ , sg	96	96	99	31	178
MoO ₃ /SiO ₂ , wi	81	80	69	16	198
MoO ₃ /Al ₂ O ₃ , sg	95	85	67	68	174
MoO ₃ /Al ₂ O ₃ , wi	97	82	71	150	210
Nf/YHB, wi	85	83	90	9	169
Nf/SiO ₂ , sg	91	91	94	11	156
Nf/SiO ₂ , wi	84	84	87	9	140

The catalytic activity and physicochemical characteristics of molybdenum-oxide systems and composites based on sulfated perfluoropolymer

Заключение

В ходе выполненной работы разработана методика анализа реакционных смесей по плотности органической фазы. Подобраны оптимальные реакционные условия газофазного нитрования бензола азеотропным раствором азотной кислоты (160 °C, соотношение «азотная кислота : бензол» = 0,76, ток инертного газа 40 мл/мин). Синтезированы и протестированы в идентичных условиях нитрования каталитические системы MoO_3/SiO_2 , MoO_3/Al_2O_3 и композиты Нафион/носитель. Установлено, что наиболее эффективной системой каталитического нитрования бензола из синтезированных является композит MoO_3/SiO_2 приготовленный осаждением тетраэтоксисилана в растворе в сульфатированного полимера.

ЛИТЕРАТУРА

- Грейш А.А. Нитрование ароматических углеводородов на гетерогенных катализаторах // Российский химический журнал. – 2004. – Т. 48, № 6. – С. 92–104.
- 2. Жилин В.Ф., Збарский В.Л. Синтез и технология нитропроизводных бензола и толуола // Российский химический журнал. – 2006. – Т. 50, № 3. – С. 104–115.
- Olah G.A., Malhotra R., Narang S.C. Nitration: methods and mechanism. New York: VCH, 1989. – 330 p.
- 4. Кустов Л.М., Белецкая И.П. «Green Chemistry» новое мышление // Российский химический журнал. – 2004. – Т. 48, № 6. – С. 3–12.
- Bertea J.E., Kouwenhoven H.W., Prins R. Vapour-phase nitration of benzene over modified mordenite catalysts // Applied Catalysis A. – 1995. – Vol. 129. – P. 229–250.
- Vapor phase nitration of benzene over solid acid catalysts II. Nitration with nitric acid (1); montmorillonite and mixed metal oxide catalysts / H. Sato, K. Hirose, K. Nagai, H. Yoshioka, Y. Nagaoka // Applied Catalysis A. – 1998. – Vol. 175. – P. 201–207.
- Brei V.V., Prudius S.V., Melezhyk O.V. Vapour-phase nitration of benzene over superacid WO₃/ZrO₂ catalysts // Applied Catalysis A. – 2003. – Vol. 239. – P. 11–16.
- Vapor phase nitration of benzene using mesoporous MoO₃/SiO₂ solid acid catalyst / S.B. Umbarkar, A.V. Biradar, S.M. Mathew, S.B. Shelke, K.M. Malshe, P.T. Patil, S.P. Dagade, S.P. Niphadkar, M.K. Dongare // Green Chemistry. – 2006. – Vol. 8. – P. 488–493.
- 9. Zhou P., Wang X.P., Cai T.X. Durable catalyst for vapor phase nitration of benzene with nitric acid // Chinese Chemical Letters. 2002. Vol. 13. P. 1013–1016.
- Vapor-phase nitration of benzene to nitrobenzene over supported sulfuric acid catalyst / J.J. Chen, W.G. Cheng, H.F. Liu, Q.S. Lin, L.H. Lu // Chinese Chemical Letters. - 2002. -Vol. 13. - P. 311-314.
- Kozlova O.V., Bazanov A.G., Zubritskaya N.G. Formation of nitrophenols during gasphase nitration of benzene over solid catalysts // Russian Journal of Organic Chemistry. – 2010. – Vol. 46. – P. 1095–1096.
- Sulfated perfluoropolymer-CNF composite as a gas-phase benzene nitration catalyst / A.P. Koskin, R.M. Kenzhin, A.A. Vedyagin, I.V. Mishakov // Catalysis Communications. – 2014. – Vol. 53. – P. 83–86.
- Влияние условий получения на наноструктурированные особенности перфторированных протонпроводящих мембран типа Nafion® / Ю.В. Кульвелис, В.Т. Лебедев, В.А. Трунов, О.Н. Примаченко, С.Я. Хайкин, Д. Торок, С.С. Иванчев // Мембраны и мембранные технологии. 2012. Т. 2, № 3. С. 179–185.
- Characterization of the active sites on the surface of Al₂O₃ ethanol dehydration catalysts by EPR using spin probes / R.A. Zotov, V.V. Molchanov, A.M. Volodin, A.F. Bedilo // Journal of Catalysis. – 2011. – Vol. 278. – P. 71–77.
- 15. Riddick A., Bunger W.B., Sakano T.K. Physical properties and methods of purification organic solvents. New York: Wiley, 1986. 904 p.

DEVELOPMENT OF A CATALYST STUDY METHOD FOR HETEROGENEOUS AROMATIC COMPOUND NITRATION

Koskin A.P.¹, Tolstikhina D.V.²

¹Borescov Institute of Catalysis, SB RASNovosibirsk, Russia ²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In industry the benzene nitration process is carried out in a liquid phase in the presence of environmentally unfriendly sulfuric acid (synthesis of nitrobenzene is more than 2.5 million tons per year). Sulfuric acid replacement by a heterogeneous acid catalyst is an environmentally safe alternative. The present article is devoted to the development of a heterogeneous nitration catalyst test method which includes the reaction mixtures analysis method.

In the present study we found optimum reaction conditions of gas-phase benzene nitration by an azeotropic nitric acid solution (160°C, nitric acid: benzene ratio = 0.7 - 0.8, inert gas flow is 40 ml/min). The method of reaction mixture analysis based on organic phase density measurements was developed. The proposed technique allows screening of the catalytic activity in a num-

ber of solid acid systems required for the selection of the most effective catalyst in heterogeneous catalytic nitration. Equations showing the dependence of a mole nitrobenzene fraction (benzene conversion) on density were derived. Molybdenum-oxide systems (of MoO₃/support) and composites based on sulfated perfluoropolymer (Nafion/support) were synthesized and investigated in the reaction of heterogeneous catalytic nitration of benzene in order to test the method on actual reaction mixtures.

Keywords: Green chemistry, gas-phase nitration; heterogeneous nitration; acid catalysis; aromatics nitration.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-22-32

REFERENCES

- 1. Greish A.A. Nitrovanie aromaticheskikh uglevodorodov na geterogennykh katalizatorakh [Nitration of aromatic hydrocarbons over heterogeneous catalysts]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal Russian Journal of General Chemistry*, 2004, vol. 48, no. 6, pp. 92–104. (In Russian)
- 2. Zhilin V.F., Zbarskii V.L. Sintez i tekhnologiya nitroproizvodnykh benzola i toluola [The synthesis and technology of nitrobenzene and nitrotoluene]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal Russian Journal of General Chemistry*, 2006, vol. 50, no. 3, pp. 104–115. (In Russian)
- Olah G.A., Malhotra R., Narang S.C. Nitration: methods and mechanism. New York, VCH, 1989. 330 p.
- Kustov L.M., Beletskaya I.P. "Green Chemistry" novoe myshlenie ["Green Hemistry" a new way of thinking]. Rossiiskii khimicheskii zhurnal – Russian Journal of General Chemistry, 2004, vol. 48, no. 6, pp. 3–12. (In Russian)
- Bertea J.E., Kouwenhoven H.W., Prins R. Vapour-phase nitration of benzene over modified mordenite catalysts. *Applied Catalysis A*, 1995, vol. 129, pp. 229–250.
- Sato H., Hirose K., Nagai K., Yoshioka H., Nagaoka Y. Vapor phase nitration of benzene over solid acid catalysts II. Nitration with nitric acid (1); montmorillonite and mixed metal oxide catalysts. *Applied Catalysis A*, 1998, vol. 175, pp. 201–207.
- Brei V.V., Prudius S.V., Melezhyk O.V.Vapour-phase nitration of benzene over superacid WO3/ZrO2 catalysts. *Applied Catalysis A*, 2003, vol. 239, pp. 11–16.
- Umbarkar S.B., Biradar A.V., Mathew S.M., Shelke S.B., Malshe K.M., Patil P.T., Dagade S.P., Niphadkar S.P., Dongare M.K. Vapor phase nitration of benzene using mesoporous MoO₃/SiO₂ solid acid catalyst. *Green Chemistry*, 2006, vol. 8, pp. 488–493.
- 9. Zhou P., Wang X.P., Cai T.X. Durable catalyst for vapor phase nitration of benzene with nitric acid. *Chinese Chemical Letters*, 2002, vol. 13, pp. 1013–1016.
- Chen J.J., Cheng W.G., Liu H.F., Lin Q.S., Lu L.H. Vapor-phase nitration of benzene to nitrobenzene over supported sulfuric acid catalyst. *Chinese Chemical Letters*, 2002, vol. 13, pp. 311–314.
- Kozlova O.V., Bazanov A.G., Zubritskaya N.G. Formation of nitrophenols in the gas-phase nitration of benzene over solid catalysts. *Russian Journal of Organic Chemistry*, 2010, vol. 46, pp. 1095–1096. Translated from *Zhurnal organicheskoi khimii*, 2010, vol. 46, pp. 1094–1095.
- Koskin A.P., Kenzhin R.M., Vedyagin A.A., Mishakov I.V. Sulfated perfluoropolymer–CNF composite as a gas-phase benzene nitration catalyst. *Catalysis Communications*, 2014, vol. 53, pp. 83–86.
- Kul'velis Yu.V., Lebedev V.T., Trunov V.A., Primachenko O.N., Khaikin S.Ya., Torok D., Ivanchev S.S. Vliyanie uslovii polucheniya na nanostrukturirovannye osobennosti perftorirovannykh protonprovodyashchikh membran tipa Nafion [Effect of preparation conditions on nanostructural features of the Nafion® type perfluorinated proton conducting membranes]. *Membrany i membrannye tekhnologii – Petroleum Chemistry*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 179– 185. (In Russian)
- Zotov R.A., Molchanov V.V., Volodin A.M., Bedilo A.F. Characterization of the active sites on the surface of Al₂O₃ ethanol dehydration catalysts by EPR using spin probes. *Journal of Catalysis*, 2011, vol. 278, pp. 71–77.
- 15. Riddick A., Bunger W.B., Sakano T.K. *Physical properties and methods of purification organic solvents*. New York, Wiley, 1986. 904 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Коскин Антон Павлович – родился в 1980 году, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории исследования наноструктурированных катализаторов и сорбентов Института катализа СО РАН. Область научных интересов: твердые кислоты, гетерогенный катализ, нитрование ароматических соединений, тонкий органический синтез. Опубликовано 23 научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5. Email: koskin@catalysis.ru).

Koskin Anton Pavlovich (b. 1980) – Candidate of Science (Eng.), researcher, LNCSR department, Borescov Institute of Catalysis. His research interests are currently focused on solid acids, heterogeneous catalysis, aromatics nitration, and fine organic synthesis. He is the author of 23 scientific papers. (Address: 5, Acad. Lavrentiev Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russia. Email: koskin@catalysis.ru).



Толстихина Дарья Владимировна – родилась в 1994 году, студентка Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: твердые кислоты, гетерогенный катализ, нитрование ароматических соединений. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: daradasha@mail.ru).

Tolstikhina Daria Vladimirovna (b. 1994) – student of Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on solid acids, heterogeneous catalysis, aromatics nitration. (Address: 5, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: daradasha@mail.ru).

Статья поступила 03 июня 2016 г. Received June 03, 2016

To Reference:

Koskin A.P. Razrabotka metoda issledovaniya katalizatorov dlya geterogennogo nitrovaniya aromaticheskikh soedinenii [Development of a method for the heterogeneous aromatic compounds nitration catalysts study]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 22–32. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-22-32

2016

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

июль-сентябрь

УДК 621.331

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ГОРЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Е.Ю. Абрамов

Новосибирский государственный технический университет

Существующая система городского электротранспортного комплекса г. Новосибирска функционирует в условиях низких показателей пассажироперевозок, что обусловливает отклонение рабочих параметров тягового оборудования подстанций от проектных значений. Вместе с этим избыточный износ электротранспортной инфраструктуры определяет повышенные технологические расходы энергии. В рамках повышения энергоэффективности горэлектротранспорта поставлена задача экспериментальной оценки нормируемых показателей электроэнергии и ненормируемых энергетических характеристик действующих тяговых подстанций.

Для решения задач исследования выполнены продолжительные натурные измерения параметров электроэнергии на базе регистратора FLUKE 1760 по стороне 10 кВ и разработанных автором регистраторов по стороне выпрямленного напряжения.

В результате анализа полученных данных вероятностно-статистическими методами установлен факт соответствия нормируемых медленных изменений параметров переменного напряжения допустимым значениям. Анализ энергетических характеристик выпрямительных агрегатов показал существенное отклонение от проектных номинальных значений, вследствие этого установлено снижение энергетической эффективности работы тягового оборудования и предложено применение организационных мероприятий по существенному улучшению энергетики преобразователей, не требующих материальных затрат.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, показатели качества электроэнергии, энергетические характеристики, энергоэффективность.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-33-42

Введение

Городской электрический транспорт (ГЭТ) является одним из наиболее важных и энергоемких потребителей городских агломераций. На ГЭТ в развитых странах приходится более 50 % пассажироперевозок [1]. Поэтому повышение эффективности функционирования и создание условий устойчивого развития систем ГЭТ является необходимым для обеспечения высоких темпов экономического роста и повышения качества жизни населения.

Статистика показывает непрерывное снижение объема пассажироперевозок ГЭТ. По данным мэрии г. Новосибирска величина пассажироперевозок, реализуемых трамваем и троллейбусом, снизилась к 2015 г. до 70 млн чел/год, т. е. более чем в 3 раза по сравнению с началом 1990-х годов, что определяет изменение условий функционирования инфраструктуры электроснабжения относительно проектных характеристик. Кроме этого, контактная сеть и оборудование тяговых подстанций (ТП) имеют избыточный износ, они не модернизировались с 1970-х годов. Сложившаяся ситуация обусловливает функционирование системы в условиях повышенных технологических расходов энергии и низких энергетических показателей [2].

Таким образом, существует необходимость совершенствования системы тягового электроснабжения ГЭТ, которая наряду с обостряющимися энергетическими

© 2016 Е.Ю. Абрамов

проблемами обусловливает потребность в реализации потенциала снижения энергетических и материальных затрат, внедрения высокотехнологичных энергоэффективных решений при модернизации существующих транспортных линий и реализации новых.

Задача улучшения энергетических параметров ГЭТ неразрывно связана с нормируемыми ГОСТ показателями качества электроэнергии, которые оказывают влияние на работу электротранспортного комплекса и всей системы электроснабжения. Кроме нормируемых показателей важное значение имеют ненормируемые характеристики электроснабжения. В связи со сказанным задачи выполненного исследования заключались в получении экспериментальных данных параметров электроснабжения Действующих ТП ГЭТ в реальных условиях и оценке их влияния на энергетическую эффективность эксплуатируемых технических средств.

1. Методы и средства исследования

Для решения поставленных задач в соответствии с [3] выполнен ряд натурных измерений на тяговых подстанциях МКП ГЭТ г. Новосибирска. Продолжительность измерений составила 7 суток для ТП № 29, 14 суток для ТП № 7 и ТП № 13. Объем выборок данных составил более 20 млн значений.

В качестве измерительного оборудования на стороне переменного тока ТП № 29 использовался регистратор качества электроэнергии FLUKE 1760. Датчики напряжения подключались ко вторичной обмотке штатного измерительного трансформатора напряжения НТМИ-10. Токовые датчики на базе катушек Роговского подключались непосредственно к вводным линиям 10 кВ преобразовательного трансформатора агрегата № 1. Подключение выполнено по методу двух ваттметров (так называемому Aron_2), при котором требуются датчики только на двух фазах, а для третьей значения вычисляются встроенным ПО.

Для измерений тока и напряжения на стороне выпрямленного напряжения всех трех подстанций использовались разработанные автором самопишущие регистраторы постоянных тока и напряжения на базе микроконтроллера ATMega_1760, датчиков напряжения на эффекте Холла LEM LV-25P, оптронных датчиков тока с компенсирующей обратной связью на ОУ. Измерение тока выполнено через штатные токовые шунты с падением напряжения 75 мВ при токе 2000 А, а напряжения – через штатные токоограничительные резисторы P103M (ГОСТ 8623–69) номиналом 133 кОм с классом точности 0,5.

Разработанные регистраторы обеспечили измерение напряжения в диапазоне 0...850 В, измерение тока в диапазоне 0...1000 А, оцифровку данных с чувствительностью АЦП 4,88 мВ, непрерывную запись на SD-карту в Excel-файл значений тока и напряжения по двум каналам со скоростью 4 выборки в секунду. Калибровка прибора выполнена с использованием цифрового осциллографа OWON_Smart DS6062 в качестве эталонного измерительного прибора.

В результате работы приборов получены временные зависимости следующих величин:

 напряжения и токи (мгновенные и действующие значения), активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности, частота, гармонический состав напряжения и некоторые другие на стороне 10 кВ;

2) ток и напряжение на стороне выпрямленного напряжения.

Исследуемые энергетические параметры являются случайными величинами, поэтому их анализ был основан на вероятностно-статистических методах. Наиболее полную характеристику случайных величин обеспечивают законы их распределения, поэтому для экспериментальных данных были определены вероятности возникновения конкретных значений и на основе 40 законов статистических распределений выполнен подбор наиболее подходящих выравнивающих функций и рассчитаны числовые характеристики.

2. Анализ нормируемых показателей качества электроэнергии

Качество электроэнергии определяется степенью искажения параметров напряжения из-за изменений нагрузки, кондуктивными электромагнитными помехами и другими внешними событиями. Отклонения от нормируемых значений обусловливает: рост потребления и потерь энергии; перегревы тяговой сети; нарушение работы релейных защит и автоматики; увеличение числа коротких замыканий; некорректную работу приборов учета и др. Поэтому оценка качества электроэнергии имеет важное значение при внедрении энергосберегающих мероприятий на ГЭТ. В качестве национального стандарта РФ действует ГОСТ 32144–2013 [4], который устанавливает нормы и показатели качества электроэнергии.

Основной интерес для исследования представляют продолжительные изменения характеристик напряжения, так как они в основном вызываются изменениями нагрузки и ее нелинейным влиянием. Внезапные и значительные изменения формы напряжения обусловлены непредсказуемыми событиями и внешними воздействиями и не имеют зависимости от характера тяговой нагрузки. На основе полученных экспериментальных данных на стороне 10 кВ агрегата № 1 ТП № 29 выполнена оценка продолжительных изменений характеристик напряжения. В качестве примера на рис. 1 представлены временные диаграммы некоторых характеристик. Результаты оценки отклонений характеристик напряжения от допустимых по ГОСТ 32144–2013 значений, выполненной с помощью специализированного ПО «РQ Analyze v.1.9.4» компании FLUKE, сведены в табл. 1 и 2.









a – frequency deviation; b – short-term and long-term flicker factors; c – voltage unbalance at zero and negative sequence

Таблица 1 / Table 1

Оценка показателей качества электроэнергии Evaluation of electricity quality characteristics

Показатели качества электроэнергии		Допустимые	Экспериментальная	
показатели каче	ства электроэнергии	значения	оценка	
Отклонение частоты		±0,2 Гц в 95 % времени и ±0,4 Гц в 100 % времени	+0,036/-0,046 Гц в 95 % времени и +0,047/–0,069 в 100 % времени	
Медленные изменения тельные и отрицательн ния)	н напряжения (положи- ные отклонения напряже-	Не более 10 % номинального в 100 % времени	Положительные до 4,73 %; Отрица- тельные до 0,77 %	
Доза фликера	кратковременная	Не более 1,38	До 10,15	
	длительная	Не более 1	До 4,43	
Гармонические со-	Коэффициент гармоник	До 11-й представлены в табл. 2		
ставляющие напря- жения (несинусои- дальность)	Суммарный коэффици- ент гармоник	5 % в 95 % вре- мени и 8 % в 100 % времени	До 1,95 % в 95 % вре- мени и 2,27 % в 100 % времени	
Коэффициенты несимметрии напря- жений	по обратной последова- тельности по нулевой последова- тельности	2 % в 95 % вре- мени и 4 % в 100 % времени	0,4 % в 95 % времени и 0,43 % в 100 % вре- мени	

Таблииа 2 / Table 2

Оценка гармонических составляющих напряжения в десятиминутных интервалах Evaluation of voltage harmonic components at 10 min intervals

No populo	Допустимые значения, %		Экспериментальная оценка, %						
л⁰ гармо-	В течение	В течение	В течение 95 % вре- В теч				чение 10	00 %	
ники	95 % време-	100% вре-	мени			времени			
напряжения	НИ	мени	L1L2	L2L3	L3L1	L1L2	L2L3	L3L1	
2	1,5	2,25	0,1			0,	0,14		
3	3	4,5	0,38	0,25	0,22	0,43	0,31	0,26	
4	0,7	1,05	0,08	0,07	0,09	0,11	0,09	0,1	
5	4	6	1,87	1,74	1,84	2,21	2,08	2,17	
6	0,3	0,45	0,02		0,03	0,02	0,03		
7	3	4,5	0,81	0,80	0,81	1,03	0,99	1,03	
8	0,3	0,45	0,04		0,04			0,06	
9	1	1,5	0,06	0,05	0,07	0,09	0,07	0,09	
10	0,3	0,45	0,04 0,05		0,45 0,04 0,05 0,06		0,06		
11	2	3	0,42	0,41	0,42	0,59	0,56	0,54	

Из временных диаграмм видно, что отрицательные отклонения напряжения, появление фликера, всплески гармонических искажений носят редкий и кратковременный характер. При анализе осциллограмм напряжения и тока в интервалах появления этих явлений установлено, что они обусловлены событиями со стороны внешнего электроснабжения, а не влиянием тяговой нагрузки (медленное изменение тока свидетельствует о первичном влиянии напряжения, но не наоборот). В качестве подтверждения этого на рис. 2, *а* представлены статистические функции максимальных значений коэффициента гармоник в десятиминутных интервалах.




а – максимальных значений суммарного коэффициента гармоник; б – суммарного коэффициента гармоник; в – значений частоты; г – положительных отклонений напряжения; д – несимметрии напряжения по обратной последовательности; е – несимметрии напряжения по нулевой последовательности



Полученные функции (см. рис. 2, *b–f*) и числовые характеристики статистических распределений медленных отклонений напряжения на стороне 10 кВ показывают, что рассмотренные показатели находятся в пределах нормально допустимых значений, а вероятность выхода за эти пределы стремится к нулю.

Таким образом, в рамках выполненного эксперимента можно сделать важный вывод, что искажения характеристик электроэнергии, установленных ГОСТ 32144–2013, не оказывают существенного влияния на работу электротранспортного комплекса, следовательно, применение мероприятий по улучшению данных показателей для повышения энергетической эффективности ГЭТ не принесет сколько-нибудь ощутимый эффект.

3. Оценка энергетических характеристик тяговых подстанций

Основной энергетической характеристикой выпрямительного агрегата ТП является зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока, наклон которой определяется потерями напряжения в трансформаторе, линиях электропередач и диодах выпрямителя. Внешняя характеристика, полученная при выводе из работы всех агрегатов кроме агрегата № 1 ТП № 29, приведена на рис. 3, *a*.



Рис. 3 – Внешняя характеристика агрегата № 1 ТП № 29 (*a*); статистические функции плотности вероятности напряжения ТП № 29 (*б*), ТП № 13 (*в*), ТП № 7 (*г*)

Fig. 3 – External characteristic of the first unit TSS No 29 (*a*); statistical function of probability density of the TSS No 29 DC voltage (*b*), TSS No 13 DC voltage (*c*), TSS No 7 DC voltage (*d*)

Уровни напряжения на шинах ТП и токоприемниках ЭПС ГЭТ установлены ГОСТ 6962–75 [5] (переиздание 1996 г., действующее) и ГОСТ 29322–2014 [6], в соответствии с этими стандартами номинальное напряжение на шинах ТП трамвая и троллейбуса должно составлять 600 В, наибольшее допускаемое значение при любых эксплуатационных условиях, за исключением коммутационных режимов, не должно превышать 700 В. Вероятностно-статистическая оценка уровней выпрямленного напряжения, выполненная на основе усредненных в интервале 10 с суточных графиков, представлена на рис. 3, *в*–*г*. Как видно наиболее вероятны условия работы подстанций, при которых напряжение составляет 635...700 В, а наибольшие значения достигают 700...800 В, что является превышением допустимого предела. Это говорит о том, что функционирование системы электротранспортного комплекса осуществляется в условиях низкой загрузки установленной мощности оборудования подстанций.

Используя данные с регистратора FLUKE_1760 на стороне 10 кВ и с разработанного регистратора на стороне выпрямленного напряжения, получены зависимости КПД преобразовательного агрегата и коэффициента мощности от тока нагрузки для ТП № 29. Эти зависимости, а также функции статистического распределения тока нагрузки подстанций приведены на рис. 4.



Рис. 4 – Зависимость КПД агрегата № 1 ТП № 29 от нагрузки (а); зависимость коэффициента мощности от нагрузки (б); функции статистического распределения тока нагрузки ТП № 7 (в) и ТП № 29 (г)

Fig. 4 – Unit No 1 (TSS No 29) load characteristic of the efficiency (*a*) and load characteristic of the power factor (*b*); statistical function of probability density of the TSS No 7 load current (*c*) and TSS No 13 load current (*d*)

Полученные характеристики подтверждают, что подстанции работают в области низких нагрузок относительно установленной мощности с редким достижением номинального режима работы оборудования подстанций. Кроме этого, очевидно снижение энергетических показателей относительно номинальных значений, наиболее вероятным токам нагрузки соответствуют величины КПД порядка 96 % и коэффициента мощности порядка 0,92. При том, что в номинальном режиме их значения будут смещены к 97,6 % и 0,95 соответственно, а работа будет осуществляться не в вертикальной части характеристик, а преимущественно в горизонтальной.

4. Заключение

В работе представлены результаты проведенных экспериментальных измерений на действующих тяговых подстанциях МКП ГЭТ г. Новосибирска с использованием регистратора показателей качества электроэнергии FLUKE 1760 и разработанных автором регистраторов постоянных тока и напряжения. Получено более 20 млн значений данных, на основе которых выполнено исследование нормируемых и ненормируемых показателей электроснабжения.

Вероятностно-статистическая обработка данных показала, что медленные изменения параметров напряжения, установленные ГОСТ 32144–2013, находятся в нормально допустимых пределах и не оказывают существенного влияния на работу ГЭТ, поэтому применение мероприятий по их улучшению нецелесообразно ввиду низкого эффекта.

Получены статистические функции плотности вероятности значений выпрямленного напряжения по трем ТП, которые показали завышение наиболее вероятного уровня напряжения до 200 В относительно номинальных 600 В, а также превышение предельно допустимого по ГОСТ 6962–75 на 100 В. Сделан вывод о низкой величине токов тяговых нагрузок подстанций, который был подтвержден полученными статистическими функциями этих токов. Действительно, наблюдается занижение нагрузки вплоть до 70 % от номинальной, что обусловливает работу выпрямительных агрегатов с заниженными значениями ненормируемых энергетических характеристик.

На основе полученных результатов можно заключить, что при обеспечении соответствия количества введенных в работу выпрямительных агрегатов величине действующей в системе тяговой нагрузки возможно повышение энергетической эффективности всего электротранспортного комплекса за счет снижения технологических расходов на преобразование электроэнергии. Достоинством данного мероприятия при неавтоматическом управлении является отсутствие необходимости в каких-либо материальных затратах. С другой стороны, реализация автоматического регулирования способна обеспечить адаптивное управление в зависимости от величины нагрузки, в этом случае полученные энергетические характеристики могут быть использованы для выбора уставок регулирования мощности. С учетом числовых характеристик полученных распределений токов тяговой нагрузки можно ожидать снижения потерь в тяговых агрегатах подстанций до 20 % в зависимости от параметров графиков нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

- Бюллетень социально-экономического кризиса в России. № 7. Активность населения в использовании транспортных услуг [Электронный ресурс] / Л. Григорьев, А. Голяшев, Е. Буряк, А. Лобанова, В. Кульпина; Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – М., 2015. – 22 с. – URL: http://ac.gov.ru/files/publication/a/7059.pdf (дата обращения: 11.10.2016).
- Энергосберегающие режимы работы выпрямительных агрегатов подстанций электрического транспорта / В.И. Сопов, В.В. Бирюков, С.А. Евдокимов, А.А. Помазная, Ю.В. Аверина // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 4. – С. 39–43.
- ГОСТ Р 51317.4.30–2008. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – Введ. 2010–01–01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 54 с.
- ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

5. ГОСТ 6962–75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. – Взамен ГОСТ 6962–54. – Введ. 1977–01–01. – Переизд. (март 1996 г.) с Изм. № 1. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 7 с.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ENERGY PARAMETERS OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT TRACTION SUBSTATIONS

Abramov E.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The current urban electric transport system in Novosibirsk operates under conditions of a low passenger carriage rate, which causes a divergence of traction substation equipment performance from design values. At the same time, an excessive wear of the electric transport infrastructure results in an increase in energy consumption. To enhance the system energy efficiency the task was set to experimentally evaluate rated parameters of electric energy and non-standardized energy characteristics of the existing traction substations.

To solve these problems it is necessary to carry out long-term experimental measurements of electric parameters based on the FLUKE 1760 power quality recorder at the 10 kV-side and the recorders at the rectified voltage side developed by the author.

The data probabilistic-statistical analysis showed the agreement between the rated slow changes of alternating voltage characteristics and admissible values. The analysis of the rectifier unit energy characteristics revealed a significant divergence from the design rated values. As a result, it was elucidated that the energy performance of the traction equipment decreased. Consequently, the author suggests implementing measures to improve the quality of converter energy characteristics at low costs.

Keywords: urban electric transport;, traction power supply system; traction substation; electric energy quality indicators; energy characteristics; energy efficiency.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-33-42

REFERENCES

- Grigor'ev L., Golyashev A., Buryak E., Lobanova A., Kul'pina V. Byulleten' sotsial'noekonomicheskogo krizisa v Rossii. N 7. Aktivnost' naseleniya v ispol'zovanii transportnykh uslug [Bulletin of the socio-economic crisis in Russia. N 7. Population active in use of transport services]. Analytical Center for the Government of the Russian Federation. Moscow, 2015, 22 p. Available at: http://ac.gov.ru/files/publication/a/7059.pdf (accessed 11.10.2016)
- Sopov V.I., Birukov V.V., Evdokimov S.A., Pomaznaya A.A., Averina Yu.V. Energosberegayushchie rezhimy raboty vypryamitel'nykh agregatov podstantsii elektricheskogo transporta [Energy-saving modes of traction rectifier units of electric transport substations]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: Science, Technology, Management*, 2010, no. 4, pp. 39–43.
- GOST R 51317.4.30–2008. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmerenii pokazatelei kachestva elektricheskoi energii [State Standart 51317.4.30–2008. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electric energy quality indices measurement methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 54 p.
- 4. GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [State Standard 32144–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p.
- GOST 6962–75. Transport elektrifitsirovannyi s pitaniem ot kontaktnoi seti. Ryad napryazhenii [State Standard 6962–75. Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1996. 7 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Абрамов Евгений Юрьевич – родился в 1985 году, аспирант, ассистент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: энергосбережение и энергоэффективность, электротранспортные системы, возобновляемые источники энергии, комбинированные системы электроснабжения. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, РФ, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: e.abramov@corp.nstu.ru).

Abramov Evgeniy Yrievich – born in 1985, a postgraduate student, assistant at the electrotechnical systems department of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy saving and efficiency, electric transport systems, renewable energy sources, and combined power supply systems. He is the author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: e.abramov@corp.nstu.ru).

Статья поступила 28 августа 2016 г. Received August 28, 2016

To Reference:

Abramov E.Yu. Eksperimental'noe issledovanie energeticheskikh parametrov tyagovykh podstantsii gorelektrotransporta [Experimental investigation of energy parameters of urban electric transport traction substations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 33–42. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-33-42

2016

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

№ 3(32

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

июль-сентябрь

УДК 621.39:519.2

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ КОНЕЧНОЗНАЧНАЯ ГИББСОВСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ТЕКСТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.Н. Васюков, А.Ю. Зайцева

Новосибирский государственный технический университет

Предлагается подход к решению задачи сегментации текстурных изображений, основанный на применении иерархической конечнозначной гиббсовской модели. Ненаблюдаемый уровень иерархической модели, называемый текстурной картой, представляется в виде реализации случайного поля с гиббсовским распределением вероятностей; назначение текстурной карты – локализация границ между областями наблюдаемого изображения, текстурные параметры которых в пределах границ постоянны, но различаются для разных областей. Итерационная процедура стохастической релаксации, использующая локальные характеристики апостериорного распределения текстурной карты, служит генератором ее реализаций, которые сходятся к истинной карте текстур, что и дает решение задачи сегментации, оптимальное по критерию максимума апостериорной вероятности (МАВ). Таким образом, сегментация сводится к задаче нахождения наиболее вероятной текстурной карты, совместимой с наблюдаемым изображением. Гиббсовское описание полутоновых изображений, используемых в качестве наблюдаемого уровня, чрезвычайно громоздко. Работа посвящена поиску эффективного способа преобразования текстурного изображения в бинарный препарат, сохраняющий характерные свойства текстур. Использование бинарного препарата текстуры вместо исходного полутонового изображения целесообразно с точки зрения снижения вычислительных затрат, а также обеспечения простоты построения иерархической гиббсовской модели. Для получения бинарного препарата текстуры, сохраняющего текстурные характеристики исходного изображения, предлагается использование процедуры выделения контурных линий на изображениях, а также вейвлет-разложения полутонового изображения с последующей бинаризацией коэффициентов детализации. Нахождение и включение в иерархическую модель уровней, эффективно отражающих текстурную информацию различного рода, являются основной задачей исследования. Перспективность предложенного подхода на основе наращивания количества наблюдаемых слоев иерархической модели, каждый из которых представляет собой бинарный препарат текстуры, подтверждается высоким качеством результатов сегментации реальных текстурных изображений.

Ключевые слова: сегментация текстурных изображений, распределение Гиббса, иерархическая модель, стохастическая релаксация, бинарный препарат текстуры, операторы выделения границ, вейвлет-разложение.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-43-53

Введение

Один из известных подходов к описанию и анализу текстур основан на представлении текстурного изображения в виде реализации случайного поля с гиббсовским распределением вероятностей [1, 2]. Согласно теореме эквивалентности Хэммерсли–Клиффорда гиббсовские случайные поля (ГСП) обладают марковским свойством, что обеспечивает возможность моделирования и анализа текстур на основе их локальных характеристик (условных вероятностей значений поля в точке при заданной конфигурации поля в ее окрестности), совокупность которых

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-37-00151.

^{© 2016} В.Н. Васюков, А.Ю. Зайцева

полностью определяет гиббсовское поле [3]. Алгоритмы генерирования и обработки гиббсовских случайных полей основываются на итерационных методах стохастической релаксации (динамических методах Монте-Карло) [4, 5]. Для решения задачи текстурной сегментации строится иерархическая модель, включающая, помимо наблюдаемого текстурного изображения, скрытое (ненаблюдаемое) изображение поля меток (текстурную карту), при этом апостериорное распределение карты при условии наблюдения текстурного изображения имеет вид распределения Гиббса. Процедура стохастической релаксации, использующая локальные характеристики этого апостериорного распределения, служит генератором реализаций скрытого поля, которые при определенных условиях [5] сходятся к истинной карте текстур, что и дает решение задачи сегментации [1], оптимальное по критерию максимума апостериорной вероятности (MAB). Таким образом, сегментация сводится к генерированию наиболее вероятной реализации текстурной карты, совместимой с наблюдаемым текстурным изображением.

Непосредственное использование текстурного изображения в качестве наблюдаемого уровня иерархической модели требует больших объемов памяти и вычислительных ресурсов, так как гиббсовское описание цифрового полутонового изображения с 256 уровнями яркости слишком громоздко. С целью снижения вычислительных затрат, а также обеспечения простоты построения иерархической модели целесообразным представляется использование в качестве наблюдаемого уровня вместо исходного полутонового текстурного изображения его бинарного препарата. Сложность заключается в нахождении эффективного способа получения бинарного препарата, сохраняющего текстурные свойства исходного изображения. Одним из таких способов является выделение контурных линий [6]. В настоящей работе проводится сравнение эффективности и качества сегментации изображений на основе контурных препаратов, полученных с использованием различных операторов выделения контуров. Кроме того, рассматривается возможность применения вейвлет-разложения [7] исходных полутоновых текстурных изображений и использования бинаризованных детализирующих коэффициентов в качестве наблюдаемых уровней иерархической модели для текстурной сегментации.

1. Текстурная сегментация на основе иерархической конечнозначной гиббсовской модели

Для построения иерархической гиббсовской модели текстурного изображения сначала задается распределение Гиббса ненаблюдаемого поля (текстурной карты), описывающего разбиение изображения на однородные непересекающиеся области. Затем для каждой области определяется распределение Гиббса, описывающее текстуру в ее пределах. Совокупность текстурных областей образует наблюдаемое изображение. Иерархическая модель представляет собой совместное распределение наблюдаемого и ненаблюдаемого полей. С помощью этой модели осуществляются генерирование и сегментация текстурных изображений на основе стохастической релаксации [5]. При генерировании вначале порождается карта, а затем соответствующее ей текстурное изображение. При сегментации на основе наблюдаемого изображения генерируется поле, близкое к карте (в идеале совпадающее с ней). Для генерирования полей применяются алгоритмы Гиббса (*Gibbssampler*) и Метрополиса–Хастингса [8].

При построении конечнозначной гиббсовской модели текстурной карты формируется прямоугольная решетка $\mathbf{L}_M = \{(i, j) : 0 \le i < N_1; 0 \le j < N_2\}$ размерами $N_1 \times N_2$; случайное поле M представляет собой совокупность случайных величин $\{M_s\}, s \in \mathbf{L}_M$, принимающих значения из конечного множества

меток { $\mu_1, \mu_2, ..., \mu_K$ }. Задание распределения Гиббса предполагает определение на решетке системы клик. Кликой называется совокупность точек решетки, считающихся попарно соседними. Соседство означает наличие взаимодействия между точками, при этом соседние точки не обязательно должны быть геометрически соседними. Окрестностью точки *s* называется совокупность клик, содержащих *s*, за вычетом этой точки. Каждой клике приписывается функция значений поля в точках клики, называемая потенциалом. Модель текстурной карты является однородной [1] в том смысле, что множество С_M всех клик разбито на непересекаюциеся подмножества (семейства), каждое из которых образовано всевозможными сдвигами единственной клики в пределах решетки. При этом каждой клике *c* $\in \mathbb{C}_M$ одного семейства приписывается один и тот же потенциал V_c^M (·).

В простейшем случае, когда рассматривается изображение с двумя типами текстур, текстурную карту можно представить полем, принимающим значения из множества {-1, 1}. Все клики образованы парами точек, геометрически соседними

по вертикали или по горизонтали [9]. Потенциалы α_k^n вертикальных клик назна-

чаются в соответствии со схемой $\alpha_1^1 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \end{pmatrix}$, $\alpha_2^1 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\alpha_3^1 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$, $\alpha_4^1 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, потенциалы горизонтальных клик – согласно схеме $\alpha_1^2 \Leftrightarrow (-1 \ -1)$, $\alpha_2^2 \Leftrightarrow (-1 \ 1)$, $\alpha_3^2 \Leftrightarrow (1 \ -1)$, $\alpha_4^2 \Leftrightarrow (1 \ 1)$. Тогда окрестность произвольной внутренней (не принадлежащей границам решетки) точки поля *s* содержит четыре точки (окрестность фон Неймана [10]). При этом существует $2^4 = 16$ конфигураций (реализаций) бинарного поля на окрестности (рис. 1). Реализации текстурной карты и ее значения в точке *s* соответственно обозначаются *m* и *m_s*. Вероятность

$$P_M(M=m) = Z_M^{-1} \exp\left\{-\sum_{c \in \mathbb{C}_M} V_c^M(m)\right\},\tag{1}$$

где нормирующая константа $Z_M = \sum_{m \in \mathfrak{M}} \exp \left\{ -\sum_{c \in \mathbb{C}_M} V_c^M(m) \right\}$ определяется сумми-

рованием по множеству \mathfrak{M} всех возможных реализаций поля M.

реализации т поля карты М



Puc. 1 – Конфигурации бинарного поля на окрестности фон Неймана *Fig.* 1 – Configurations of a binary field on the von Neumann neighborhood

Модель наблюдаемого поля строится аналогично. Прямоугольной решетке $\mathbf{L}_T = \{(i, j) : 0 \le i < N_1; 0 \le j < N_2\}$ соответствует случайное поле T, принимающее значения из множества $\{-1, 1\}$. Эта модель неоднородна, так как потенциалы $V_c^T(t|m)$ клик из множества \mathbb{C}_T , которые образуют окрестность точки $s_T \in \mathbf{L}_T$, обусловлены значением текстурной карты в соответствующей точке $s_M \in \mathbf{L}_M$. Условное распределение наблюдаемого поля

$$P_{T|M}\left(T=t\left|M=m\right)=Z_{T|M}^{-1}\exp\left\{-\sum_{c\in\mathbb{C}_{T}}V_{c}^{T}\left(t\left|m\right)\right\}\right\},$$

где $Z_{T|M} = \sum_{t \in \mathfrak{A}} \exp \left\{ -\sum_{c \in \mathbb{C}_T} V_c^T(t \mid m) \right\}$ определяется суммированием по множе-

ству \mathfrak{A} всех возможных реализаций поля T при заданном поле M.

Задача сегментации может быть сформулирована как задача нахождения реализации карты, доставляющей максимум апостериорной вероятности, что эквивалентно максимизации совместного распределения, поскольку текстура при этом фиксирована:

$$P_{TM}(T = t, M = m) = Z_M^{-1} Z_{T|M}^{-1} \times \exp\left\{-\sum_{c \in \mathbb{C}_M} V_c^M(m) - \sum_{c \in \mathbb{C}_T} V_c^T(t|m)\right\}.$$
 (2)

Точное решение этой задачи крайне затруднено высокой размерностью и многомодовым характером целевой функции. Для приближенного решения применяется метод стохастической релаксации (моделируемого отжига) [1, 5], при этом в показатель экспоненты выражения (2) вводится множитель 1/T(t), где T(t)называется температурой и убывает с увеличением номера t итерации. Последовательности значений t соответствует последовательность распределений вида (2), при этом с понижением температуры происходит заострение мод распределений и обеспечивается сходимость реализаций к состоянию с максимальной вероятностью. Любая реализация, полученная по прошествии достаточного времени, может быть выбрана в качестве приближенного решения задачи сегментации. Теоретически оптимальный график T(t) понижения температуры [4] обеспечивает нахождение решения лишь при $t \rightarrow \infty$, в связи с этим актуальны проблемы поиска графика, обеспечивающего достаточно высокое качество сегментации при приемлемом количестве итераций, и определения времени окончания процедуры моделируемого отжига.

Потенциалы $V_c^T(t|m)$, входящие в (2) и необходимые для сегментации, априори неизвестны. Поэтому вначале выполняется грубая предварительная сегментация изображения, после чего производится оценивание потенциалов в пределах полученных областей. Предварительная сегментация осуществляется путем сканирования наблюдаемого изображения скользящим окном прямоугольной формы; при каждом положении окна методом, предложенным в [9], вычисляются оценки значений потенциалов. После сканирования всего изображения каждая точка характеризуется набором оценок потенциалов. Методом кластерного анализа «К-средних» в пространстве признаков размерности, равной количеству оцениваемых потенциалов, производится грубое разбиение изображения на области, различающиеся наборами оценок. В пределах данных областей находятся уточнен-

ные оценки потенциалов $V_c^T(t|m)$, входящих в выражение (2) и используемых для генерирования реализаций текстурной карты, совместимых с наблюдаемым полем.

2. Сегментация на основе бинарного контурного препарата текстуры

Ранее в работах [6, 11] было предложено для текстурной сегментации вместо полутонового изображения использовать бинарный контурный препарат текстуры, полученный с применением детектора границ Кэнни. Поскольку текстура представляет собой характеристику пространственной организации изменений яркости, контурный препарат сохраняет некоторые признаки текстуры, которые могут быть использованы при сегментации (рис. 2).



Рис. 2 – Текстурное изображение (*a*), контурный препарат Кэнни (*b*), контурный препарат Робертса (*c*)

Fig. 2 – A texture image (a), Canny contour preparation (b), Roberts contour preparation (c)

Анализ эффективности применения операторов выделения контуров на различных изображениях пар текстур показал, что наиболее предпочтительными с точки зрения обеспечения сегментации являются операторы Собела и Прюитт (рис. 3). Препарат Кэнни наименее пригоден для сегментации. Предположительно это обусловлено свойством алгоритма выделять контурные линии, удовлетворяющие требованию связности. В результате такой препарат является неинформативным, так как содержит протяженные области, заполненные одинаковыми значениями меток. Операторы Робертса, Прюитт и Собела обеспечивают получение более «насыщенного» препарата, что повышает качество сегментации.

Процедура сегментации запускается многократно; начальными реализациями служат реализации независимых случайных полей. Критерием остановки процедуры генерирования текстурной карты в экспериментах являлось достижение некоторого порогового количества различающихся точек реализаций на текущем и на предыдущем шаге итерации (например, допускается различие соседних реализаций в десяти точках). Полученный ансамбль реализаций текстурной карты, полученных при многократном запуске алгоритма сегментации, обрабатывается по мажоритарному принципу: для каждой точки решетки выбирается значение метки, которое чаще встречается в ансамбле конечных реализаций. Эффективность использования данного способа «голосования» для получения окончательного результата сегментации продемонстрирована на рис. 4.

3. Гиббсовская иерархическая модель, дополненная уровнем с диагональными парными кликами

Повышение эффективности сегментации потенциально могло бы быть достигнуто при использовании вместо окрестности фон Неймана окрестности Мура [9], которая содержит 8 точек (см. рис. 5, *a*). Окрестность Мура содержит большее число типов клик (см. рис. 5, *b*), в результате резко возрастает количество потенциалов, подлежащих оцениванию, а также количество конфигураций поля на окрестности (с $2^4 = 16$ до $2^8 = 256$).



Рис. 3 – Текстурное изображение (a); контурный препарат Кэнни (b), Прюитт (d), Робертса (f), Собела (h); результаты сегментации на основе их применения (справа), соответственно – (c, e, g, i)

Fig. 3 –A texture image (*a*), Canny contour preparation (*b*), Prewitt contour preparation (*d*), Roberts (*f*), Sobel (*h*); segmentation results obtained on the base of their application respectively (*c*, *e*, *g*, *i*)





Fig. 4 – Voting method efficiency illustration. Examples of segmentation result of a single initiation of segmentation (a, b, c, d, e), 20 realization sensemble voting segmentation result (*f*)



Рис. 5 – Окрестность Мура (серые клетки) для произвольной внутренней точки (белая клетка) (а), типы клик, формирующих окрестность Мура (b), диагональная окрестность (белые клетки) и окрестность фон Неймана (черные клетки) для произвольной внутренней точки (серая клетка) (с), возможные конфигурации бинарного поля на парных кликах диагонального типа (d)

Fig. 5 – The Moor eneighborhood (greyboxes) for an arbitrary inner point (whitebox) (a), clique types forming the Moore neighborhood (b), a diagonal neighborhood (whiteboxes) for an arbitrary inner point (greybox) and the von Neumann neighborhood (black boxes) (c), possible configurations of a binary field on pair-wise diagonal cliques (d)

Для более полного использования информации при приемлемой сложности модели предлагается в дополнение к окрестности фон Неймана использовать диагональную окрестность (рис. 5, c), образованную парными диагональными кликами (рис. 5, d). За счет добавления в двухуровневую иерархическую модель еще одного (наблюдаемого) уровня T_2 , описание которого основано на диагональных кликах, возможно повышение эффективности сегментации. При этом количество конфигураций бинарного поля на окрестности увеличится в два раза ($2 \times 2^4 = 32$), что в 8 раз меньше числа конфигураций на окрестности Мура ($2^8 = 256$). Потенциалы парных диагональных клик оцениваются в ходе предварительной сегментации тем же методом, что и потенциалы парных вертикальных и горизонтальных клик [10]. Полученные значения включаются в выражение (2) в виде дополни-

тельных слагаемых $\sum_{c \in \mathbb{C}_{T_2}} V_c^{T_2}(t_2 \mid m)$ в показателе экспоненты.

Исследование показало, что использование трехуровневой иерархической модели обеспечивает лучшее качество сегментации (рис. 6).



Рис. 6 – Сравнение качества сегментации: наблюдаемый уровень (*a*), результат окончательной сегментации (окрестность фон Неймана) (*b*), результат окончательной сегментации (окрестности фон Неймана и диагональная окрестность) (*c*)

Fig. 6 – Comparison of segmentation results: a binary contour texture preparation as an observable level (a), final segmentation result with the von Neumann neighborhood (b), final segmentation result with the von Neumann and diagonal neighborhoods (c)

4. Применение вейвлет-разложения для получения бинарного препарата текстурного изображения

Предлагаемый альтернативный способ получения бинарного препарата текстуры основан на использовании вейвлет-разложения функции яркости полутонового текстурного изображения с последующей бинаризацией коэффициентов. Для разложения в качестве вейвлет-базиса выбран базис Хаара, как наиболее простой в использовании [7]. Коэффициенты высокочастотного фильтра разложения относительно выбранного вейвлет-базиса также называются детализирующими коэффициентами. Различают горизонтальные, вертикальные и диагональные детализирующие коэффициенты. Для получения бинарного препарата изображения детализирующих коэффициентов подвергаются бинаризации на основе сравнения с нулевым порогом (рис. 7).



Рис. 7 – Полутоновое текстурное изображение (*a*) и детализирующие коэффициенты первого уровня разложения горизонтального направления (*b*), вертикального направления (*c*) и диагонального направления (*d*)

Fig. 7 – Gray-level texture image (*a*) and binary detalization coefficients of the first decomposition level in a horizontal (*b*), vertical (*c*) and a diagonal direction (*d*)



Рис. 8 – Результат сегментации с применением четырехуровневой иерархической гиббсовской модели

Fig. 8 – Segmentation result applying a four-level hierarchical Gibbs model

Бинаризованные детализирующие коэффициенты отражают текстурные различия и могут быть использованы в качестве трех наблюдаемых уровней иерархической модели при восстановлении текстурной карты. Результат сегментации изображения (рис. 7, a) с применением четырехуровневой иерархической гиббсовской модели, наблюдаемые уровни которой представлены изображенными на рис. 7, b, c, d бинаризованными детализирующими коэффициентами первого уровня вейвлет-разложения, продемон-

стрирован на рис. 8 в качестве примера сегментации реальных текстурных изображений на основе предложенного подхода.

Заключение

В работе представлены результаты исследований, направленных на повышение эффективности сегментации текстурных изображений на основе иерархической гиббсовской модели. С целью снижения вычислительных затрат текстурные изображения заменяются бинарными препаратами, включаемыми в модель в качестве наблюдаемых уровней, при этом семейства клик ГСП могут ограничиваться окрестностью фон Неймана. Проведено сравнение контурных операторов Кэнни, Робертса, Прюитт и Собела по их пригодности для получения бинарных препаратов текстур, обеспечивающих эффективную сегментацию реальных текстурных изображений. Универсального решения, по-видимому, не существует; наиболее подходящим в каждом случае является оператор, обеспечивающий наибольшую густоту контурных линий.

Для более полного использования текстурной информации предложено дополнить модель наблюдаемым уровнем, описываемым распределением Гиббса, основанным на кликах диагонального типа. При этом наблюдается заметное повышение качества сегментации.

В качестве альтернативного способа получения бинарного препарата текстуры предложено использовать бинаризованные детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения. Эксперименты с использованием базиса Хаара показали перспективность этого подхода. Однако следует отметить, что для разных текстур наиболее информативными оказываются коэффициенты вейвлет-разложения, относящиеся к разным масштабам. Вопрос об автоматическом выборе наилучшего масштаба в процессе сегментации требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Gimel'farb G.** Image textures and Gibbs random fields. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999. 250 p.
- Derin H., Elliott H. Modelling and segmentation of noisy and textured images using Gibbs random fields // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1987. – Vol. PAMI-9, N 1. – P. 39–55.
- Hammersley J.M., Clifford P. Markov field on finite graphs and lattices: manuscript. 1971. – Unpublished.
- Winkler G. Image analysis, random fields and dynamic Monte Carlo methods. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. – 324 p.
- Geman S., Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1984. – Vol. PAMI-6, N 6. – P. 721–741.
- Vasyukov V.N. Image processing algorithms based on finite-state Gibbs models // The 1st International Forum on Strategic Technology (IFOST 2006): proceedings. – Ulsan, Korea, 2006. – P. 287–288.
- 7. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в МАТLАВ. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.
- Equations of state calculations by fast computing machines / N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, E. Teller // The Journal of Chemical Physics. – 1953. – Vol. 21. – P. 1087–1091.
- 9. Васюков В.Н. Оценивание параметров конечнозначных гиббсовских полей с использованием достаточных статистик // Автометрия. 2001. № 4. С. 110–118.
- Ilachinski A. Cellular automata: a discrete universe. Singapore: World Scientific Publishing, 2001. 808 p.
- Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu. Segmentation of textured images described by hierarchical Gibbs model // 11 International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2016): proceedings, Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: NSTU Publ., 2016. – Pt. 1. – P. 452–455.

A HIERARCHICAL FINITELY VALUED GIBBS MODEL FOR TEXTURE IMAGE SEGMENTATION

Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

An approach to texture image segmentation based on the application of the hierarchical finitely valued Gibbs model is suggested. The observer level of a hierarchical model called a texture map is represented in the form of realization of a random field with Gibbs probabilities distribution. The purpose of a texture map is localization of boundaries between image areas whose texture parameters are consistent within the boundaries but differ for various areas. An iterative procedure of stochastic relaxation that uses local characteristics of a posterior distribution of a texture map serves as a generator of its realizations converging to a true texture map. So it gives a solution of the segmentation problem that is optimal according to the criterion of a posteriori probability maximum (APM). Thus segmentation comes to generating the most probable texture map that is compatible with an observed texture image. The Gibbs description of gray-scale images used as observed levels is extremely tedious. The paper is devoted to the search of an efficient technique of converting texture images into a binary preparation retaining characteristic textures properties. Application of a binary preparation instead of an initial gray-scale image seems to be feasible in terms of reducing computational costs and also providing simplicity of hierarchical Gibbs model development. To obtain a binary texture preparation containing texture properties of an initial image a procedure of contour lines extraction is suggested. In addition it is proposed to apply wavelet decomposition of a gray-scale image followed by binarization of detaling coefficients. Finding and insertion of levels that efficiently reflect texture information of various kinds into a hierarchical model is the main task of the investigation. A long-term outlook of the approach based on the expansion of the number of the observed hierarchical model levels each of which represents a binary texture preparation is supported by high quality results of real texture image segmentation.

Keywords: texture image segmentation, Gibbs distribution, hierarchical model, stochastic relaxation, binary texture preparation, edge detection operators, wavelet decomposition. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-43-53

REFERENCES

- 1. Gimel'farb G. *Image textures and Gibbs random fields*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1999. 250 p.
- 2. Derin H., Elliott H. Modelling and segmentation of noisy and textured images using Gibbs random fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, vol. PAMI-9, no. 1, pp. 39–55.
- 3. Hammersley J.M., Clifford P. *Markov field on finite graphs and lattices*: manuscript. 1971. (Unpublished).
- 4. Winkler G. Image analysis, random fields and dynamic Monte Carlo methods. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1995. 324 p.
- 5. Geman S., Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, vol. PAMI-6, no. 6, pp. 721–741.
- Vasyukov V.N. Image processing algorithms based on finite-state Gibbs models. *The 1st International Forum on Strategic Technology (IFOST 2006)*, Ulsan, Korea, 2006, pp. 287–288.
- 7. Smolentsev N.K. *Osnovy teorii veivletov. Veivlety v MATLAB* [Foundations of the wavelets theory. Waveletsin MATLAB]. Moscow, DMK Press, 2005. 304 p.
- Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E. Equations of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, vol. 21, pp. 1087–1091.
- 9. Vasyukov V.N. Otsenivanie parametrov konechnoznachnykh gibbsovskikh polei s ispol'zovaniem dostatochnykh statistik [Parameter estimation of finitely-values Gibbs fields with using sufficient statistics]. *Avtometriya Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2001, no. 4, pp. 110–118. (In Russian)

- Ilachinski A. Cellular automata: a discrete universe. Singapore, World Scientific Publishing, 2001. 808 p.
- Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu. Segmentation of textured images described by hierarchical Gibbs model. *11 International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2016)*: proceedings, Novosibirsk, 1–3 June 2016, pt. 1, pp. 452–455.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Васюков Василий Николаевич – родился в 1951 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: цифровая обработка и статистический анализ сигналов и изображений. Опубликовано около 120 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: vasyukov_vn@ngs.ru, vasyukov@corp.nstu.ru).

VasyukovVassilyNikolaevich (b. 1951) – Doctor Sciences (Eng.), professor, head of the department of theoretical fundamentals of radio engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on digital signal and image processing and analysis. He is the author of 120 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: vasyukov_vn@ngs.ru, vasyukov@corp.nstu.ru).



Зайцева Анна Юрьевна – родилась в 1993 году, аспирант второго года обучения, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: алгоритмы обработки и анализа сигналов и изображений. Опубликовано 13 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, E-mail: Violino1Ann@mail.ru, ayuzaitseva@yandex.ru).

Zaitseva Anna Yuryevna (b. 1993) – a second year PhD student, Novosibirsk State Technical University. Her research interests include algorithms of signal and image processing and analysis. She is the author of 13 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: Violino1Ann@mail.ru, ayuzaitseva@yandex.ru).

> Статья поступила 17 сентября 2016 г. Received September 17, 2016

To Reference:

Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu. Ierarkhicheskaya konechnoznachnaya gibbsovskaya model' dlya segmentatsii teksturnih izobrajeniy [A hierarchical finitely-valued Gibbs model for texture image segmentation]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2016, no. 3 (32), pp. 43–53. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-43-53

2016

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

июль-сентябрь

№ 3(32)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.3.049.779

ВЛИЯНИЕ НЕПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

В.П. Драгунов, В.Ю. Доржиев, Д.И. Лойко

Новосибирский государственный технический университет

При разработке и создании электростатических МЭМС возникает необходимость в определении электрической емкости и электростатических сил, действующих между различными частями конструкции. Эти параметры могут быть рассчитаны с использованием различных подходов. Наиболее точные оценки позволяют получить различные САПР, основанные на методах конечных или граничных элементов, однако такой подход требует большого количества времени, а также затрудняет дальнейшие процессы оптимизации и проектирования. Поэтому большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов. Для МЭМС с двухэлектродной конструкцией электродов приведены зависимости емкости от величины межэлектродного зазора, полученные экспериментально при разных углах наклона электродов, а также аппроксимационные формулы для расчета емкости с учетом краевых эффектов. Рассчитаны зависимости емкости от величины межэлектродного зазора при различных углах наклона электродов. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов и показано их хорошее совпадение. Получено выражение для расчета электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода, двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами. Найдено выражение для электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода у конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов, при постоянном напряжении между электродами и малых углах наклонов электродов.

Ключевые слова: конденсатор, электрическая емкость, непараллельные электроды, краевые эффекты, МЭМС, аппроксимационные формулы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64

Введение

В настоящее время микросистемная техника стала одним из наиболее динамично развивающихся направлений мировой индустрии. Основой для столь стремительного скачка послужили разработки различных миниатюрных инерциальных систем, микродвигателей и преобразователей. Технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволили значительно уменьшить массогабаритные показатели, энергопотребление и стоимость изделий, благодаря чему МЭМС завоевывают все новые и новые сферы применения [1–4].

Проблема разработки и производства новых МЭМС-устройств может быть решена с помощью применения новых технических решений и методик проектирования на основе все более точных математических моделей функционирования. Необходимость достижения высоких технико-экономических показателей МЭМС-изделий ставит перед разработчиками комплекс новых актуальных задач, таких как учет физических свойств новых конструкционных материалов, изучение влияния технологических погрешностей и условий функционирования на характеристики МЭМС.

© 2016 В.П. Драгунов, В.Ю. Доржиев, Д.И. Лойко

Анализируя внутреннюю структуру изделий микросистемной техники, следует отметить, что в них, как правило, реализуется целая совокупность разнообразных связей и взаимодействий: механических, электрических, оптических и т. д. Особенно ярко это проявляется в случае микроэлектромеханических систем, где именно электромеханические взаимодействия чаще всего ограничивают предельно допустимые параметры и предельно достижимые характеристики системы [5–10].

Основным элементом МЭМС, как правило, является переменный конденсатор, изготавливаемый с использованием интегральных технологий. Именно его характеристики в наибольшей степени и определяют характеристики всей МЭМС. В результате при разработке электростатических МЭМС возникает необходимость в оценке электрической емкости и электростатических сил, действующих между различными частями конструкции.

Данные параметры могут быть рассчитаны с использованием различных подходов. При этом на начальных этапах проектирования МЭМС требуются быстрые и наглядные методы расчета электростатических взаимодействий. Поэтому большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью. По мере уточнения моделей, используемых для анализа МЭМС, уточняются и модели, используемые для учета электростатических взаимодействий [11–21].

В данной работе проводится экспериментальное и теоретическое исследование влияния непараллельности электродов на электрические емкости и силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов.

Непараллельность электродов может появляться из-за технологических погрешностей при изготовлении и сборке устройства, а также в процессе эксплуатации при изменении направления движения системы из-за появления вращающих моментов.

1. Двухэлектродная конструкция

В качестве объекта исследования использовалась двухэлектродная модель МЭМС конденсатора, представляющая собой два плоских непараллельных про-

водящих электрода (рис. 1). В расчетах принималось, что электроды имеют длину а, ширину b и межэлектродный зазор при параллельных электродах d_0 . В эксперименте использовались квадратные алюминиевые электроды площадью 25×25 см². Электроды закреплялись на диэлектрических подложках, которые в свою очередь монтировались на штативе с микрометрической головкой, что позволяло задавать смещение подвижного электрода с шагом 10 мкм.

Для измерения емкости использовался цифровой RLC измеритель E7-22, позволяющий измерять емкости от 0,5 пФ до 20 мФ с погрешностью 0,7 %. Паразитная емкость составляла от 2,5 до 4,2 пФ и в



- *Рис. 1* Модель двухэлектродной МЭМС с непараллельными электродами:
 - 1 подвижный электрод; 2 неподвижный электрод
- *Fig. 1* Two-electrode MEMS model with nonparallel electrodes:

l – movable electrode; *2* – fixed electrode

дальнейшем вычиталась из экспериментальных зависимостей. Эксперимент включал семь серий опытов, в которых изменялись максимальный $(d + \Delta)$ и минимальный (d) межэлектродные зазоры.

На рис. 2 приведены зависимости изменения нормированной емкости C_n двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от величины межэлектродного зазора d_{cp} , соответствующего центрам электродов, полученные экспериментально (точки). $Cn = C_n/C_{n,0}$, где n – номер серии, C_n – емкость конденсатора в n-й серии при $\alpha \neq 0$, $C_{n,0}$ – емкость конденсатора в n-й серии при $\alpha \neq 0$, $C_{n,0}$ – емкость конденсатора в n-й серии при $\alpha \neq 0$ (параллельные электроды). В первых четырех сериях минимальное значение d_{cp} соответствовало параллельным электродам. В пятой серии параллельны-ми электроды становились при максимальном d_{cp} .



Рис. 2 – Зависимости нормированной емкости двухэлектродного конденсатора от величины межэлектродного зазора, соответствующего центрам электродов:

точки – эксперимент; сплошные линии – расчет с использованием (2) *Fig.* 2 – Dependences of two-electrode capacitor normalized capacitance on the corresponding to center of electrodes interelectrode gap: dots – experiment; solid lines – calculations using (2)

В пренебрежении особенностями распределения электрического поля у краев электродов (краевыми эффектами) зависимость емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от геометрических размеров при малых α может быть рассчитана с использованием выражения

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_0}{1} \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha) x + d} dx = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_0}{\operatorname{tg}(\alpha)} \ln\left(\frac{\Delta + d}{d}\right) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_0 \varepsilon_0}{\Delta} \ln\left(\frac{\Delta + d}{d}\right), \tag{1}$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами, $tg(\alpha) = \Delta / b$.

Расчеты показали, что в нашем случае экспериментальные зависимости, представленные на рис. 2, адекватно описать с использованием (1) не удается. На наш взгляд, это связано с тем, что при отношении длины (или ширины) электрода к величине межэлектродного зазора меньше 20 нельзя пренебрегать краевыми эффектами [14, 19, 21]. В то же время в эксперименте при изменении угла наклона подвижного электрода отношение ширины электрода *b* к величине минимального межэлектродного зазора d в первой серии опытов изменялось от 147 до 23, во второй – от 53 до 19, в третьей – от 41,5 до 9, в четвертой – от 20,5 до 8,5 и в пятой – от 20,6 до 5,6, а к величине максимального межэлектродного зазора $d + \Delta$, соответственно, в первой серии опытов изменялось от 147 до 9, во второй – от 53 до 8,7, в третьей - от 41,5 до 3,8, в четвертой - от 20,5 до 4 и в пятой - от 7,2 до 5,6. То есть во многих случаях отношение ширины электрода к величине межэлектродного зазора было существенно меньше 20.

Для расчета зависимости емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными квадратными электродами от величины межэлектродного зазора с достаточной для практических применений точностью можно предложить следующее выражение, учитывающее краевые эффекты:

$$C = C_0 \left\{ 1 + 2 \frac{d_{cp}}{\pi b} \left[1 + \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{d_{cp}} + 1, 5 \right) \right) \right] \right\}.$$
 (2)

Зависимости относительного изменения емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами от величины межэлектродного зазора d_{cp} , рассчитанные по (2) с параметрами образцов, используемых в эксперименте, приведены на рис. 2 (сплошные линии). Видно, что выражение (2) достаточно хорошо описывает результаты эксперимента.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости емкости от величины межэлектродного зазора d_{cp} , нормированные на $\varepsilon_0 \varepsilon ab$, построенные в двойном логарифмическом масштабе (точки). Отметим, что все точки хорошо ложатся на кривую, описываемую выражением

$$C = \frac{1}{d_{\rm cp}} \left\{ 1 + 2 \frac{1, 4d_{\rm cp}}{\pi b} \left[1 + \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{1, 4d_{\rm cp}} + 1, 5 \right) \right) \right] \right\}.$$
 (3)



Рис. 3 – Зависимости нормированной емкости от величины межэлектродного d_{ср}:

точки – эксперимент; сплошная линия – расчет с использованием (3) Fig. 3 – Dependences of normalized capacitance on the interelectrode gap d_{cp} :

Это говорит о том, что в ряде случаев при учете непараллельности электродов вместо логарифмической зависимости (1) можно использовать формулу идеального плоского конденсатора, в которой в качестве межэлектродного зазора надо использовать $d_{\rm cp}$, а появляющееся различие корректировать коэффициентом при $d_{\rm cp}$ в сомножителе, учитывающем краевые эффекты. В нашем случае этот коэффициент оказался равным 1,4.

Достоинство (3) состоит в том, что в отличие от (2) при оценке емкости конденсатора с непараллельными электродами можно использовать значение лишь одного межэлектродного зазора d_{cp} , а не двух d и $d + \Delta$.

Непараллельность электродов сказывается не только на оценках величины емкости, но и на оценках электростатической силы. Без учета краевых эффектов используя (1) выражение для электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода, при постоянном напряжении V и малых α принимает вид

$$F_0 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a V^2}{\left(\operatorname{tg}(\alpha) x + d \right)^2},\tag{4}$$

где V – напряжение между электродами, x – координата точки приложения силы. Таким образом, в конденсаторе с непараллельными электродами электростатическая сила изменяется по ширине электрода, что необходимо учитывать при проектировании упругих подвесов электродов.

Для предварительного анализа поведения подвижных элементов МЭМС с непараллельными электродами можно использовать эффективное значение электростатической силы.

Без учета краевых эффектов, используя (4), выражение для эффективной электростатической силы, действующей на непараллельные электроды, при постоянном напряжении и неизменном угле наклона электродов α принимает вид

$$F_{3\phi\phi} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon a V^2 \int_0^b \frac{dx}{\left(\operatorname{tg}(\alpha)x + d\right)^2} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2}{d(\Delta + d)} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2}{d^2 (\overline{\Delta} + 1)},$$
(5)

где $\overline{\Delta} = \Delta/d$. Таким образом, в конденсаторе с непараллельными электродами эффективная электростатическая сила только в $1+\overline{\Delta}$ раз (а не в $(1+\overline{\Delta})^2$ раз) меньше, чем в конденсаторе с параллельными электродами. С увеличением угла наклона подвижного электрода, а следовательно, и среднего расстояния между электродами $d_{\rm cp}$ электростатическая сила уменьшается. Отметим, что зависимости, соответствующие (5), нельзя аппроксимировать выражением для электростатической силы конденсатора с параллельными электродами путем подбора значения эффективного межэлектродного зазора.

2. Гребенчатая конструкция

Наряду с двухэлектродными конденсаторами в МЭМС широко применяются конденсаторы с гребенчатой или встречно-штыревой конструкцией электродов. Упрощенная схема конструкции такого конденсатора приведена на рис. 4. При создании такого конденсатора необходимо глубокое травление с большим аспектным отношением. Для этих целей, как правило, используется «Bosh process»

(DRIE). Данный процесс требует очень точной настройки аппаратуры и строгого выдерживания параметров технологического процесса, что не всегда возможно. В результате электроды часто получаются непараллельными, а межэлектродный зазор – непостоянным (рис. 5).



Рис. 4 – Упрощенная схема конструкции гребенчатого МЭМС конденсатора в несмещенном состоянии:

Fig. 4 – A simplified diagram of the interdigitated MEMS capacitor structure at a rest position:

I – movable electrode; *2* – fixed electrode; *3* – direction of motion



Рис. 5 – Модель двухэлектродной МЭМС с непараллельными электродами:
 1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод; 3 – направление перемещения
 Fig. 5 – Two-electrode MEMS with non-parallel electrodes model:
 1 – movable electrode; 2 – fixed electrode; 3 – direction of motion

Как и в предыдущем случае, при анализе полагали, что электроды имеют длину a, ширину b, минимальное и максимальное значения межэлектродного зазора при симметричном расположении электродов равно, соответственно, dи $d+2\Delta$, при смещении подвижного электрода происходит изменение величины d, а угол наклона электродов не изменяется. В результате при смещении подвижного электрода от симметричного положения на величину x минимальный межэлектродный зазор между подвижным электродом и правым неподвижным (рис. 5) становится равным d-x, а между подвижным электродом и левым неподвижным, равным d+x.

Пренебрегая краевыми эффектами, зависимость емкости конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов от геометрических размеров и величины сме-

подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод;
 3 – направление перемещения

щения подвижного электрода от положения равновесия при малых α может быть рассчитана с использованием выражения

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{2\Delta} \ln \left(\frac{(2\Delta + d)^2 - x^2}{d^2 - x^2} \right).$$
(6)

В этом же приближении, используя (6), выражение для электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода вдоль координаты y, при постоянном напряжении V и малых α принимает вид

$$F_0 = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon a V^2 \left[2 \operatorname{tg}(\alpha) y + d \right] x}{\left[\left(2 \operatorname{tg}(\alpha) y + d \right)^2 - x^2 \right]^2},\tag{7}$$

где *у* – координата точки приложения силы. Таким образом, и в конденсаторе со встречно-штыревыми непараллельными электродами электростатическая сила изменяется по ширине электрода, что необходимо учитывать при проектировании упругих подвесов электродов.

В свою очередь без учета краевых эффектов выражение для эффективной электростатической силы, действующей на электроды в конденсаторе со встречно-штыревыми непараллельными электродами, при постоянном напряжении и неизменном угле наклона электродов α принимает вид

$$F_{9\phi\phi} = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2 x (\Delta + d)}{(d^2 - x^2) \left((2\Delta + d)^2 - x^2 \right)} = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon a b V^2 z (\overline{\Delta} + 1)}{d^2 (1 - z^2) \left((2\overline{\Delta} + 1)^2 - z^2 \right)},$$
(8)

где z = x/d – относительное смещение подвижного электрода, а $\overline{\Delta} = \Delta/d$. Таким образом в конденсаторе со встречно-штыревыми непараллельными электродами эффективная электростатическая сила обратно пропорциональна $((2\overline{\Delta}+1)^2 - z^2)(1-z^2)$, а не $((2\overline{\Delta}+1)^2 - z^2)^2$, как можно было ожидать, проводя аналогию с конденсатором с параллельными электродами. С увеличением угла наклона подвижного электрода, а следовательно, и среднего расстояния между электродами d_{cp} электростатическая сила (8) уменьшается.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния непараллельности электродов на электрические емкости и электростатические силы в МЭМС с двухэлектродной и гребенчатой конструкцией электродов.

Для МЭМС с двухэлектродной конструкцией электродов приведены зависимости емкости от величины межэлектродного зазора, полученные экспериментально при разных углах наклона электродов.

Найдены аппроксимационные формулы для расчета емкости двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами с учетом краевых эффектов. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов и показано их хорошее совпадение. Получено выражение для расчета электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода, двухэлектродного конденсатора с непараллельными электродами.

Найдено выражение для электростатической силы, приходящейся на единицу длины электрода у конденсатора с гребенчатой конструкцией электродов, при постоянном напряжении и малых углах наклонов электродов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Современные тенденции развития микросистемной техники / В.Д. Вернер, П.П. Мальцев, А.А. Резнев, А.Н. Сауров, Ю.А. Чаплыгин // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 8. С. 2–6.
- Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks / C. Ó Mathúna, T. O'Donnell, R.V. Martinez-Catala, J. Rohan, B. O'Flynn // Talanta. – 2008. – Vol. 75, iss. 3. – P. 613–623.
- 3. Алексенко А.Г. Микро- и наносистемы беспроводной электроники // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 9. – С. 33–36.
- Kaajakari V. Practical MEMS: design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, optical MEMS, and microfluidic systems. – Las Vegas, NV: Small Gear Publ., 2009. – 484 p.
- Nemirovsky Y., Bochobza-Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2001. – Vol. 10, iss. 4. – P. 601–615. – doi: 10.1109/84.967384.
- Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: a review / W.-M. Zhang, H. Yan, Z.-K. Peng, G. Meng // Sensors and Actuators A: Physical. – 2014. – Vol. 214. – P. 187–218.
- 7. Драгунов В.П. Микромеханический электростатический преобразователь // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2007. – № 1. – С. 56–66.
- Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Начальные условия и динамический pull-in эффект в МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором // Нано- и микросистемная техника. - 2015. – № 10. – С. 31–37.
- Dragunov V.P., Ostertak D.I. Microelectromechanical converters // Russian Microelectronics. – 2012. – Vol. 41, N 2. – P. 107–121.
- 10. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Трехэлектродная двухконденсаторная МЭМС со встроенным зарядом // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 2. – С. 33–38.
- Osterberg P.M., Senturia S.D. M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures // Journal of Microelectromechanical Systems. 1997. Vol. 6, iss. 2. P. 107–118.
- Mechanical design and optimization of capacitive micromachined switch / J.-M. Huang, K.M. Liew, C.H. Wong, S. Rajendran, M.J. Tan, A.Q. Liu // Sensors and Actuators A: Physical. – 2001. – Vol. 93, iss. 3. – P. 273–285. – doi: 10.1016/S0924-4247(01)00662-8.
- Leus V., Elata D. Fringing field effect in electrostatic actuators // Technical Report ETR. 2004. – Vol. 2. – P. 2–15.
- 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.
- 15. Драгунов В.П., Драгунова Е.В. Особенности функционирования МЭМ систем // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 6 (179). – С. 43–52.
- Krylov S., Harari I., Cohen Y. Stabilization of electrostatically actuated microstructures using parametric excitation // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2005. – Vol. 15, N 6. – P. 1188–1204. – doi: 10.1088/0960-1317/15/6/009.
- Fargas-Marques A., Casals-Terre J., Shkel A.M. Resonant pull-in condition in parallelplate electrostatic actuators // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2007. – Vol. 16, N 5. – P. 1044–1053. – doi: 10.1109/JMEMS.2007.900893.
- 18. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Расчет латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС // Научный вестник НГТУ. 2009. № 1. С. 229–232.

- 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.
- 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.
- Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Влияние краевых эффектов на функционирование МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 1. – С. 48–61.

INFLUENCE OF ELECTRODE NONPARALLELISM ON MICROMECHANICAL CAPACITOR CHARACTERISTICS

V.P. Dragunov, V.Yu. Dorzhiev, D.I. Loyko

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In the development and fabrication of electrostatic MEMS there is a need to define capacitances and electrostatic forces between various parts of the structure. These parameters can be calculated using various approaches. It is possible to obtain the most accurate estimations using a variety of CADs based on finite or boundary elements methods, but this approach requires a lot of time and makes further processes of optimization and design difficult. 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 experimental and theoretical studies of an electrode nonparallelism effect on electrical capacitances and forces in MEMS with two-electrode and interdigitated electrode structures. For MEMS with a twoelectrode structure dependences of capacitance on the size of the interelectrode gap obtained experimentally at different angles of electrode inclination as well as approximate formulas for the calculation of capacitance with regard for fringing field effects are given. Dependences of the calculated capacitances on the interelectrode gap at different angles of electrodes inclination are calculated. The comparison of experimental and theoretical results is made and their good agreement is shown. An expression for calculating the electrostatic force per unit length of the electrodes in a two-electrode capacitor with nonparallel electrodes is obtained. An expression for calculating the electrostatic force per unit length of the electrode in the capacitor with an interdigitated electrode structure at a constant voltage between the electrodes and the electrodes with small tilt angles is also obtained.

Keywords: capacitor; electrical capacitance; nonparallel electrodes; fringing field effects; MEMS; approximation formulas.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64

REFERENCES

- Verner V.D., Mal'tsev P.P., Reznev A.A., Saurov A.N., Chaplygin Yu.A. Sovremennye tendentsii razvitiya mikrosistemnoi tekhniki [Modern tendencies in development of micro system technique]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2008, no. 8, pp. 2–6.
- Mathúna C. Ó, O'Donnell T., Martinez-Catala R.V., Rohan J., O'Flynn B. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks. *Talanta*, 2008, vol. 75, iss. 3, pp. 613–623.
- 3. Aleksenko A.G. Mikro- i nanosistemy besprovodnoi elektroniki [Micro- and nanosystems wireless electronics]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2009, no. 9, pp. 33–36.
- Kaajakari V. Practical MEMS: design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, optical MEMS, and microfluidic systems. Las Vegas, NV, Small Gear Publ., 2009. 484 p.
- Nemirovsky Y., Bochobza-Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, vol. 10, iss. 4, pp. 601–615. doi: 10.1109/84.967384

- 6. Zhang W.-M., Yan H., Peng Z.-K., Meng G. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: a review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 214, pp. 187–218.
- Dragunov V.P. Mikromekhanicheskii elektrostaticheskii preobrazovatel' [Micromechanical electrostatic converter]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2007, no. 1, pp. 56–66.
- Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Nachal'nye usloviya i dinamicheskii pull-in effekt v MEMS s izmenyayushchimsya mezhelektrodnym zazorom [The initial conditions and dynamic pullin effect in gap-closing MEMS]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2015, no. 10, pp. 31–37.
- Dragunov V.P., Ostertak D.I. Microelectromechanical converters. *Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 2, pp. 107–121. Translated from *Mikroelektronika*, 2012, vol. 41, no. 2, p. 120.
- Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Trekhelektrodnaya dvukhkondensatornaya MEMS so vstroennym zaryadom [Three-electrode two-capacitor MEMS with built-in charge]. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano and Microsystem Technique, 2014, no. 2, pp. 33–38.
- 11. Osterberg P.M., Senturia S.D. M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, vol. 6, iss. 2, pp. 107–118.
- Huang J.-M., Liew K.M., Wong C.H., Rajendran S., Tan M.J., Liu A.Q. Mechanical design and optimization of capacitive micromachined switch. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 93, iss. 3, pp. 273–285. doi: 10.1016/S0924-4247(01)00662-8
- 13. Leus V., Elata D. Fringing field effect in electrostatic actuators. *Technical Report ETR*, 2004, vol. 2, pp. 2–15.
- 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.
- 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.
- Krylov S., Harari I., Cohen Y. Stabilization of electrostatically actuated microstructures using parametric excitation. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, no. 6, pp. 1188–1204. doi: 10.1088/0960-1317/15/6/009
- Fargas-Marques A., Casals-Terré J., Shkel A.M. Resonant pull-in condition in parallel-plate electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 1044–1053. doi: 10.1109/JMEMS.2007.900893
- Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet lateral'noi sostavlyayushchei elektrostaticheskoi sily v MEMS [The calculation of lateral electrostatic force component of MEMS]. Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university, 2009, no. 1, pp. 229–232.
- 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., 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Драгунов Валерий Павлович – 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).

Dragunov Valery Pavlovich – Doctor of Science (Eng.), Assistant Professor, professor at 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, nanoand 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).



Доржиев Виталий Юрьевич – аспирант кафедры ППиМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: b.dorzhiev@gmail.com, dorzhiev@corp.nstu.ru).

Dorzhiev Vitaly Yuryevich – a PhD 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. He is the author of more than 15 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: b.dorzhiev@gmail.com, dorzhiev@corp.nstu.ru).



Лойко Данил Иванович – магистрант кафедры ППиМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано 2 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20).

Loyko Danil Ivanovich – a graduate 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. He is the author of 2 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia).

Статья поступила 5 сентября 2016 г. Received September 5, 2016

To Reference:

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu., Loyko 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

2016

№ 3 (32^{*}

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

июль-сентябрь

УДК 519.248

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ АГРЕГАТОВ

В.Н. Клячкин¹, И.Н. Карпунина²

¹Ульяновский государственный технический университет, ²Ульяновский институт гражданской авиации

Работоспособность многих технических агрегатов определяется стабильностью функционирования. Нарушение стабильности может привести к отказу агрегата или возникновению аварийной ситуации. Поэтому важным является решение задачи скорейшего обнаружения такого нарушения. Например, вибрации агрегата можно контролировать с помощью сети датчиков. По показаниям этих датчиков необходимо диагностировать нарушение стабильности работы контролируемого объекта. Нарушения проявляются в виде изменения статистических характеристик, поэтому для обнаружения нарушений могут быть использованы методы и алгоритмы статистического контроля технологических процессов. Предложена методика оценки стабильности работы агрегата, включающая изучение условий работы аналогичных агрегатов и выявление возможных нарушений; съем показаний датчиков в условиях отлаженной (стабильной) работы агрегата, и расчет основных статистических характеристик: вектора средних значений и ковариационной матрицы (характеристики обучающей выборки); выбор возможных статистических инструментов для последующего контроля; расчет средней длины серий для различных статистических инструментов с учетом возможных нарушений; проведение статистических испытаний; отбор инструментов с минимальной длиной серий; постоянный мониторинг работы агрегата с целью диагностики нарушений стабильности.

Ключевые слова: карта Шухарта, многомерная карта Хотеллинга, обобщенная дисперсия, средняя длина серий.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-65-72

Введение

Работоспособность агрегата часто определяется стабильностью его функционирования. Нарушение стабильности может привести к остановке работы агрегата или возникновению аварийной ситуации, поэтому важным является решение задачи скорейшего обнаружения такого нарушения [1].

Диагностирование агрегатов позволяет определять их техническое состояние и прогнозировать сроки службы узлов. Своевременное обнаружение и устранение неисправностей в системах питания двигателей, агрегатов трансмиссии или ходовой части улучшает на 10...15 % топливно-экономические показатели и эксплуатационную мощность двигателя, на 20...30 % улучшает экологические показатели, повышает безопасность эксплуатации машины.

Вибрации гидроагрегатов можно контролировать с помощью сети датчиков. По показаниям этих датчиков необходимо диагностировать нарушение стабильности работы контролируемого объекта. Нарушения проявляются в виде измене-

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 2014/232 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности Минобрнауки России и при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-48-02038.

ния статистических характеристик, поэтому для их обнаружения могут быть использованы методы и алгоритмы статистического контроля технологических процессов [2–6].

Цель исследования – разработка методики оценки стабильности функционирования агрегата на основе анализа эффективности применения методов статистического контроля для диагностирования нарушений работы таких агрегатов.

1. Диагностика изменения среднего уровня процесса

Наиболее распространенными нарушениями процесса, связанными с изменением его среднего уровня, являются постоянное смещение (рис. 1, a) или тренд – постепенное уменьшение или увеличение среднего уровня (рис. 1, δ). Для обнаружения такого типа нарушений при контроле одного параметра используют карты Шухарта для средних значений или индивидуальных наблюдений [3–5]. Более эффективен контроль предполагаемого постоянного изменения среднего уровня с помощью карт кумулятивных сумм. Эти карты могут быть построены вручную с использованием встроенных функций и графических средств электронных таблиц или с помощью специальных статистических пакетов (Statistica, SPSS и др.).



Рис. 1 – Моделирование возможных нарушений среднего уровня процесса (по горизонтальной оси – номер наблюдения, по вертикальной оси – контролируемая характеристика):

a – постоянное смещение; δ – тренд

Fig. 1 – Modeling of potential violations of medium level process (on the horizontal axis is the number of observations, on the vertical axis-controlled):

a – the constant offset; b – trend

При контроле множества коррелированных параметров применяют многомерные карты Хотеллинга, а также основанные на статистике Хотеллинга алгоритмы экспоненциально взвешенных скользящих средних [4–9]. Для повышения эффективности карты Хотеллинга предложено несколько алгоритмов. Один из них – поиск структур специального вида, вероятность появления которых соизмерима с вероятностью ложной тревоги: тренды, резкие скачки, приближение точек к контрольной границе или оси абсцисс и др. Еще один подход – использование предупреждающей границы: попадание нескольких точек подряд между предупреждающей и контрольной границами свидетельствует о нарушении процесса. Обычная карта Хотеллинга (рис. 2) может быть построена в системе Statistica. Для построения этой карты с автоматическим обнаружением специальных структур, а также с предупреждающей границей используют специальное программное обеспечение.





Fig. 2 – Hotelling's chart with warning: regarding the violation of the process indicates the location of the four points 9-12 in a row

2. Диагностика изменения рассеяния процесса

Наиболее распространенное изменение рассеяния процесса – это его скачкообразное или постепенное увеличение (рис. 3). При исследовании одного параметра, как правило, строят двойную карту Шухарта для одновременного контроля как изменений среднего уровня процесса, так и рассеяния (карты размахов или стандартных отклонений).



Рис. 3 – Моделирование возможных изменений рассеяния процесса:

а – скачкообразное увеличение рассеяния; б – тренд рассеяния

Fig. 3 – Modeling of possible changes in the scattering process: a – scattering increases by leaps and b – trend of dispersion

Основной характеристикой многомерного рассеяния (при контроле многопараметрического процесса) является обобщенная дисперсия – определитель ковариационной матрицы [10–13]. Однако эффективность карты обобщенной дисперсии часто оказывается недостаточной для диагностики нарушений. Для повышения эффективности могут быть использованы те же подходы, что и для карт Шухарта и Хотеллинга: применение алгоритмов кумулятивных сумм или экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии, а также предупреждающей границы или поиск структур специального вида.

В качестве примера на рис. 4 показана карта экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии: процесс стабилен, так как нет точек, выходящих за контрольные границы.



Рис. 4 – Карта экспоненциально взвешенных скользящих средних для обобщенной дисперсии

Fig. 4 - Chart of exponentially weighted moving averages for generalized variance

3. Оценка эффективности алгоритмов диагностики нарушений процесса

Как уже отмечалось, при обнаружении различных видов нарушений стабильности работы агрегата разные алгоритмы диагностики этих нарушений имеют разную эффективность. Эффективность алгоритма определяет его чувствительность к изменению статистических свойств контролируемых характеристик. Для оценки чувствительности алгоритма применяют специальную функцию, называемую средней длиной серий. Она показывает, как быстро обнаружены нарушения, и численно равна среднему количеству наблюдений от момента нарушения процесса до момента обнаружения этого нарушения. Для карт Шухарта зависимость количества выборок от величины смещения процесса вычисляют аналитически. При использовании алгоритмов многомерного контроля аналитический расчет возможен для обычной карты Хотеллинга, карты обобщенной дисперсии и карт с предупреждающими границами [7, 12]. При использовании алгоритмов кумулятивных сумм, экспоненциально взвешенных скользящих средних, а также алгоритма поиска структур специального вида необходимы статистические испытания [14–15].

Для проведения таких исследований моделируют множество последовательностей векторов данных на основе многомерного нормального распределения с заданным вектором средних и ковариационной матрицей, а также задают различные виды нарушений. Возможные нарушения стабильности работы исследуемого агрегата целесообразно анализировать с участием экспертов. С целью обнаружения смоделированных нарушений применяют все предполагаемые к использованию разновидности алгоритмов и опытным путем оценивают среднюю длину серий. На рис. 5 представлены в качестве примера кривые зависимости средней длины серий от смещения среднего уровня процесса при контроле трех параметров, нарушение процесса – постоянное смещение среднего уровня: *1* – обычная карта Хотеллинга; *2* – карта с предупреждающей границей; *3* – учет структур специального вида на карте Хотеллинга; первые две кривые построены аналитически, третья – по экспериментальным точкам результатов статистических исследований.

Из рисунка видно, что, например, при смещении среднего уровня процесса, соответствующего значению параметра нецентральности, равного 1,5 (отложен по горизонтальной оси), требуется не менее 13 наблюдений.



Рис. 5 – Зависимость средней длины серий от параметра нецентральности



4. Предлагаемая методика оценки стабильности работы агрегата

Проведенное исследование позволяет предложить следующую методику оценки стабильности работы агрегата.

1. Изучают условия работы аналогичных агрегатов и выявляют возможные нарушения при его эксплуатации.

2. В условиях отлаженной (стабильной) работы агрегата снимают показания соответствующих датчиков и рассчитывают основные статистические характеристики: вектора средних значений и ковариационной матрицы (характеристики обучающей выборки).

3. Выбирают набор возможных статистических инструментов для последующего контроля в зависимости от предполагаемых нарушений и уровня коррелированности параметров. Некоррелированные параметры контролируют инструментами на основе карты Шухарта, коррелированные – на основе статистики Хотеллинга и/или обобщенной дисперсии.

 Рассчитывают среднюю длину серий для различных статистических инструментов с учетом возможных нарушений.

5. Моделируют выборки, идентичные обучающей, и проводят статистические исследования для оценки средней длины серий тех инструментов, для которых аналитический расчет невозможен.

6. Отбирают инструменты с минимальной длиной серий по результатам аналитического расчета и исследований.

7. Проводят постоянный мониторинг работы агрегата с целью диагностики нарушений стабильности.

Заключение

Предложенная методика диагностирования нарушений стабильности функционирования технического агрегата на основе методов статистического контроля процессов позволяет своевременно выявлять возможные нарушения работы объекта и, при необходимости, предотвратить аварийные ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Никифоров И.В.** Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. – М.: Наука, 1983. – 200 с.
- Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алешина А.А. Моделирование вибраций гидроагрегата на основе адаптивных динамических регрессий // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 1. – С. 30–34.
- 3. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта: пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.
- Клячкин В.Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии. – М.: Финансы и статистика: ИНФРА-М, 2009. – 304 с.
- 5. **Montgomery D.C.** Introduction to statistical quality control. New York: John Wiley and Sons, 2009. 754 p.
- Ryan T.P. Statistical methods for quality improvement. New York: John Wiley and Sons, 2011. – 687 p.
- Клячкин В.Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. – М.: Физматлит, 2011. – 196 с.
- Кравцов Ю.А. Анализ нарушений технологического процесса с помощью контрольной карты Хотеллинга // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2014. № 1. С. 51–54.
- 9. Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А. Многомерный статистический контроль процесса очистки питьевой воды // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации, 2015. № 1 (26). С. 31–40.
- Клячкин В.Н. Многомерный статистический контроль рассеивания показателей технологического процесса // Известия вузов. Машиностроение. – 2002. – № 6. – С. 45–51.
- 11. Клячкин В.Н., Святова Т.И. Статистический контроль технологического рассеяния в многопараметрическом процессе // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 12. С. 22–25.
- 12. Святова Т.И., Клячкин В.Н. Алгоритм экспоненциально взвешенных скользящих средних для многомерного статистического контроля рассеяния процесса // Радиотехника. 2015. № 6. С. 42–44.
- 13. Клячкин В.Н., Святова Т.И. Методы статистического контроля технологического процесса по критерию многомерного рассеяния // Радиопромышленность. 2015. № 4. С. 147–153.
- Бубырь Д.С., Клячкин В.Н., Карпунина И.Н. Использование бинарных переменных при регрессионном моделировании состояния технического объекта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 6-2. – С. 371–373.
- 15. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982. 296 с.

THE USE OF STATISTICAL CONTROL METHODS FOR DEVICE OPERATION STABILITY ASSESSMENT

Klyachkin V.N.¹, Karpunina I.N.²

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia ²Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, Ulyanovsk, Russia

A technique of device operation stability assessment by taking readings of distributed sensor network was suggested based on the choice of the most sensitive to possible disturbances statistical control methods which are defined by calculation results as well as by statistical tests.

Device efficiency is defined by the stability of its functioning. Stability disturbance can lead to device operation termination or to emergency, so it is important to discover such disturbances as quickly as possible.

For example, device vibrations can be controlled by a distributed sensor network.

It is necessary to diagnose stability disturbance of the controlled object by these sensor readings. Disturbances come out as statistical characteristics changes, so to discover them statistical control methods and algorithms of technological processes can be used.

The technique of device operation stability assessment is suggested. It includes studying similar device operation conditions and detecting possible disturbances; taking sensor readings under stable operation conditions and calculating the main statistical characteristics such as vectors of average values and the covariance matrix (learning sample characteristics); choosing possible statistical instruments for the following control; calculating an average series length for different statistical instruments considering possible disturbances; conducting statistical tests; selecting instruments with a minimal series length; continuous monitoring of device operation to diagnose stability disturbances.

Keywords: Shewhard chart; multivariate Hotelling chart; generalized variance; average run length.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-65-72

REFERENCES

- 1. Nikiforov I.V. *Posledovatel'noe obnaruzhenie izmeneniya svoistv vremennykh ryadov* [Consecutive properties change revealing of temporal series]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 200 p.
- Klyachkin V.N., Kuvaiskova Yu.E., Aleshina A.A. Modelirovanie vibratsii gidroagregata na osnove adaptivnykh dinamicheskikh regressii [Hydroelectric generator vibration modelling on basis of adoptive dynamical regressions]. *Avtomatizatsiya i so-vremennye tekhnologii – Automation and Modern Technologies*, 2014, no. 1, pp. 30–34.
- 3. Wheeler D.J., Chambers D.S. Understanding statistical process control. 2nd ed. Knoxville, Tenn., SPC Press, 1992. 406 p. (Russ. ed.: Uiller D., Chambers D. Statisticheskoe upravlenie protsessami: optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta. Translated from English. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2009. 409 p.).
- 4. Klyachkin V.N. *Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom: komp'yuternye tekhnologii* [Statistical methods in quality control: information technologies]. Moscow, Finansy i statistika Publ., INFRA-M Publ., 2009. 304 p.
- 5. Montgomery D.C. *Introduction to statistical quality control*. New York, John Wiley and Sons, 2009. 754 p.
- 6. Ryan T.P. Statistical methods for quality improvement. New York, John Wiley and Sons, 2011. 687 p.
- Klyachkin V.N. Modeli i metody statisticheskogo kontrolya mnogoparametricheskogo tekhnologicheskogo protsessa [Statistical control models and methods of multi parameter technological process]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 196 p.
- Kravtsov Yu.A. Analiz narushenii tekhnologicheskogo protsessa s pomoshch'yu kon-trol'noi karty Khotellinga [Disturbance analysis of technological process by using Hotelling control chart]. Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2014, no. 1, pp. 51–54.
- Klyachkin V.N., Kravtsov Yu.A. Mnogomernyi statisticheskii kontrol' protsessa ochistki pit'evoi vody [Multivariate statistical control of the potable water treatment process]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2015, no. 1 (26), pp. 31–40.
- Klyachkin V.N. Mnogomernyi statisticheskii kontrol' rasseivaniya pokazatelei tekhnologicheskogo protsessa [Multidimesional statistical control of technological process indexes dispersion]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building, 2002, no. 6, pp. 45–51.
- Klyachkin V.N., Svyatova T.I. Statisticheskii kontrol' tekhnologicheskogo rasseyaniya v mnogoparametricheskom protsesse [Statistical control of technological dispersion in multi parameter process]. Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii – Automation and Modern Technologies, 2013, no. 12, pp. 22–25.

- Svyatova T.I., Klyachkin V.N. Algoritm eksponentsial'no vzveshennykh skol'zyashchikh srednikh dlya mnogomernogo statisticheskogo kontrolya rasseyaniya protsessa [Algorithm of exponentially weighted moving averages control chart for multivariate statistical control of process dispersion]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2015, no. 6, pp. 42–44.
- Klyachkin V.N., Svyatova T.I. Metody statisticheskogo kontrolya tekhnologicheskogo protsessa po kriteriyu mnogomernogo rasseyaniya [Methods of statistical control of technological process by multidimensional dispersion criteria]. *Radiopromyshlennost' – Radio industry*, 2015, no. 4, pp. 147–153.
- Bubyr' D.S., Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Ispol'zovanie binarnykh peremennykh pri regressionnom modelirovanii sostoyaniya tekhnicheskogo ob"ekta [Use of binary variables in the regression modeling of the technical object state]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 6-2, pp. 371–373.
- 15. Ermakov S.M., Mikhailov G.A. *Statisticheskoe modelirovanie* [Statistical modeling]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 296 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Клячкин Владимир Николаевич – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Ульяновского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование, статистические методы, контроль качества, техническая диагностика. Опубликовано 165 научных работ. (Адрес: 432027, Россия, г. Ульяновск, улица Северный Венец, дом 32. Email: v_kl@mail.ru).

Klyachkin Vladimir Nikolaevich (b. 1950) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor of the Applied Mathematics and Informatics Department in the Ulyanovsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling, statistical methods, quality control, and technical diagnostics. He is the author of 165 scientific papers. (Address: 32, Severniy Venets St., Ulyanovsk, 432027, Russia. Email: $v_kl@mail.ru$).



Карпунина Ирина Николаевна – родилась в 1953 году, канд. техн. наук, доцент кафедры «Общепрофессиональные дисциплины» Ульяновского института гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева. Область научных интересов: динамика и прочность машин, надежность. Опубликовано 50 научных работ. (Адрес: 432071, Ульяновск, ул. Верхнеполевая, 23.

Karpunina Irina Nikolaevna (b. 1953) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, department of general disciplines «Ulyanovsk Institute of Civil Aviation». Her research interests include dynamics and strength of machines and reliability. She is the author of 50 scientific papers. (Address: 23, Verhnepolevaya St., Ulyanovsk, 432071, Russia. Email: karpunina53@yandex.ru).

Статья поступила 14 марта 2016 г. Received March 14, 2016

To Reference:

Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Ispol'zovanie metodov statisticheskogo kontrolya dlya otsenki stabil'nosti raboty agregatov [The usage of statistical control methods for stability assessment of device operation]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2016, no. 3 (32), pp. 65–72. doi:10.17212/1727-2769-2016-3-65-72
2016

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ июль-сентябрь

№ 3 (32)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.372.0

СИНТЕЗ КОМПАКТНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СОГЛАСУЮЩЕ-СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОТРЕЗКАХ СВЯЗАННЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

М.В. Коваль, Г.Н. Девятков

Новосибирский государственный технический университет

Предложен метод, позволяющий в интерактивном режиме синтезировать широкополосное согласующе-симметрирующее устройство на отрезках связанных линий передачи в заданной полосе частот с заданным модулем коэффициента отражения.

Ключевые слова: согласующе-симметрирующее устройство, связанные линии передачи, метод синтеза.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-73-82

Введение

При проектировании современных широкополосных телекоммуникационных устройств часто возникает задача построения симметрирующих устройств, которые могут быть выполнены в виде компактной структуры на связанных линиях передачи. Проблеме синтеза широкополосных симметрирующих устройств посвящены работы [1–2]. В источнике [1] предлагается общий метод синтеза широкополосных симметрирующих устройств, но при этом не рассматривается получение компактных симметрирующих устройств на связанных отрезках линий передачи. Основным результатом этой работы является вывод о том, что синтез широкополосного симметрирующего устройства сводится к синтезу широкополосного согласующего четырехполюсника, что подтверждено в работе [2], где приводится аналитический метод расчета симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи. Предложенный метод достаточно сложен для использования и ориентирован только на определенный класс цепей.

В связи с этим возникает проблема разработки метода синтеза, который позволил бы в интерактивном режиме проводить синтез компактных широкополосных симметрирующих устройств с дополнительной функцией согласования на отрезках связанных линий передачи в заданном диапазоне частот.

1. Постановка задачи

В данной работе ограничим класс решаемых задач согласующе-симметрирующими устройствами на отрезках двух и трех связанных линий передачи с Т-волной, как наиболее часто используемых в практических применениях. При разработке метода синтеза используем подход, предложенный в работе [1]. Тогда задача синтеза согласующе-симметрирующего устройства на отрезках связанных линий передачи может быть реализована двухэтапной процедурой. На первом этапе выбирается структура собственных функций эквивалентного четырехполюсника адекватно поставленной задаче, задаются ограничения, обеспечивающие его физическую реализуемость, и находится вектор переменных параметров функций, при котором суммарное отклонение собственных функций цепи от иде-

© 2016 М.В. Коваль, Г.Н. Девятков

альных зависимостей будет минимально. На втором этапе учитываются дополнительные ограничения на схемную реализуемость и производится оптимизация с целью улучшения решения. При этом максимизируется минимальное значение коэффициента преобразования мощности в рабочей полосе частот.

2. Теория

2.1. Описание задачи синтеза компактных широкополосных согласующесимметрирующих устройств

При решении поставленной задачи ограничимся *у*-матричным описанием эквивалентного четырехполюсника, что позволяет получить более удобные с практической точки зрения реализации.

Исходя из специфики предлагаемого подхода к решению задачи синтеза широкополосных согласующе-симметрирующих устройств, в данном случае достаточно ограничиться рассмотрением распределенного соразмерного элементного базиса. Тогда в распределенном соразмерном элементном базисе собственные параметры $y_{11}(S)$, $y_{21}(S)$, $y_{22}(S)$ любого нормального реактивного четырехполюсника могут быть записаны в виде [3]

$$y_{11}(S) = K_{11}^{\infty}S + \frac{K_{11}^{0}}{S} + \sum_{\nu=1}^{m} \frac{2K_{11}^{\nu}S}{S^{2} - S_{\nu}^{2}} + y_{110}(S)$$

$$y_{21}(S) = (-)K_{21}^{\infty}S + (-)\frac{K_{21}^{0}}{S} + (-)\sum_{\nu=1}^{m} \frac{2K_{21}^{\nu}S}{S^{2} - S_{\nu}^{2}} \right\},$$

$$y_{22}(S) = K_{22}^{\infty}S + \frac{K_{22}^{0}}{S} + \sum_{\nu=1}^{m} \frac{2K_{22}^{\nu}S}{S^{2} - S_{\nu}^{2}} + y_{220}(S)$$

$$(1)$$

где K_{11}^{∞} , K_{11}^{0} , K_{21}^{ν} , K_{21}^{∞} , K_{21}^{ν} , K_{22}^{∞} , K_{22}^{0} , K_{22}^{ν} – вычеты функций $y_{11}(S)$, $y_{21}(S)$, $y_{22}(S)$ относительно полюсов при $S = j \operatorname{tg} \frac{\pi}{2}$, $S = j \cdot 0$, $S_i = j \operatorname{tg} \frac{\pi \omega_v}{2\omega_0}$, ω_0 – частота, на которой электрическая длина отрезков линий передачи $\theta = \frac{\pi}{2}$; $y_{11_0}(S)$, $y_{22_0}(S)$ – функции, полюса которых не вошли в число полюсов функции $y_{21}(S)$.

Необходимые и достаточные условия физической реализуемости, которым должны удовлетворять элементы *у*-матрицы, запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} K_{11}^{\infty} &\geq 0, \quad K_{22}^{\infty} \geq 0, \quad K_{11}^{\infty} \cdot K_{22}^{\infty} - (K_{21}^{\infty})^2 \geq 0, \\ K_{11}^{0} &\geq 0, \quad K_{22}^{0} \geq 0, \quad K_{11}^{0} \cdot K_{22}^{0} - (K_{21}^{0})^2 \geq 0, \\ K_{11}^{\nu} &\geq 0, \quad K_{22}^{\nu} \geq 0, \quad K_{11}^{\nu} \cdot K_{22}^{\nu} - (K_{21}^{\nu})^2 \geq 0, \end{aligned}$$
(2)

где вычеты K_{21}^{∞} , K_{21}^{0} , K_{21}^{ν} могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Для построения начального приближения при синтезе эквивалентного согласующего четырехполюсника на первом этапе можно использовать собственные параметры идеального согласующего устройства [1, 4], которые позволяют, с одной стороны обоснованно выбирать структуру функций собственных параметров синтезируемого четырехполюсника (1), ограничиваясь числом членов, и установить нижнюю $\phi_{\rm H} = \phi(\omega_{\rm H})$ и верхнюю $\phi_{\rm B} = \phi(\omega_{\rm B})$ границы изменения фазы $\phi(\omega)$ рабочего коэффициента преобразования четырехполюсника в рабочей полосе частот $\omega_{\rm H} - \omega_{\rm B}$, а с другой – дают информацию о предельных значениях, к которым выбранные структуры должны стремиться. В случае синтеза устройства, согласующего чисто активные проводимости источника сигнала и нагрузки, система собственных параметров идеального согласующего четырехполюсника имеет вид [1, 4]

$$\begin{cases} \tilde{y}_{11}(\omega) = jg_1 \operatorname{ctg} \varphi(\omega), \qquad (3) \\ \tilde{y}_{22}(\omega) = jg_2 \ldots \operatorname{ctg} \varphi(\omega), \\ \tilde{y}_{21}(\omega) = \pm j \frac{\sqrt{g_1 g_2}}{\sin \varphi(\omega)}, \end{cases}$$

где g_1 и g_2 – проводимости источника сигнала и нагрузки, ω – круговая частота.

Фаза рабочего коэффициента преобразования четырехполюсника описывается линейной зависимостью

$$\varphi(\omega) = k_0 + k_1 \omega \,. \tag{4}$$

Значения коэффициентов k₀ и k₁ определяются из решения системы уравнений

$$\left. \begin{array}{c} \varphi_{\mathrm{H}} = k_0 + k_1 \omega_{\mathrm{H}} \\ \varphi_{\mathrm{B}} = k_0 + k_1 \omega_{\mathrm{B}} \end{array} \right\}.$$

$$(5)$$

Ограничиваясь рассмотрением согласующе-симметрирующих устройств на отрезках двух или трех связанных линиях передачи, устанавливаются возможные структуры функций $y_{11}(S)$, $y_{21}(S)$, $y_{22}(S)$ (1), имеющие минимальную сложность и обеспечивающие достаточно широкую полосу рабочих частот синтезируемого устройства:

$$y_{11}(S) = \frac{K_{11}^0}{S} + K_{11}^\infty \cdot S,$$

$$y_{22}(S) = \frac{K_{22}^0}{S} + K_{22}^\infty \cdot S,$$

$$y_{21}(S) = \pm \frac{K_{21}^0}{S} \pm K_{21}^\infty \cdot S.$$
(6)

При этом должны быть выполнены условия физической реализуемости (2).

2.2. Первый этап решения задачи синтеза компактных широкополосных согласующе-симметрирующих устройств

На первом этапе задача аппроксимации идеальных зависимостей выбранными структурами функций решается методом наименьших квадратов. Для этого записываются функции относительных ошибок аппроксимации:

$$\begin{split} \delta_{11}(x_m, \omega) &= \frac{(-j) \cdot \left(\tilde{y}_{11}(\omega) - y_{11}(x_m, \omega)\right)}{\tilde{y}_{11}(\omega)}, \\ \delta_{22}(x_m, \omega) &= \frac{(-j) \cdot \left(\tilde{y}_{22}(\omega) - y_{22}(x_m, \omega)\right)}{\tilde{y}_{22}(\omega)}, \\ \delta_{21}(x_m, \omega) &= \frac{(-j) \cdot \left(\tilde{y}_{21}(\omega) - y_{21}(x_m, \omega)\right)}{\tilde{y}_{21}(\omega)}, \end{split}$$
(7)

где x_m – вектор искомых параметров, компонентами которого являются вычеты функций (6).

Тогда суммарная ошибка аппроксимации имеет вид

$$\delta^{2}(x_{m},\omega) = \delta^{2}_{11}(x_{m},\omega) + \delta^{2}_{22}(x_{m},\omega) + \delta^{2}_{12}(x_{m},\omega).$$
(8)

Решением задачи с учетом ограничений на физическую реализуемость (2) является вектор x_m , при котором суммарная относительная ошибка аппроксимации в заданной полосе частот минимальна:

$$\sum_{i} \delta^{2}(x_{m}, \omega_{i}) \to \min .$$
⁽⁹⁾

2.3. Второй этап решения задачи синтеза компактных широкополосных согласующе-симметрирующих устройств

На втором этапе находится оптимальное решение задачи широкополосного согласования. Достаточно хорошее начальное приближение, полученное на первом этапе решения задачи, используется для улучшения решения методами оптимизации. В общем случае задача оптимизации формулируется как минимизация целевой функции с учетом условий физической и схемной реализуемости, которые выбираются в зависимости от требуемой реализации согласующе – симметрирующего устройства на отрезках двух или трех связанных линий передачи:

$$\max\left[\Delta_G\left(\mathbf{x}_m, \boldsymbol{\omega}_i\right)\right] \to \min,$$

$$\mathbf{x}_m \in D, \qquad (10)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i \in E_{\boldsymbol{\omega}},$$

где $\Delta_G(\mathbf{x}_m, \omega_i)$ – отклонение коэффициента передачи от единицы, D – область возможных значений, E_{ω} – дискретное множество частот. Для минимизации целевой функции был применен метод возможных направлений [5].

В результате была получена у-матрица эквивалентного согласующего четырехполюсника. С использованием соотношений, определенных в работе [1], переходим к математической модели широкополосного согласующе-симметрирующего устройства на отрезках связанных линий передачи:

$$\begin{cases} y_{11}^2(S) = y_{11}(S), \\ y_{22}^2(S) = \frac{y_{22}(S) - y_{23}(S)}{2}, \\ y_{21}^2(S) = y_{21}(S), \end{cases}$$
(11)

где $y_{11}(S)$, $y_{22}(S)$, $y_{23}(S)$ – элементы *у*-матрицы согласующе-симметрирующего устройства; $y_{11}^2(S)$, $y_{22}^2(S)$, $y_{21}^2(S)$ – элементы *у*-матрицы эквивалентного четырехполюсника.

77

3. Метод синтеза в практическом применении и результаты эксперимента

Рассмотрим эффективность работы предложенного метода синтеза широкополосного согласующе-симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи в заданном диапазоне частот $\omega_{\rm H} - \omega_{\rm B} = 0, 5...1, 5$ согласующего внутреннее сопротивление источника сигнала $R_{\rm I} = 1$ с сопротивлением нагрузок $R_{\rm 2} = 0, 5$.

Для решения аппроксимационной задачи на первом этапе используется выбранная структура собственных функций (6) с учетом условий физической реализуемости эквивалентного четырехполюсника (2), где частотные зависимости фазы ф рабочего коэффициента преобразования четырехполюсника находятся из решений системы уравнений (5).

Аппроксимационная задача решается на дискретном множестве частот $E_{\omega} = \{0, 5; 0, 6; ..., 1, 5\}$ с использованием предложенной выше итерационной процедуры.

Результатом первого этапа решения задачи является *у*-матрица четырехполюсника, эквивалентного согласующе-симметрирующему устройству на отрезках трех связанных линий передачи:

$$y = \begin{bmatrix} 1,237 \cdot S + \frac{0,62}{S} & -1,612 \cdot S + \frac{0,275}{S} \\ -1,612 \cdot S + \frac{0,275}{S} & 2,475 \cdot S + \frac{1,24}{S} \end{bmatrix}.$$
 (12)

На втором этапе выбирается вариант реализации согласующе-симметрирующего устройства и находится оптимальное решение с учетом ограничений на физическую и схемную реализуемость. В данном случае выбран вариант реализации симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи *a*, *b*, *c*, структурная схема которого приведена на рис.1, где R_1 и R_2 – сопротивления генератора и нагрузок соответственно.



Рис. 1 – Симметрирующее устройство на отрезках трех связанных линий передачи
Fig. 1 – Balun at intervals of two coupled transmission lines

Ограничимся случаем, когда емкость связи между линиями a и c равна нулю, тогда параметры устройства полностью определяются проводимостями четного Y_{oe}^{a} , Y_{oe}^{b} , Y_{oe}^{c} и нечетного Y_{oo}^{a} , Y_{oo}^{c} типов возбуждения.

Для реализации согласующе-симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи (рис. 1) необходимо добавить условия схемной реализуемости [6]:

$$K_{11}^{\infty} = K_{11}^{0}, \qquad K_{22}^{\infty} = K_{22}^{0}, \left| K_{21}^{\infty} \right| = \left| K_{21}^{0} \right|, \quad K_{11}^{\infty} > \left| K_{21}^{\infty} + m \right|, \quad K_{22}^{\infty} > \left| K_{21}^{\infty} + n \right|,$$
(13)

где *m*, *n* – константы, обусловленные структурой согласующе-симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи, могут быть выбраны разработчиком, исходя из условий реализации проектируемого устройства. В результате нахождения оптимального решения на втором этапе получаем матрицу проводимостей четырехполюсника эквивалентного согласующе-симметрирующему устройству на отрезках трех связанных линий передачи:

$$y = \begin{bmatrix} 0,98 \cdot S + \frac{0,98}{S} & -0,891 \cdot S + \frac{0,891}{S} \\ -0,891 \cdot S + \frac{0,891}{S} & 1,195 \cdot S + \frac{1,195}{S} \end{bmatrix},$$
(14)

На рис. 2 приведена частотная характеристика модуля коэффициента отражения по входу.



Рис. 2 – Модуль коэффициента отражения по входу эквивалентного согласующего четырехполюсника

Fig. 2 – The reflection coefficient module at the input of the matching equivalent quadrupole

Результирующая матрица проводимостей согласующе-симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи с учетом условий идентичной передачи сигнала в плечи с разностью фаз в $180^{\circ} y_{oe}^{b} = 0$, $y_{oe}^{a} = y_{oe}^{c}$ [6] имеет вид

$$y = \begin{vmatrix} \frac{p_a + p_c}{2S} & -\frac{p_c}{2S'} & \frac{p_c}{2S'} \\ -\frac{p_c}{2S'} & \frac{\sum_a - p_a + p_c}{2S} & -\frac{p_c}{2S} \\ \frac{p_c}{2S'} & -\frac{p_c}{2S} & \frac{\sum_c}{2S} \end{vmatrix},$$
(15)

где $\sum_a = Y_{oo}^a + Y_{oe}^a$, $\sum_c = Y_{oo}^c + Y_{oe}^c$, $p_a = Y_{oo}^a - Y_{oe}^a$, $p_c = Y_{oo}^c - Y_{oe}^c$, $S = j \cdot \operatorname{tg} \theta$, $S = j \cdot \sin \theta$, $\theta = \frac{\pi}{2}$.

С помощью формул преобразования (11) и полученной матрицы эквивалентного четырехполюсника переходим к числовой *у*-матрице симметрирующего устройства:

$$y = \begin{vmatrix} \frac{3,92}{2 \cdot S} & -\frac{3,564}{2 \cdot S'} & \frac{3,564}{2 \cdot S'} \\ -\frac{3,564}{2 \cdot S'} & \frac{5,996}{2 \cdot S} & \frac{3,564}{2 \cdot S} \\ \frac{3,564}{2 \cdot S'} & \frac{3,564}{2 \cdot S} & \frac{5,996}{2 \cdot S} \end{vmatrix}.$$
 (16)

Данной информации достаточно для определения параметров согласующесимметрирующего устройства.

> Параметры компактного согласующесимметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи

> Parameters of compact balun on the three coupled transmission lines

Style	$R_{\rm H} = 0,5$
Y_{oe}^{a}	1,216
Y_{oe}^b	0
Y_{oe}^{c}	1,216
Y_{oo}^a	1,572
Y_{oo}^{c}	4,78

Частотные характеристики полученного согласующе-симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи приведены на рис. 3–5.

Проведен синтез в распределенном элементном электрическом базисе широкополосного согласующе – симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи и приведены его рабочие характеристики, которые подтверждают корректность предложенной процедуры.



Рис. 3 – Модуль коэффициента отражения по входу согласующе-симметрирующего устройства
 Fig. 3 – Module of the reflection coefficient at the input of the matching - balun



Puc. 4 – Модули коэффициентов передачи по напряжению в плечи *Fig.* 4 – Modules transmission coefficients in the shoulder strain



Puc. 5 – Модуль разности фаз выходных сигналов *Fig.* 5 – The module outputs the phase difference

Заключение

Предложен интерактивный двухэтапный метод синтеза компактных широкополосных согласующе-симметрирующих устройств с оптимальной характеристикой коэффициента преобразования мощности и идентичной передачей сигнала в плечи с разностью фаз в 180° в рабочей полосе частот на отрезках двух и трех связанных линий передачи при произвольных активных внутреннем сопротивлении источника сигнала и нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Девятков Г.Н. Автоматизированный синтез широкополосных согласующе-симметрирующих устройств // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 1 (22). – С. 61–69.
- Lee H.-M., Tsai C.-M. Exact synthesis of broadband three-line baluns // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2009. – Vol. 57, iss. 1. – P. 140–148.
- 3. Девятков Г.Н. Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств: дис. ... д-ра техн. наук / Новосиб. гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2006. 424 с.
- 4. Девятков Г.Н. Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств, связывающих произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки // Научный вестник НГТУ. 2004. № 1 (16). С. 155–165.
- 5. Ланнэ А.А. Оптимальный синтез линейных электронных схем. М.: Связь, 1978. 336 с.
- Девятков Г.Н., Коваль М.В. Широкополосное согласующе-симметрирующее устройство на трех связанных линиях передачи // Доклады АН ВШ РФ. – 2015. – № 4 (29). – С. 50–58.

SYNTHESIS OF COMPACT BROADBAND BALUN ON THE COUPLED TRANSMISSION LINES

Koval M.V., Devyatkov G.N.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The method of synthesizing a compact broadband balun on the coupled transmission lines in a given frequency band with optimal characteristics of the power conversion ratio is discussed in this article. This interactive two – step method allows synthesizing the balun on the two and three coupled transmission lines for different load impedances with a phase difference of 180° in the operating frequency band. The presented numerical examples confirm the correctness of the proposed mathematical procedure. The method allows a developer to actively intervene in the synthesis process and to find an optimal solution in real time.

Keywords: broadband balun; coupled transmission lines, synthesis method. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-73-82

REFERENCE

- 1. Devyatkov G.N. Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushchee-simmetriruyushchikh ustroistv [Automatic synthesis of broadband balun], *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 1 (22), pp. 61–69.
- 2. Lee H.-M., Tsai C.-M. Exact synthesis of broadband three-line baluns. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, iss. 1, pp. 140–148.
- Devyatkov G.N. Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushchikh ustroistv. Diss. dokt. tekhn. nauk [Automatic synthesis of broadband balun. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2006. 424 p.
- 4. Devyatkov G.N. Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushchikh ustroistv, svyazyvayushchikh proizvol'nye immitansy istochnika signala i nagruzki [Automatic synthesis of broadband balun that connect an arbitrary of impedance of generator and load]. *Nauchnyi*

vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university, 2004, no. 1 (16), pp. 155–165.

- 5. Lanne A.A. *Optimal'nyi sintez lineinykh elektronnykh skhem* [Optimal synthesis of linear cutcuit]. Moscow, Svyaz' Publ., 1978. 336 p.
- Devyatkov G.N., Koval' M.V. Shirokopolosnoe soglasuyushchee-simmetriruyushchee ustroistvo na trekh svyazannykh liniyakh peredachi [Broadband balun based on three coupled transmission lines]. Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2015, no. 4 (29), pp. 50–58.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Девятков Геннадий Никифорович – родился в 1945 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: автоматизированный синтез активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 150 научных работ, в том числе 2 монографии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: devyatkovgn@mail.ru).

DevyatkovGennadii Nikuforovich (b. 1945) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the department of construction and design of electronic devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on synthesis of active and passive microwave devices. He is the author of 150 scientific papers including 2 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: devyatkovgn@mail.ru).

Коваль Мария Владимировна – родилась в 1989 году, аспирант кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: автоматизированный синтез активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email:marri54@yandex.ru).

Koval MariyaVladimirovna. (b.1989) – a postgraduate student at the department of construction and design of electronic devices, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on synthesis of active and passive microwave devices. She is author of 7 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: marri54@yandex.ru).

Статья поступила 17 июня 2016 г. Received June 17, 2016

To Reference:

Koval M.V., Devyatkov G.N. Sintez kompaktnykh shirokopolosnykh soglasuyushcheesimmetriruyushchikh ustroistv na otrezkakh svyazannykh linii peredachi [Synthesis of compact broadband balun on the coupled transmission lines]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 73–82. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-73-82

2016

июль-сентябрь

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК:519.854.3

ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ Параллельно-последовательных систем с неопределенными маршрутами обслуживания

Ю.А. Мезенцев, И.В. Эстрайх

Новосибирский государственный технический университет

Представлен новый подход к решению проблем составления оптимальных по быстродействию расписаний параллельно-последовательных систем с использованием двухэтапной схемы: кластеризации и последующего определения маршрутов. Частными случаями применения разработанного инструментария являются решения различных модификаций задач маршрутизации с минимаксным критерием. Приведены формальные постановки рассматриваемых подзадач кластеризации и составления маршрутов в виде NP-трудных задач дискретного программирования. Предложен приближенный алгоритм решения поставленной задачи, основанный на ее декомпозиции на подзадачу оптимального по равномерной нагрузке на приборы разбиения множества заявок на подмножества и ряд подзадач определения последовательностей их обслуживания приборами. Приведены иллюстративные примеры применения развиваемого подхода, вычислены эмпирические оценки точности и быстродействия его программной реализации. На сгенерированных тестовых примерах в широком диапазоне размерностей исследованы быстродействие и точность реализованных алгоритмов. Обозначены возможные практические применения при построении календарных графиков реализации крупных промышленных проектов и определены направления развития предложенного подхода.

Ключевые слова: параллельно-последовательная система, неопределенные маршруты обслуживания, оптимальность по быстродействию, маршрутизация, кластеризация, задача коммивояжера.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-83-97

Введение

Авторы вынуждены несколько расширить классификацию задач теории расписаний (3TP), поскольку рассматриваемые в статье задачи не вписываются в существующие классификации, по смыслу явно относясь к ЗТР. Например, задача коммивояжера (ЗК) является частным случаем open shop problem (OSP) для одного прибора. Задачи же на составление маршрутов и оптимальных по быстродействию расписаний движения по этим маршрутам, являющиеся расширениями ЗК, в состав ЗТР обычно не включаются. Поэтому рассматриваемую ниже задачу оптимизации расписаний параллельно-последовательной системы с неопределенными маршрутами обслуживания для краткости обозначим как URPM (Undefined routes parallel machines problem). Данная задача с произвольным числом заявок и приборов в различных модификациях имеет множество теоретических обобщений и практических применений. Частные ее случаи (ЗК, задачи *т*-коммивояжеров, маршрутизации и связанные темы) с разным успехом разрабатываются более пяти десятилетий, не теряя актуальности в настоящее время [1-33]. Однако приемлемых по быстродействию средств точного решения общей, а также большинства порождаемых прикладных задач для реальных размерностей найти не удается в

Исследование выполнено при финансовой поддержке НГТУ (темплан НИР НГТУ), проект ТП-ЭИ-1_15

^{© 2016} Ю.А. Мезенцев, И.В. Эстрайх

силу их принадлежности к множеству труднорешаемых задач дискретной оптимизации (ДО). Разработанные же к настоящему времени (да и в перспективе тоже) вычислительные методы, как и большинство алгоритмов приближенного решения NP-полных задач ДО, обычно не имеют неулучшаемых оценок, и всегда впоследствии находится подобный алгоритм с лучшими оценками точности и (или) быстродействия, независимо от того, о каких оценках, априорных или апостериорных, идет речь. Этим, а также наличием многочисленных практических приложений обосновывается актуальность темы.

Настоящая статья посвящена уточнению названной URPM-проблемы с сужением и конкретизацией общей постановки относительно используемого критерия эффективности, расширением постановки относительно используемых ограничений, а также развитию соответствующих методов решения. В качестве критерия рассматривается общее быстродействие системы, что в изданных к настоящему времени работах встречается нечасто, возможно потому, что приводит к необходимости применения минимаксных целевых функций [28–33] с порождением задач трудоемкостей кратно превосходящих экспоненциальную относительно задачи той же размерности с линейным критерием. Кроме того требуют переосмысления и способы формализации, и порождаемые алгоритмы решения задачи. Ниже в подробностях эти постулаты раскрыты, приведены иллюстративные примеры и статистика результатов расчетов тестов для анализа точности и быстродействия реализующих алгоритмов.

1. Формальная постановка задачи

Рассматриваются система параллельных приборов разной производительности и множество заявок с заданными характеристиками (пунктами) обслуживания, оценками переходов (переналадки) для каждого из приборов (временем переналадки, ценами, штрафами или расстояниями) между всеми заявками (пунктами). Маршруты переходов (последовательности обслуживания) не заданы и подлежат определению. Обслуживание заявок приборами монопольное. Прерывания обслуживания приборами одних заявок в пользу других запрещены, запрещены и разрывы связности маршрутов.

URPM-проблема определения множества оптимальных по быстродействию расписаний обслуживания всей системы включает: назначение каждому из приборов некоторого подмножества заявок, непересекающегося с подмножествами заявок других приборов; определение порядков обслуживания (маршрутов переходов) для каждого из приборов всего множества заявок. Общая постановка сформулированной проблемы в терминах задачи дискретного программирования приводит к фатальному росту числа переменных и ограничений в сравнении с классической задачей коммивояжера [1–5].

Поэтому целесообразно рассматривать ее естественную декомпозицию как две подзадачи, по размерности сопоставимые с ЗК. Заметим, что подобный подход не нов, и в литературе описаны два существенно различающихся способа его реализации. Во-первых, это построение общего связного маршрута (последовательности обслуживания) с последующим его разрезанием на *m* (по числу приборов) связных частей, см. например, [28]. Во-вторых, это разделение заявок (пунктов) на группы (алгоритмом дихотомического разделения, сортировкой по полярному углу и др.) и решение ЗК внутри каждой такой группы [33].

Для рассматриваемой задачи первый вариант неприменим вовсе, поскольку производительность разных приборов при обслуживании одних и тех же заявок в общем случае различна и построение начального связного маршрута по трудоем-

кости совпадает с решением общей URPM-проблемы. По этой причине за основу был принят второй способ решения, что, однако, потребовало существенной ревизии формальной постановки задачи. Ниже приведено описание подхода, в котором использованы наработки, полученные при решении задач оптимизации расписаний одностадийных параллельных и параллельно-последовательных систем с задержками начала обслуживания [34, 35].

Далее рассматриваются связанные подзадачи.

1. Кластеризация (наилучшее по быстродействию распределение заявок по *m* приборам). Фактически это задача о назначениях исходного множества приборов на множество заявок. Для каждой такой заявки и каждого прибора определены характеристики переходов от любых текущих к последующим заявкам (цена, время или расстояние). Маршруты переходов не фиксированы и подлежат определению. Пересечений приборов по маршрутам (и маршрутов по приборам) не допускается. Учитываются все прочие атрибуты заявленной URPM-проблемы, за исключением запрета на разрывы связности маршрутов.

2. Множество *m* ЗК (*m* подзадач коммивояжера). Быстродействие системы определяется наихудшей оценкой быстродействия из всех *m* ЗК.

Приведем формальную постановку подзадачи кластеризации.

Пусть все приборы и заявки пронумерованы: k = 1, m, k – номер прибора, $i, j = \overline{1, n}$ – номера заявок. Кроме этого для удобства обозначим через J множество заявок n, J^k – подмножество заявок, назначаемых прибору k, а через n^k – число элементов каждого такого подмножества, $J = \bigcup_{k=1}^m J^k$, $\bigcap_{k=1}^m J^k = \emptyset$. Также введем следующие обозначения: $s = \overline{1, S}$ – индекс используемого ресурса (в задачах маршрутизации), $c_{i,j}^k$ – оценка (цена, время или расстояние) перехода (переналадки, перемещения) прибора k от обслуживания заявки i к обслуживанию заявки j. Первый из нижних индексов всегда обозначает заявку-источник, второй – заявку-сток. Будем полагать, что оценка (цена или время) процесса обслуживания заявки j (в классической ЗК равная нулю) уже учтена в $c_{i,j}^k$.

$$x_{i,j}^{k} = \begin{cases} 1, & \text{если имеет место переход прибора } k \\ & \text{от обслуживания заявки } i \\ 0, & \text{в противном случае, } i, j = \overline{1,n}, i \neq j, \end{cases}$$

 R_s^k – объем ресурса *s*, доступного прибору *k*. Например, в качестве ресурса может рассматриваться грузоподъемность автомобиля, тогда R_s^k – величина грузоподъемности. $r_{j,s}^k$ – затраты ресурса *s* прибором *k* при обслуживании заявки *j*.

Требуется найти наилучшие разбиения \hat{J}^k , $k = \overline{1,m}$, и наилучшие назначения $\hat{x}_{i,j}^k$, $i, j \in \hat{J}^k$, в терминах представленного ниже критерия быстродействия при выполнении приводимых далее условий. Выведем ограничения, обеспечивающие непересечение приборов по заявкам (маршрутам) и заявок по приборам:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{i,j}^{k} = b_{i}^{k}, \quad k = \overline{1, m}, i = \overline{1, n},$$
(1)

$$\sum_{i=1}^{n} x_{i,j}^{k} = d_{j}^{k}, \quad k = \overline{1,m}, \quad j = \overline{1,n},$$

$$\tag{2}$$

$$\sum_{k=\overline{l,m}}^{k\neq l} b_i^k + d_i^l \le 1, \quad i = \overline{1,n}, \quad l = \overline{1,m},$$
(3)

$$b_j^l + \sum_{k=1,m}^{k\neq l} d_j^k \le 1, \quad j = \overline{1,n}, \quad l = \overline{1,m}.$$

$$\tag{4}$$

В совокупности (1)–(4) означают следующее. Сумма числа назначений переходов от заявок-источников для всех приборов, кроме прибора l, к заявкамстокам прибора l меньше либо равна единице. Это запрещает передачу заявок от всех приборов, кроме l, прибору l. Сумма числа назначений переходов от заявок-источников для прибора l к заявкам-стокам всех приборов, кроме прибора l, меньше либо равна единице. Это запрещает передачу заявок, назначенных прибору l любым другим приборам. Совместное выполнение всех этих условий гарантирует непересечение приборов по заявкам (и маршрутам) и заявок по приборам. Совмещение ограничений (1)–(4) с исключением зависимых переменных приводит к неравенствам (5) и (6):

$$\sum_{k=1,m}^{k\neq l} \sum_{j=1}^{n} x_{i,j}^{k} + \sum_{j=1}^{n} x_{j,i}^{l} \le 1, \quad i = \overline{1,n}, \quad l = \overline{1,m},$$
(5)

$$\sum_{i=1}^{n} x_{j,i}^{l} + \sum_{k=1,m}^{k\neq l} \sum_{i=1}^{n} x_{i,j}^{k} \le 1, \quad j = \overline{1,n}, \quad l = \overline{1,m}.$$
 (6)

Нижеследующие ограничения-равенства являются обычными условиями задачи о назначениях.

$$\sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} x_{i,j}^{k} = 1, \ j = \overline{1,n}, \ i \neq j,$$
(7)

$$\sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} x_{i,j}^{k} = 1, \ j = \overline{1, n}, \ i \neq j.$$
(8)

Дополняем задачу ограничениями на переменные (все переменные булевы):

$$x_{i,j}^{k} = \begin{cases} 1, & \text{если имеет место переход прибора } k \\ & \text{от обслуживания заявки } i \\ 0, & \text{в противном случае, } i, j = \overline{1,n}, i \neq j. \end{cases}$$
(9)

И критерием быстродействия системы:

$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} c_{i,j}^{k} x_{i,j}^{k} \le \lambda, \quad k = \overline{1, m},$$

$$(10)$$

$$\lambda \to \min$$
 . (11)

В совокупности (10) и (11) реализуют минимаксный критерий, являющийся критерием быстродействия рассматриваемой параллельно-последовательной обслуживающей системы, или критерием равномерной нагрузки [34–36].

Кроме этого задачи маршрутизации, являющиеся расширениями одного из вариантов рассматриваемой URPM-проблемы, обычно дополняются ресурсными ограничениями вида

$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} r_{j,s}^{k} x_{i,j}^{k} \le R_{s}^{k}, \quad k = \overline{1,m}, \quad s = \overline{1,S}.$$
(12)

Оптимальные решения задач (5)–(11) и (5)–(12) \hat{J}^k , $\hat{x}_{i,j}^k$, $i, j \in \hat{J}^k$, $k = \overline{1,m}$, определяют наилучшие из возможных нижние оценки $\lambda_{\min}(\hat{x}_{i,j}^k)$ расписания всей URPM-проблемы. Для уточнения оценок и получения гарантированно связных маршрутов обслуживания заявок необходимо решить *m* подзадач ЗК, для всех приборов *k*, $k = \overline{1,m}$. Любая такая подзадача представима в виде:

$$\sum_{i\in\hat{J}^k} x_{i,j}^k = 1, \ j\in\hat{J}^k \ , \ i\neq j,$$
(13)

$$\sum_{j\in\hat{J}^k} x_{i,j}^k = 1, \ i\in\hat{J}^k \ , \ i\neq j,$$
(14)

$$u_{i}^{k} - u_{j}^{k} + n^{k} x_{i,j}^{k} \le n^{k} - 1, \quad i, j = \overline{2, n}^{k}, \quad i \neq j,$$
(15)

$$u_i^k \ge 0, \quad i \in \widehat{J}^k, \tag{16}$$

$$\Lambda^{k} = \sum_{j \in \widehat{J}^{k}} \sum_{i \in \widehat{J}^{k}} c_{i,j}^{k} x_{i,j}^{k} \to \min.$$
(17)

Выражение (15) предполагает для удобства, что индексы всех подмножеств заявок \hat{J}^k , $k = \overline{1,m}$, перенумерованы от 1 до n^k . Набор оптимальных решений *m* подзадач ЗК (13)–(17) $\tilde{x}_{i,j}^k$, $i, j \in \hat{J}^k$, $k = \overline{1,m}$, с оценкой $\tilde{\Lambda} = \max \Lambda^k$ является приближенным решением рассматриваемой URPM-проблемы.

2. Процедуры поиска решений

Заметим, что обе представленные подзадачи принадлежат к одному классу NPполных задач ДО. Этот тезис не требует доказательств, поскольку принадлежность к данному классу непосредственно вытекает из формальных постановок (5)–(12) и (13)–(17). Подзадача (13)–(17) является формализацией ЗК. Подзадача (5)–(12) содержит булевы переменные, «ранцевые» ограничения (10) и (12), а также логические ограничения (5) и (6), подматрица коэффициентов которых не образует фрагментов абсолютно унимодулярной матрицы. Эти свойства с избытком идентифицируют NP-трудность сформулированной подзадачи кластеризации.

Ее постановка не позволяет использовать какие-либо специальные методы решения, основанные на релаксации, например транспортной задачей, как в [31]. В данном случае применимы только общие методы решения задач псевдобулева программирования, например, соответствующие встроенные средства систем оптимизации IBM ILOG CPLEX Optimization studio, Gurobi, Xpress и др. На взгляд авторов, наибольшие перспективы имеет применение метода бинарных отсечений [37], однако объем статьи не позволяет изложить даже суть метода без привязки к задаче кластеризации. Поэтому ограничимся отсылкой к первоисточнику, ибо это тема отдельного исследования.

3К (13)–(17), напротив, имеет существенное множество алгоритмов решения. Одно перечисление таких алгоритмов, например [7–27], может занять несколько десятков страниц текста. Выделим только наилучшим образом зарекомендовавшие себя на практике алгоритмы, например, Кристофидеса [4], Лина–Кернигана [5, 6], а также работы последних лет, большая часть которых посвящена метаэвристическим методам: имитирующим физические процессы [8–12], методам «роевого» интеллекта [14–23] и эволюционным методам [13, 25].

3. Иллюстративный пример

Рассмотрим URPM-задачу с данными из [38] (табл. 1).

исходные данные / Initial data											
	1	2	3	4	5	6					
1	8	27	43	16	30	26					
2	7	∞	16	1	30	30					
3	20	13	∞	35	5	0					
4	21	16	25	∞	18	18					
5	12	46	27	48	∞	5					
6	23	5	5	9	5	00					

Исходные данные / Initial data

Таблица 1 / Table 1

Используя постановки (5)–(12) и (13)–(17), найдем решения для одного, двух и трех приборов равной производительности. Последнее означает равенство элементов $c_{i,j}^k$ для всех k, $k = \overline{1,3}$. Табл. 1 содержит эти элементы для шести заявок (n = 6). Полагаем $c_{i,j}^k = \infty$.

1. Положим *m* = 1. Задача свелась к единственной ЗК в постановке (13)–(17). Ее решение представлено в табл. 2.

	^ /	m 1	1 1
Tahmma	11	Tah	10 /
i aosinija	- /	1 40	<i>i</i> c <i>2</i>

			<i>m</i> – 1			
	1	2	3	4	5	6
U=	0	4	1	0	2	3
1	0	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0
4	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	0	0

Оценка быстродействия для данного случая $\tilde{\Lambda} = 63$.

2. Положим m = 2. Решаем подзадачу (5)–(11). Результаты сведены в табл. 3. Назначения первого прибора – в левой части табл. 3, второго прибора – в ее правой части. Поскольку в решениях отсутствуют подциклы, полученные результаты являются оптимальным решением URPM-задачи с оценкой $\tilde{\Lambda} = \max \{31, 37\} = 37$.

Таблица 3 / Table 3

	m = 2											
<i>k</i> = 1							<i>k</i> = 2					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. Положим m = 3. Решаем подзадачу (5)–(11). Результаты сведены в табл. 4.

Назначения первого прибора отмечены заливкой в левой части табл. 4, второго прибора – в средней части таблицы, назначения третьего прибора выделены заливкой ее правой части. Поскольку в решениях отсутствуют подциклы, полученные результаты являются оптимальным решением URPM-задачи с оценкой $\tilde{\Lambda} = \max \{34, 27, 32\} = 34$.

m = 3

Таблииа	4	/Τ	able	4
---------	---	----	------	---

	k = 1						k = 2					<i>k</i> = 3						
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

4. Тестирование свойств программной реализации

Программная реализация предложенного подхода на данном этапе опирается на средства IBM ILOG CPLEX Optimization studio и включает формирование файлов данных подзадачи кластеризации (5)–(12) в соответствующих форматах, подключение модулей IBM ILOG CPLEX по технологии Concert, решение и сохранение результатов расчетов $\hat{x}_{i,j}^k$, $i, j \in \hat{J}^k$, $k = \overline{1,m}$, $\lambda_{\min}(\hat{x}_{i,j}^k)$ в формате csv. Далее последовательное формирование m ЗК (13)–(17), их решение и запись результатов $\tilde{x}_{i,j}^k$, $i, j \in \hat{J}^k$, $k = \overline{1,m}$, $\tilde{\Lambda} = \max \Lambda^k$ с предельной оценкой возможного отклонения от оптимума, абсолютной $\Delta = \tilde{\Lambda} - \lambda_{\min}(\hat{x}_{i,j}^k)$ и относительной

$$\delta = \frac{\Delta}{\lambda_{\min}(\hat{x}_{i,j}^k)} \cdot 100\%$$

Эмпирические оценки, наихудшие и средние, сформированы в результате генерации и расчетов тестовых примеров разной размерности. Результаты сведены в табл. 5. Сгенерировано около 100 примеров разных размерностей (размерности отображены в таблице).

Обозначения в таблицах соответствуют введенным выше: λ_{\min} — минимальное значение λ критерия (11) задачи кластеризации; t — общее время поиска решения URPM-теста в форматах сек. (секунды), либо чч:мм:сс (часы: минуты:

секунды) с оценкой б; t_{avr} и δ_{avr} – соответственно среднее время счета теста и средняя по группе тестов оценка максимально возможного отклонения от оптимума; n_x – число булевых переменных $x_{i,j}^k$ в подзадаче кластеризации; m_r – общее число ограничений в подзадаче кластеризации.

Размерности тестов: число булевых переменных $n_x = n^2 \cdot m$. Минимальное и максимальное значения $n_x = 30 \cdot 30 \cdot 2 = 1800$ и $n_x = 100 \cdot 100 \cdot 4 = 40000$; число ограничений $m_r = 2 \cdot n \cdot m + 2 \cdot n + m$, минимальное и максимальное, соответственно $m_r = 2 \cdot 30 \cdot 2 + 2 \cdot 30 + 2 = 182$ и $m_r = 2 \cdot 100 \cdot 8 + 2 \cdot 100 + 8 = 1808$.

Другими особенностями тестовых примеров, существенно влияющими на результаты и их оценки, являются параметры датчиков случайных чисел, генерирующие с равной вероятностью значения $c_{i,j}^k$ в диапазоне чисел от 0 до 100. Теоретически это может приводить к фактическим отклонениям оптимальных решений $\tilde{\Lambda}$ от λ (11) на десятки тысяч процентов. Для обеспечения сопоставимости результатов расчетов для одинаковых значений номера теста и числа заявок *n* использованы одинаковые значения $c_{i,j}^k$. Например, анализируя значения $\tilde{\Lambda}$ для первого теста при n = 30, m = 3 и m = 4, для которых все $c_{i,j}^k$ совпадают, непосредственно приходим к выводу о том, что решение по критерию быстродействия для трех приборов абсолютно лучше решения для четырех приборов (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

				<i>n</i> = 30			n = 50				
	№	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	t	0	0	0	0	0	1	2	1	2	2
m = 2	λ_{min}	78	102	71	86	74	79	73	82	72	63
	Ã	99	119	105	92	88	85	78	91	95	78
	δ	26,92	16,67	47,89	6,98	18,92	7,59	6,85	10,98	31,94	23,81
	t	3	3	3	4	5	42	38	15	14	10
<i>m</i> = 3	λ_{min}	54	70	51	59	54	55	49	56	49	42
	$\tilde{\Lambda}$	78	70	102	90	88	79	55	82	69	61
	δ	44,44	0,00	100,00	52,54	62,96	43,64	12,24	46,43	40,82	45,24
	t	19	26	31	28	13	0:14:33	0:02:19	0:04:05	0:00:47	0:03:09
m = 4	λ_{min}	42	56	41	46	42	43	38	43	38	34
	$\tilde{\Lambda}$	104	113	55	67	56	47	61	59	89	43
	δ	147,62	101,79	34,15	45,65	33,33	9,30	60,53	37,21	134,21	26,47
	t	13	31	20	62	53	0:50:34	0:01:14	0:15:26	0:11:36	0:12:58
<i>m</i> = 5	λ_{min}	36	47	35	38	37	35	30	36	32	28
	$\tilde{\Lambda}$	88	47	54	89	78	50	79	84	85	36
	δ	144,44	0,00	54,29	134,21	110,81	42,86	163,33	133,33	165,63	28,57
	t	0:03:27	0:00:53	0:01:58	1:08:32	0:00:31		0:10:48			0:08:52
<i>m</i> = 6	λ_{min}	33	46	31	35	33		27			24
0	$ ilde{\Lambda}$	74	46	122	111	64		63			85
	δ	124,24	0,00	293,55	217,14	93,94		133,33			254,17

Сводные результаты тестирования / Summary of test results

				<i>n</i> = 70			<i>n</i> = 100
	N⁰	1	2	3	4	5	1
	t	2	5	4	4	4	2
m = 2	λ_{min}	58	58	58	65	64	65
	$\tilde{\Lambda}$	64	62	60	72	76	75
	δ	10,34	6,90	3,45	10,77	18,75	15,38
	t	0:01:19	0:01:09	0:01:13	0:00:50	0:00:32	0:01:35
m = 3	λ_{min}	40	39	39	44	43	44
	$\tilde{\Lambda}$	63	48	62	69	63	64
	δ	57,50	23,08	58,97	56,82	46,51	45,45
	t	0:17:43	0:41:35	1:07:00	0:06:10	0:01:45	3:42:01
m = 4	λ_{min}	31	30	31	34	33	34
	$\tilde{\Lambda}$	50	49	44	53	51	57
	δ	61,29	63,33	41,94	55,88	54,55	67,65
	t	0:42:34	2:59:07	0:52:30	8:32:51	0:06:28	
m = 5	λ_{min}	25	25	25	28	27	
	$\tilde{\Lambda}$	58	25	47	39	47	
	δ	132,00	0,00	88,00	39,29	74,07	
	t					1:03:50	
<i>m</i> = 6	λ_{min}					23	
	$ ilde{\Lambda}$					47	
	δ					104,35	

Продолжение табл. 5

По меркам задач дискретного программирования сгенерированные тесты имеют значительные размерности. В силу отмеченной NP-полноты подзадачи кластеризации (5)–(11) с верхней оценкой числа вариантов решений 2^{n_x} такая оценка трудоемкости тестовых задач определяется, казалось бы, фантастической величиной 2^{40000} . Тем не менее программная реализация алгоритма поиска решений представленных выше задач относительно успешно с тестами справилась.

Как видно из табл. 5, предельное время счета теста составило боле 8,5 часов для n = 70 и m = 5 ($n_x = 24500$, $m_r = 845$, выделено заливкой в продолжении табл. 5).

Тесты, для которых решение за предельное время получить не удалось, также выделены заливкой в (незаполненных) графах времени счета.

Краткий анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Наилучшие (ближайшие к оптимальным) решения удалось получить практически во всех тестах для двух приборов. В этих случаях средние значения относительной оценки отклонения δ_{avr} лежат в интервале от 10 % (при n = 70) до 23 % (при n = 30). Среднее время счета находится в интервале от 5 до 0 секунд в той же последовательности. Тесты с тремя приборами определили интервал для δ_{avr} от 38 % при n = 50 до 52 % при n = 30. Среднее время счета составило для n = 30 -3,6 с, для n = 50 - 23,8 с, для n = 70 - 44 с, для n = 100 - 1 мин 35 с. В тестах с четырьмя приборами среднее отклонение составило 53–55 % для n = 50 и n = 70 и 73 % для n = 30. При этом существенно увеличивается время счета от 23 с для n = 30, 5 мин для n = 50, 27 мин для n = 70 и 3 ч 42 мин для n = 100. Решения тестовых задач с пятью приборами за установленный лимит времени удалось найти только для значений *n* 30, 50 и 70 при фатальном росте времени счета до предельного уровня в одном из тестов при n = 70 (см. табл. 5). С увеличение числа приборов фиксируется также в среднем снижение оценок близости к оптимумам δ_{avr} .

В целом полученные эмпирические оценки с учетом свойств тестовых задач можно признать вполне удовлетворительными. Проведенный анализ показал также целесообразность декомпозиции подзадачи кластеризации (5)–(11), что позволяет существенно снизить общее время счета без снижения оценки точности решения общей URPM-задачи.

Декомпозиция может быть осуществлена за счет разбиения множества приборов и последовательного решения модификаций условий (10) подзадачи (5)–(11) следующего вида:

$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} c_{i,j}^{k} x_{i,j}^{k} \le b^{k} \lambda, \quad k = \overline{1,m},$$

$$(18)$$

где

$$b^k \ge 0, \quad k = \overline{1, m}, \quad \mu \sum_{k=1}^m b^k = m.$$
 (19)

Выражение (18) удобно также интерпретировать в форме $\frac{1}{b^k} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{i,j}^k x_{i,j}^k \le \lambda$.

Выражения (19) априори задают свойства весовых коэффициентов кластеров.

Последовательное решение подзадач (5)–(9), (18), (19), (11) позволяет исходную задачу кластеризации (5)–(11) решать приближенно в несколько этапов. Вопервых, это не ухудшает оценок для исходной URPM-задачи; во-вторых, радикально снижает проблему трудоемкости, выявленную на тестовых примерах. В частности, на каждом из шагов можно положить значение m = 2, что обеспечивает минимальное время счета, а за счет подбора последовательности весовых коэффициентов $b^k \ge 0$, $k = \overline{1, m}$, — равномерность конечного разбиения на кластеры.

Заключение

Анализ быстродействия программной реализации предложенного подхода, а также эмпирические оценки близости к оптимальным конструируемых расписаний выявили его высокую эффективность.

В целом разработанный инструментарий непосредственно применим для решения ряда важнейших практических задач с получением доказываемых оптимумов. Примером одного из подобных применений может служить решение задачи оптимизации календарных графиков бурения скважин (да и обустройства в целом) крупных нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) [37]. Так, например, число кустов скважин одного из крупнейших НГКМ Западной Сибири составляет 60-70 (количество заявок), число используемых кустовых буровых установок 7-10 (количество приборов). Рассмотренная нами URPM-проблема и средства ее решения в данном контексте (с учетом размерности) позволяют найти точные, либо близкие к оптимальным по быстродействию (с оценками возможного отклонения) календарные графики бурения с определением маршрутов перемещений буровых, временных и ресурсных характеристик. По самым скромным оценкам это дает за счет сжатия календарных графиков не менее 10 % экономии при достижении плановых объемов меньшим числом буровых за плановый период, либо 10 % увеличения добычи за плановый период без увеличения числа буровых.

ЛИТЕРАТУРА

- An algorithm for the traveling salesman problem / J.D.C. Little, K.G. Murty, D.W. Sweeney, C. Karel // Operations Research. – 1963. – Vol. 11. – P. 972–989.
- 2. Беллман Р. Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере // Кибернетический сборник. – 1964. – № 9. – С. 219–222.
- Miliotis P. Integer programming approaches to the travelling salesman problem // Mathematical Programming. – 1976. – Vol. 10, iss. 3. – P. 367–378.
- Christofides N. Worst-case analysis of a new heuristic for the traveling salesman problem // Symposium on New Directions and Recent Results in Algorithms and Complexity. – Orlando: Academic Press, 1976. – P. 441.
- 5. Lin S., Kernighan B.W. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem // Operations Research. 1973. Vol. 21, iss. 2. P. 498–516.
- 6. Helsgaun K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic // European Journal of Operational Research. – 2000. – Vol. 126, iss. 1. – P. 106–130.
- Golden B.L., Skiscim C.C. Using simulated annealing to solve routing and location problems // Naval Research Logistics Quarterly. – 1986. – Vol. 33, iss. 2. – P. 261–279.
- Haist T., Osten W. An optical solution for the traveling salesman problem // Optics Express. - 2007. - Vol. 15, iss. 16. - P. 10473-10482. - doi: 10.1364/OE.15.010473.
- Javadian N., Alikhani M.G., Tavakkoli-Moghaddam R. A discrete binary version of the electromagnetism-like heuristic for solving traveling salesman problem // Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. – P. 123–130. – doi: 10.1007/978-3-540-85984-0 16.
- Bouzidi M., Riffi M.E. Adaptation of the harmony search algorithm to solve the travelling salesman problem // Journal of Theoretical & Applied Information Technology. – 2014. – Vol. 62, N 1. – P. 154–160.
- Balachandar S.R., Kannan K. Randomized gravitational emulation search algorithm for symmetric traveling salesman problem // Applied Mathematics and Computation. – 2007. – Vol. 192, iss. 2. – P. 413–421. – doi: 10.1016/j.amc.2007.03.019.
- Fiechter C.N. A parallel tabu search algorithm for large traveling salesman problems // Discrete Applied Mathematics. 1994. Vol. 51, iss. 3. P. 243–267. doi: 10.1016/0166-218X(92)00033-I.
- Verma O.P., Jain R., Chhabra V. Solution of travelling salesman problem using bacterial foraging optimisation algorithm // International Journal of Swarm Intelligence. – 2014. – Vol. 1, N 2. – P. 179–192. – doi: 10.1504/IJSI.2014.060243.
- Dorigo M., Gambardella L.M. Ant colonies for the travelling salesman problem // BioSystems. 1997. Vol. 43, iss. 2. P. 73–81. doi: 10.1016/S0303-2647(97)01708-5.
- Wong L.P., Low M.Y.H., Chong C.S. A bee colony optimization algorithm for traveling salesman problem // Second Asia International Conference on Modelling & Simulation, Kuala Lumpur, Malaysia, 13–15 May 2008. – Piscataway: IEEE, 2008. – P. 818–823. – doi: 10.1109/AMS.2008.27.
- Jati G.K. Evolutionary discrete firefly algorithm for travelling salesman problem. –Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. – P. 393–403. – doi: 10.1007/978-3-642-23857-4_38.
- Feng X., Lau F.C.M., Yu H. A novel bio-inspired approach based on the behavior of mosquitoes // Information Sciences. – 2013. – Vol. 233. – P. 87–108. – doi: 10.1016/j. ins.2012.12.053.
- Xue-Hui L., Ye Y., Xia L. Solving TSP with shuffled frog-leaping algorithm // Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA 2008. – Los Alamitos, 2008. – Vol. 3. – P. 228–232. – doi: 10.1109/ISDA.2008.346.
- An improved discrete bat algorithm for symmetric and asymmetric traveling salesman problems / E. Osaba, X.-S. Yang, F. Diaz, Π. Lopez-Garcia, R. Carballedo // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2016. – Vol. 48. – P. 59–71. – doi: 10.1016/ j.engappai.2015.10.006.
- Mzili I., Riffi M.E. Discrete penguins search optimization algorithm to solve the traveling salesman problem // Journal of Theoretical & Applied Information Technology. – 2015. – Vol. 72, N 3. – P. 331–336.
- Bouzidi A., Riffi M.E. Discrete cat swarm optimization to resolve the traveling salesman problem // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2013. – Vol. 3, iss. 9. – P. 13–18. – doi: 10.1109/WCCCS.2014.7107914.

- Agharghor A., Riffi M.E. Hunting search algorithm to solve the traveling salesman problem // Journal of Theoretical & Applied Information Technology. – 2015. – Vol. 74, N 1. – P. 120–129.
- Producer-scrounger method to solve traveling salesman problem / M.A.H. Akhand, Pintu Chnadra Shill, Md. Forhad Hossain, A.B.M. Junaed, K. Murase // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – 2015. – Vol. 7, N 3. – P. 29–36. – doi: 10.5815/ijisa.2015.03.04.
- Goldbarg E.F.G., Souza G.R. de, Goldbarg M.C. Particle swarm optimization algorithm for the traveling salesman problem [Electronic resource] // Traveling Salesman Problem. – 2008. – URL: http://www.intechopen.com/books/traveling_salesman_problem/particle_ swarm optimization algorithm for the traveling salesman problem (accessed: 07.04.2016).
- 25. Potvin J.Y. Genetic algorithms for the traveling salesman problem // Annals of Operations Research. 1996. Vol. 63, iss. 3. P. 337–370. doi: 10.1007/BF02125403.
- Ouaarab A., Ahiod B., Yang X.S. Discrete cuckoo search algorithm for the travelling salesman problem // Neural Computing and Applications. 2014. Vol. 24, iss. 7/8. P. 1659–1669. doi: 10.1007/s00521-013-1402-2.
- Clarke G., Wright J.W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points // Operations Research. – 1964. – Vol. 12, N 4. – P. 568–581.
- Костюк Ю.Л., Пожидаев М.С. Приближенные алгоритмы решения сбалансированной задачи к коммивояжеров // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2008. – № 1. – С. 106–112.
- Solution of a min-max vehicle routing problem / D. Applegate, W. Cook, S. Dash, A. Rohe // INFORMS Journal on Computing. – 2002. – Vol. 14, iss. 2. – P. 132–143. – doi: 10.1287/ijoc.14.2.132.118.
- Ren C. Solving min-max vehicle routing problem // Journal of Software. 2011. Vol. 6, N 9. – P. 1851–1856. – doi: 10.4304/jsw.6.9.1851-1856.
- 31. Алексеев А.О. Минимаксная задача М коммивояжеров // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1991. Т. 31, № 12. С. 1899–1905.
- 32. Svestka J.A., Huckfeldt V.E. Computational experience with an m-salesman traveling salesman algorithm // Management Science. 1973. Vol. 19, iss. 7. P. 790–799.
- Bektas T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures // Omega. 2006. Vol. 34, iss. 3. P. 209–219. doi: 10.1016/j.omega. 2004.10.004.
- Мезенцев Ю.А. Оптимизация расписаний параллельных динамических систем в календарном планировании // Информационные технологии. – 2008. – № 2. – С. 16–23.
- Мезенцев Ю.А. Оптимизация расписаний параллельно-последовательных систем в календарном планировании // Информационные технологии. – 2009. – № 6. – С. 35–41.
- Мезенцев Ю.А. Эффективные вычислительные методы решения дискретных задач оптимизации управления производственными процессами. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 275 с.
- 37. Мезенцев Ю.А. Метод бинарных отсечений и ветвлений целочисленного программирования // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2011. № 1 (16). С. 12–25.
- 38. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. М.: Мир, 1984. 496 с.

PROBLEMS AND OPTIMIZATION ALGORITHMS OF PARALLEL-SERIAL SYSTEMS SCHEDULES WITH UNDEFINED SERVICE ROUTES

Mezentsev Yu.A., Estraykh I.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

A new approach to solving problems of constructing optimal operating speed schedules for parallel-serial systems using a two-staged scheme including clustering and subsequent route determination is presented. Solutions to different types of routing problems with the minimax criterion are special cases of applying the developed tools. Formal definitions of the clustering and route design subproblems in the form of NP-difficult discrete programming problems are given. An approximate algorithm of problem solving is proposed. It is based on the problem decomposition into a subproblem optimal for partitioning a set of requests into subsets, with a load on the devices being uniform, and into a number of subproblems for optimizing scheduling jobs on the devices. Illustrative examples of applying the proposed approach are given. Empirical estimates of the accuracy and software performance are presented. The speed and accuracy of the developed algorithms are studied on randomly generated test examples in a wide range of dimensions. Possible practical applications of the proposed algorithms for scheduling the implementation of major industrial projects are described and further directions of the proposed approach development are identified.

Keywords: parallel-serial service system; undefined service routes; minimizing makespan; routing; clustering; traveling salesman problem.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-83-97

REFERENCES

- Little J.D.C., Murty K.G., Sweeney D.W., Karel C. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 1963, vol. 11, pp. 972–989.
- Bellman R. Primenenie dinamicheskogo programmirovaniya k zadache o kommivoyazhere [Dynamic programming treatment of the travelling salesman problem]. *Kiberneticheskii* sbornik – Cybernetic digest, 1964, no. 9, pp. 219–222.
- 3. Miliotis P. Integer programming approaches to the travelling salesman problem. *Mathematical Programming*, 1976, vol. 10, iss. 3, pp. 367–378.
- 4. Christofides N. Worst-case analysis of a new heuristic for the traveling salesman problem. *Symposium on New Directions and Recent Results in Algorithms and Complexity*. Orlando, Academic Press, 1976, p. 441.
- Lin S., Kernighan B.W. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. Operations Research, 1973, vol. 21, iss. 2, p. 498–516.
- Helsgaun K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic. European Journal of Operational Research, 2000, vol. 126, iss. 1, pp. 106–130.
- Golden B.L., Skiscim C.C. Using simulated annealing to solve routing and location problems. Naval Research Logistics Quarterly, 1986, vol. 33, iss. 2, pp. 261–279.
- Haist T., Osten W. An optical solution for the traveling salesman problem. *Optics Express*, 2007, vol. 15, iss. 16, pp. 10473–10482. doi: 10.1364/OE.15.010473
- Javadian N., Alikhani M.G., Tavakkoli-Moghaddam R. A discrete binary version of the electromagnetism-like heuristic for solving traveling salesman problem. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence.* Berlin, Heidelberg, Springer, 2008, pp. 123–130. doi: 10.1007/978-3-540-85984-0 16
- 10. Bouzidi M., Riffi M.E. Adaptation of the harmony search algorithm to solve the travelling salesman problem. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2014, vol. 62, no. 1, pp. 154–160.
- 11. Balachandar S.R., Kannan K. Randomized gravitational emulation search algorithm for symmetric traveling salesman problem. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, vol. 192, iss. 2, pp. 413–421. doi: 10.1016/j.amc.2007.03.019
- Fiechter C.N. A parallel tabu search algorithm for large traveling salesman problems. *Discrete Applied Mathematics*, 1994, vol. 51, iss. 3, pp. 243–267. doi: 10.1016/0166-218X(92)00033-I
- Verma O.P., Jain R., Chhabra V. Solution of travelling salesman problem using bacterial foraging optimisation algorithm. *International Journal of Swarm Intelligence*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 179–192. doi: 10.1504/IJSI.2014.060243
- Dorigo M., Gambardella L.M. Ant colonies for the travelling salesman problem. *BioSystems*, 1997, vol. 43, iss. 2, pp. 73–81. doi: 10.1016/S0303-2647(97)01708-5
- Wong L.P., Low M.Y.H., Chong C.S. A bee colony optimization algorithm for traveling salesman problem. *Second Asia International Conference on Modelling & Simulation*, Kuala Lumpur, Malaysia, 13–15 May 2008, pp. 818–823. doi: 10.1109/AMS.2008.27
- 16. Jati G.K. *Evolutionary discrete firefly algorithm for travelling salesman problem*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2011, pp. 393–403. doi: 10.1007/978-3-642-23857-4_38.
- 17. Feng X., Lau F.C.M., Yu H. A novel bio-inspired approach based on the behavior of mosquitoes. *Information Sciences*, 2013, vol. 233, pp. 87–108. doi: 10.1016/j.ins.2012.12.053

- Xue-Hui L., Ye Y., Xia L. Solving TSP with shuffled frog-leaping algorithm. *Eighth Interna*tional Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA 2008, vol. 3, pp. 228–232. doi: 10.1109/ISDA.2008.346
- Osaba E., Yang X.-S., Diaz F., Lopez-Garcia P., Carballedo R. An improved discrete bat algorithm for symmetric and asymmetric traveling salesman problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, vol. 48, pp. 59–71. doi: 10.1016/j.engappai.2015.10.006
- Mzili I., Riffi M.E. Discrete penguins search optimization algorithm to solve the traveling salesman problem. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2015, vol. 72, no. 3, pp. 331–336.
- Bouzidi A., Riffi M.E. Discrete cat swarm optimization to resolve the traveling salesman problem. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2013, vol. 3, iss. 9, pp. 13–18. doi: 10.1109/WCCCS.2014.7107914
- Agharghor A., Riffi M.E. Hunting search algorithm to solve the traveling salesman problem. Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 2015, vol. 74, no. 1, pp. 120–129.
- Akhand M.A.H., Pintu Chnadra Shill, Forhad Hossain Md., Junaed A.B.M., Murase K. Producer-scrounger method to solve traveling salesman problem. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 29–36. doi: 10.5815/ijisa.2015.03.04
- Goldbarg E.F.G., Souza G.R. de, Goldbarg M.C. Particle swarm optimization algorithm for the traveling salesman problem. *Traveling Salesman Problem*, 2008. Available at: http://www.intechopen.com/books/traveling_salesman_problem/particle_swarm_optimizatio n_algorithm_for_the_traveling_salesman_problem (accessed 07.04.2016)
- 25. Potvin J.Y. Genetic algorithms for the traveling salesman problem. *Annals of Operations Research*, 1996, vol. 63, iss. 3, pp. 337–370. doi: 10.1007/BF02125403
- Ouaarab A., Ahiod B., Yang X.S. Discrete cuckoo search algorithm for the travelling salesman problem. *Neural Computing and Applications*, 2014, vol. 24, iss. 7–8, pp. 1659–1669. doi: 10.1007/s00521-013-1402-2
- Clarke G., Wright J.W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 1964, vol. 12, no. 4, pp. 568–581.
- Kostyuk Yu.L., Pozhidaev M.S. Priblizhennye algoritmy resheniya sbalansirovannoi zadachi k kommivoyazherov [Approximate algorithms for solution the balanced problem of k travel salesman]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science, 2008, no. 1, pp. 106–112.
- Applegate D., Cook W., Dash S., Rohe A. Solution of a min-max vehicle routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 2002, vol. 14, iss. 2, pp. 132–143. doi: 10.1287/ijoc. 14.2.132.118
- Ren C. Solving min-max vehicle routing problem. *Journal of Software*, 2011, vol. 6, no. 9, pp. 1851–1856. doi: 10.4304/jsw.6.9.1851–1856
- Alekseev A.O. Minimaksnaya zadacha M kommivoyazherov [A minimax problem of M traveling salesmen]. Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki – Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1991, vol. 31, no. 12, pp. 1899–1905. (In Russian)
- 32. Svestka J.A., Huckfeldt V.E. Computational experience with an m-salesman traveling salesman algorithm. *Management Science*, 1973, vol. 19, iss. 7, pp. 790–799.
- Bektas T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 2006, vol. 34, iss. 3, pp. 209–219. doi: 10.1016/j.omega. 2004.10.004
- Mezentsev Yu.A. Optimizatsiya raspisanii parallel'nykh dinamicheskikh sistem v kalendarnom planirovanii [Optimization of schedules for dynamic parallel service systems]. *Informatsionnye tekhnologii – Information Technology*, 2008, no. 2, pp. 16–23.
- Mezentsev Yu.A. Optimizatsiya raspisanii parallel'no-posledovatel'nykh sistem v kalendarnom planirovanii [Optimization of schedules in parallel-serial systems for scheduling]. Informatsionnye tekhnologii – Information Technology, 2009, no. 6, pp. 35–41.
- Mezentsev Yu.A. Effektivnye vychislitel'nye metody resheniya diskretnykh zadach optimizatsii upravleniya proizvodstvennymi protsessami [Effective numerical methods for solution of discrete optimization problems management]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2015. 275 p.
- Mezentsev Yu.A. Metod binarnykh otsechenii i vetvlenii tselochislennogo programmirovaniya [Branch and binary cuts approach of integer programming]. Doklady Akademii

nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences, 2011, no. 1 (16), pp. 12–25.

 Phillips D., Garcia-Diaz A. Fundamental of network analysis. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1981 (Russ. ed.: Fillips D., Garsia-Dias A. Metody analiza setei. Moscow, Mir Publ., 1984. 496 p.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Мезенцев Юрий Анатольевич – родился в 1955 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры экономической информатики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: задачи и методы дискретного программирования. Опубликовано 55 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. Email: mezencev@corp.nstu.ru).

Mezentsev Yuriy Anatoliyovich (b. 1955) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor at the Computer Science in Economics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on problems and methods of discrete programming. He is author of 55 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: mezencev@corp.nstu.ru).



Эстрайх Игорь Викторович – родился в 1961 году, старший преподаватель кафедры экономической информатики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: задачи и методы дискретного программирования. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. Email: estrajx@corp.nstu.ru).

Estraykh Igor Viktorovich (b. 1961) – Senior Lecturer at the Computer Science in Economics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on problems and methods of discrete programming. (Address: Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: estrajx@corp.nstu.ru).

Статья поступила 04 марта 2016 г. Received March 04, 2016

To Reference:

Mezentsev Y.A., Estraykh I.V. Zadachi i algoritmy optimizatsii raspisanii parallel'noposledovatel'nykh sistem s neopredelennymi marshrutami obsluzhivaniya [Problems and optimization algorithms of parallel-serial systems schedules with undefined service routes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 83–97. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-83-97

2016

июль-сентябрь

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.282.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ОДНОКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ С ДВУХСТОРОННИМ ВЫБЕГОМ БОЙКА

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

Новосибирский государственный технический университет

Актуальность исследований обусловлена необходимостью создания точной математической модели динамики электромеханической колебательной системы с электромагнитным ударным приводом, наиболее полно отражающей состояние этой системы при динамических ударных воздействиях и взаимодействии с деформируемой средой. В качестве объекта исследований рассматривается электромагнитный ударный узел с двухсторонним свободным выбегом бойка, включающий в себя многомассовую колебательную систему с упругими связями, периодически возбуждаемую в магнитном поле катушки, получающей питание от источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления с естественной коммутацией. Разработана математическая модель динамики ударного узла, обеспечивающая широкие возможности в проведении всестороннего анализа электромагнитных и электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах. Модель учитывает нелинейные свойства магнитных материалов, потоки рассеяния, степень подвижности инерционных масс, свойства упругих связей, силы трения и сопровождается различного рода потерями энергии. Основу математической модели составляют дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной системы двигателя и механическое взаимодействие поступательно движущихся инерционных масс, полученные методом Лагранжа. Предложены алгоритм расчета и пример численной реализации модели с использованием стандартных программных комплексов, позволяющих наиболее просто интегрироваться для решения поставленных задач. На примере расчета периодических электромеханических процессов рассмотрены возможности модели в проведении всестороннего анализа рабочих процессов в переходных и квазиустановившихся режимах методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Выполнена верификация модели сравнением расчетных значений выходных показателей с результатами физического эксперимента.

Ключевые слова: математическая модель, электромагнитный ударный узел, электромагнитный двигатель, механическая колебательная система, упругие связи, метод Лагранжа, потери энергии.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-98-114

Введение

Электромеханические колебательные ударные системы с электромагнитным возбуждением используются в различных областях техники для реализации многих технологических процессов и производств [1–4].

Тенденции применения вариантов схем механизмов и машин с электромагнитным колебательным приводом подробно рассмотрены в работах [5, 6].

Как обладающие высокими энергетическими показателями следует выделить синхронные электромагнитные ударные машины, для которых частота механических колебаний ударной массы – бойка вследствие взаимодействия с магнитным полем намагничивающей катушки, кратна частоте питающей сети [7–12].

Предельные значения энергии удара в подобных системах, как правило, ограничены значениями допустимой импульсной мощности питающей сети. Сниже-

© 2016 Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

ние влияния работы ударного узла на питающую сеть и увеличение энергии удара возможно только за счет снижения частоты ударов [12, 13].

Перспективным направлением создания электромагнитных машин с повышенной энергией удара и пониженной частотой механических колебаний по отношению к частоте промышленной сети является создание ударных узлов, использующих рабочие циклы со свободным выбегом бойка [7, 12].

Как обладающий высокими значениями КПД при передаче энергии ударом особый интерес представляет рабочий цикл однокатушечной синхронной электромагнитной машины с двухсторонним свободным выбегом бойка [13, 14].

Несмотря на то что данный рабочий цикл хорошо известен и получил широкое практическое применение в ударном электроинструменте, выполненные исследования в вопросах электромеханического преобразования энергии и существующие рекомендации в повышении эффективности использования цикла в технологических процессах весьма ограниченны.

Существующие методики для расчета и проектирования электромагнитных машин основаны в своем большинстве на использовании статических подходов, что осложняет их использование в задачах анализа и синтеза [15–18].

Вызвано это, прежде всего, тем, что проведение динамического расчета связано с учетом большого числа взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости движения, частоты, нелинейности магнитных характеристик стали, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, различного рода внешних воздействий, потерь энергии и т.д. [19–25].

Между тем любая электромеханическая система, использующая в своем составе линейный электромагнитный двигатель, устройства для передачи энергии ударом, гашения вибраций и реверса ударной массы представляет собой сложную динамическую систему, определяющую конфигурацию, структуру ударного узла и обеспечивающую рациональное формирование ударного импульса.

По известным причинам упрощение связей ограничивает возможности анализа и синтеза подобных систем, работающих исключительно в квазиустановившихся режимах, где использование статических подходов неприемлемо.

Учитывая современные тенденции в вопросах энергосбережения, создание точной математической модели динамики электромагнитного ударного узла, наиболее полно отражающей взаимосвязи параметров всех его подсистем при динамических воздействиях, а также повышающей достоверность оценки энергетических характеристик при использовании в технологических процессах является решением актуальной задачи.

Целью работы является разработка математической модели динамики однокатушечного электромагнитного ударного узла с двухсторонним свободным выбегом бойка, учитывающей возможности проведения всестороннего анализа электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах при учете нелинейных взаимосвязей в магнитной системе, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, сопровождаемых различного рода потерями энергии.

1. Электромагнитный ударный узел с двухсторонним выбегом бойка

Конструктивная схема электромагнитного ударного узла с двухсторонним свободным выбегом бойка приведена на рис. 1.

Возвратно-поступательное движение ударной массы бойка 1 возникает в результате его периодического взаимодействия с магнитным полем катушки 2. Рабочий ход бойка 1 осуществляется под действием электромагнитных сил катушки 2 и упругих сил буферной пружины 3, аккумулирующей кинетическую энергию



бойка при обратном ходе и выполняющей его реверс. Обратный ход бойка 1 осуществляется под действием электромагнитных сил катушки 2 и частично за счет кинетической энергии бойка при отскоке от рабочего инструмента 4.





Рис. 2 – Расчетная динамическая схема механической системы

Fig. 2 – Calculated dynamic scheme mechanical system

Расположенные на одной оси цилиндрический боек l, магнитопровод 5 с размещенной внутри катушкой 2 образуют конфигурацию магнитной системы электромагнитного двигателя. Для гашения вибраций в промежутке между упорной поверхностью удерживающего устройства 6 и ударным узлом применяется виброизолирующее устройство в виде пружины 7 заданной жесткости. Усилие нажатия $F_{\rm H}$ через виброизолирующее устройство 7 обеспечивает устойчивую связь ударного узла с рабочим инструментом при возбуждении периодических ударных нагрузок и взаимодействии с деформируемой средой 8. Катушка 2 получает питание от однофазного источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления.

Полный рабочий цикл ударного узла осуществляется за время двух периодов напряжения питающего источника, что при частоте f = 50 Гц обеспечивает синхронную частоту ударов бойка $n_{\rm vg}$ и длительность времени рабочего цикла $t_{\rm u}$:

$$n_{\rm yg} = \frac{60 f}{2p} = 1500 \, \text{уд/мин}; \ t_{\rm II} = \frac{2p}{f} = 0,04 \, \text{c},$$

где 2*p* = 2 – число периодов напряжения в течение времени рабочего цикла.

Для реализации рабочего цикла с двухсторонним свободным выбегом бойка используется одна катушка, обеспечивающая разгон ударной массы бойка электромагнитными силами в двух направлениях. Свободный выбег бойка осуществляется за время бестоковой паузы в подаче импульсов тока, в течение которой боек, двигаясь по инерции, поочередно сжимает буферную пружину и наносит удар по рабочему инструменту [13].

При свободном выбеге расстояние, пройденное бойком от положения магнитного равновесия до ударного сечения рабочего инструмента, обозначим как h_1 , а расстояние от положения магнитного равновесия до контакта с буферной пружиной как h_2 (рис. 1). Рабочий цикл ударного узла выполняется при условии полной синхронизации положения бойка при его движении с импульсами напряжения, поступающими на катушку.

2. Методы решения

Механическая и магнитная подсистемы электромагнитного ударного узла связаны зависимостью электромагнитного усилия $f_{3M} = f(i, x_1)$ от величины протекающего тока *i* в катушке и координаты положения ударной массы бойка x_1 , а связь магнитной и электрической подсистемы – зависимостью величины потокосцепления $\psi = f(i, x_1)$ и в общем случае описывается уравнением электрического равновесия системы

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i, x_1)}{dt}, \qquad (1)$$

101

где u(t) – напряжение на обмотке катушки; r – активное сопротивление в цепи катушки.

Согласно установленным связям конструкции ударного узла (рис. 1) и действующим в системе обобщенным силам, соответствующим потенциальной энергии, энергии рассеяния и внешним воздействиям, на рис. 2 рассмотрена расчетная динамическая схема механической системы. Механическая колебательная система имеет в своем составе традиционные массоинерционные, упругие и диссипативные звенья. В качестве обобщенных координат принимаем линейные перемещения центра масс бойка x_1 массой m_1 , рабочего инструмента x_2 массой m_2 , электромагнитного двигателя x_3 массой m_3 и перемещение удерживающего устройства x_4 массой m_4 . Колебания системы в пространстве будут описываться зависимостью обобщенных координат $x_1...x_4$ от времени, отсчитываемых от положения устойчивого статического равновесия.

Уравнение движения механической системы получим на основании уравнений Лагранжа второго рода [26]:

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

где T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы; Φ – 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, соответ-

ствующие *i* -й обобщенной координате; x_i – обобщенные координаты; \dot{x}_i – обобщенные скорости; N – число степеней свободы механической системы.

При построении математической модели полагаем, что рассматриваемая механическая система имеет четыре степени свободы (N = 4). Принимая положение устойчивого статического равновесия за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии системы, последовательно определим величины, входящие в (2).

Кинетическая энергия механической системы для поступательно движущихся масс

$$T = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2} + \frac{m_4 \dot{x}_4^2}{2}$$

Потенциальная энергия упругих связей механической системы

$$\Pi = \frac{k_1 \left(x_1 - x_3\right)^2}{2} + \frac{k_2 x_2^2}{2} + \frac{k_3 \left(x_3 - x_2\right)^2}{2} + \frac{k_4 \left(x_4 - x_3\right)^2}{2}$$

где $k_1 ... k_4$ – статические коэффициенты жесткости упругих связей.

Диссипативная функция Рэлея

$$\Phi = \frac{b_1 \left(\dot{x}_1 - \dot{x}_3\right)^2}{2} + \frac{b_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{b_3 \left(\dot{x}_3 - \dot{x}_2\right)^2}{2} + \frac{b_4 \left(\dot{x}_4 - \dot{x}_3\right)^2}{2},$$

где $b_1 \dots b_4$ – коэффициенты вязкого трения упругих связей.

Обобщенные силы внешних воздействий и силы трения, соответствующие обобщенным координатам:

$$\begin{aligned} Q_{x_1} &= f_{\text{3M}}(i, x_1) - f_{\text{Tp}_{13}} \operatorname{sign} \dot{x}_1; \ Q_{x_2} = -f_{\text{Tp}_{23}} \operatorname{sign} \dot{x}_2; \\ Q_{x_3} &= -f_{\text{3M}}(i, x_1) + \left(f_{\text{Tp}_{13}} + f_{\text{Tp}_{23}} - f_{\text{Tp}_{34}}\right) \operatorname{sign} \dot{x}_3; \ Q_{x_4} = f_{\text{Tp}_{34}} \operatorname{sign} \dot{x}_4 - F_{\text{H}}, \end{aligned}$$

где $f_{3M}(i, x_1)$ – вынуждающая электромагнитная сила; $f_{Tp_{13}}$, $f_{Tp_{23}}$, $f_{Tp_{34}}$ – силы сухого трения скольжения; $F_{\rm H}$ – постоянная величина усилия нажатия.

В соответствие с уравнением (2), взяв частные производные от кинетической и потенциальной энергии и диссипативной функции Рэлея, а также производные по времени, учитывая внешние силы, силы трения и уравнение электрического равновесия (1), математическая модель динамического состояния колебательной электромеханической системы без учета ударного взаимодействия будет описываться следующими дифференциальными уравнениями:

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i, x_1)}{dt}; \qquad (3)$$

$$m_{\rm l} \frac{d^2 x_{\rm l}}{dt^2} + b_{\rm l} \left(\frac{dx_{\rm l}}{dt} - \frac{dx_{\rm 3}}{dt}\right) + k_{\rm l} (x_{\rm l} - x_{\rm 3}) = -f_{\rm Tp_{13}} \, \text{sign} \frac{dx_{\rm l}}{dt} + f_{\rm 3M}(i, \, x_{\rm l}) \,; \tag{4}$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) + k_2 x_2 - k_3 \left(x_3 - x_2\right) = -f_{\text{TP}_{23}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \quad (5)$$

$$m_{3} \frac{d^{2} x_{3}}{dt^{2}} - b_{1} \left(\frac{dx_{1}}{dt} - \frac{dx_{3}}{dt} \right) + b_{3} \left(\frac{dx_{3}}{dt} - \frac{dx_{2}}{dt} \right) - b_{4} \left(\frac{dx_{4}}{dt} - \frac{dx_{3}}{dt} \right) - k_{1} (x_{1} - x_{3}) + k_{3} (x_{3} - x_{2}) - k_{4} (x_{4} - x_{3}) = -f_{_{3M}} (i, x_{1}) + \left(f_{_{TP_{13}}} + f_{_{TP_{23}}} - f_{_{TP_{34}}} \right) \operatorname{sign} \frac{dx_{3}}{dt}; \quad (6)$$

$$m_{4} \frac{d^{2} x_{4}}{dt^{2}} + b_{4} \left(\frac{dx_{4}}{dt} - \frac{dx_{3}}{dt} \right) + k_{4} \left(x_{4} - x_{3} \right) = f_{_{TP_{34}}} \operatorname{sign} \frac{dx_{4}}{dt} - F_{_{H}}. \quad (7)$$

Под действием внешней периодической силы $f_{\rm 3M}(i, x_{\rm l})$ в механической системе возникают сложные колебания, являющиеся результатом наложения вынужденных и свободных колебаний системы. Отметим, что на участие разгона ударной массы бойка в магнитном поле катушки его ускоренное движение осуществляется за время, равное длительности протекающего тока. Выход бойка из положения магнитного равновесия (положение, симметричное относительно полюсной системы двигателя) определяет свободный выбег, синхронизированный по времени со временем бестоковой паузы в подаче импульсов тока.

Колебательные движения бойка выполняются в квазиустановившемся режиме, а наличие ограничителей движения в конструкции ударного узла не позволяют бойку выходить за установленные пределы.

$$x_{1}(t) = \begin{cases} 0 \quad \text{при } \delta^{+} = h_{1}; \\ h_{1} - \delta^{+} \quad \text{при } x_{1} \le h_{1}; \\ h_{1} + \delta^{-} \quad \text{при } x_{1} > h_{1}, \end{cases}$$
(8)

где δ^+ , δ^- – переменная величина воздушного рабочего зазора, образованного положением бойка относительно верхней и нижней полюсной системы катушки.

При нарушении синхронизации в подаче импульсов напряжения процесс движения бойка при выходе из положения магнитного равновесия ($\delta = 0$) может сопровождаться при убывающем токе в цепи катушки и характеризоваться электромагнитным торможением с потерями кинетической энергии в механической системе и соответственно энергии удара.

Согласованность в работе электрической, магнитной и механической подсистем является важным фактором в обеспечении эффективности работы ударного узла.

При подаче импульсов напряжения и протекающем в цепи катушки токе возбуждается магнитное поле, обусловливающее электромагнитную силу $f_{\rm 3M}(i, x_1)$, которая стремится уменьшить воздушный рабочий зазор и привести систему в состояние магнитного равновесия. Путем изменения параметров импульса напряжения можно влиять на рабочий процесс ударного узла. В случае с естественной коммутацией при питании от однофазного источника напряжения синусоидальной формы по однополупериодной схеме выпрямления длительность импульсов напряжения зависит от значения параметров индуктивности токовой цепи и формально описывается следующим приближенным неравенством:

$$u(t) \approx \begin{cases} U_m \sin \omega t \ \text{при} \ (n-1) \ 2\pi \le \omega t < n2\pi, \\ 0 \ \text{при} \ (2n-1) \ \pi \le \omega t \le n2\pi, \quad n = 1, 2..., \end{cases}$$
(9)

где n – число полных периодов напряжения; U_m – амплитуда напряжения; ω – циклическая частота источника.

При частично упругом ударе не вся кинетическая энергия бойка переходит рабочему инструменту и далее в деформируемую среду. Часть этой энергии возвращается обратно в колебательную систему. Количество энергии, переданное в деформируемую среду, и энергии, возвращаемой в механическую колебательную систему, напрямую зависит от свойств среды, параметров ударной системы и параметров импульса сил, воздействующих на среду.

При расчетах составляющие этих энергий с высокой долей вероятности можно учесть с помощью коэффициента отскока бойка

$$k_{\rm OT} = \frac{\overline{v_1}}{v_1}$$
,

где v_1 , $\overline{v_1}$ – скорости центра массы бойка в начале и конце частично упругого удара.

Кинетическая энергия, возвращаемая в механическую колебательную систему при отскоке бойка от рабочего инструмента,

$$T_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} k_{\rm ot}^2 \,.$$

Полезная работа, совершаемая ударным узлом, имеет импульсный характер и оценивается кинетической энергией бойка, переходящей рабочему инструменту при ударе,

$$T_2 = \frac{m_1 v_1^2}{2} \left(1 - k_{\rm ot}^2 \right) \,.$$

Среднюю силу удара можно определить через изменение импульса одной из сталкивающихся масс, например m_2 ,

$$N_1 = \frac{m_2(\overline{v}_2 - v_2)}{\tau_{_{\rm H}}},$$

где v_2 , \overline{v}_2 – скорости центра массы рабочего инструмента в начале и конце удара; τ_{μ} – длительность времени ударного импульса.

Полагая, что на момент удара в колебательной системе $v_2 \approx 0$, средняя сила удара будет равна

$$N_1 = \frac{m_2 \overline{v}_2}{\tau_{_{\rm H}}} \, . \label{eq:N1}$$

Учитывая упругое равновесие буферной пружины на большей части рабочего цикла и соответственно равенство нулю обобщенных сил упругости, линейно зависящих от координаты положения бойка, а также сопротивления движению, пропорционального его скорости, необходимо учесть, что составляющие этих сил будут описываться кусочно-линейными функциями:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0 & \text{при } x_1 < h_1 + h_2; \\ k_1(x_1 - x_3) & \text{при } x_1 \ge h_1 + h_2, \end{cases}$$
(10)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_{l}} = \begin{cases} 0 & \text{при } x_{l} < h_{l} + h_{2}; \\ b_{l} \left(\frac{dx_{l}}{dt} - \frac{dx_{3}}{dt} \right) & \text{при } x_{l} \ge h_{l} + h_{2}. \end{cases}$$
(11)

Последнее означает, что процесс рассеяния энергии в условиях вязкого трения, вызванного диссипативными силами упругих связей, может возникать только при работе сил этих связей. В конкретном случае характеристика силы упругости, являясь линейной на отдельных участках движения, оказывается в целом нелинейной.

При создании модели также предполагается, что сопротивление и упругие свойства деформируемой среды, оказываемые перемещению инструмента, зависят от жесткости и демпфирующих свойств введенных упругих связей.

Окончательный процесс движения следует рассматривать как результат наложения вынужденных, свободных колебаний и периодических ударных импульсов сил, обусловленных различного рода потерями энергии в электромеханической системе.

Уравнения (3)–(7) совместно с (8)–(11) позволяют рассматривать обобщенную математическую модель динамического состояния электромагнитного ударного узла с двухсторонним свободным выбегом бойка в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} & u(t) = ir + \frac{d\psi(i_{\mu}, x_{1})}{dt}; \\ & i = i_{\Pi} + i_{\mu}; \\ & m_{1} \frac{d^{2}x_{1}}{dt^{2}} = \begin{cases} \frac{m_{1}\overline{v}_{1}}{\tau_{u}} - f_{\tau p_{13}} \sin \frac{dx_{1}}{dt} + f_{9M}(i_{\mu}, x_{1}), \text{ если } \frac{dx_{1}}{dt} > 0, \\ & \Pi pu \ 0 \le x_{1} < h_{1} + h_{2}; \\ -\tilde{\lambda}_{1} - f_{\tau p_{13}} \sin \frac{dx_{1}}{dt} + f_{9M}(i_{\mu}, x_{1}), \Pi pu \ x_{1} \ge h_{1} + h_{2}, \text{ если } \frac{dx_{1}}{dt} > 0 \\ & -f_{\tau p_{13}} \sin \frac{dx_{1}}{dt} + f_{9M}(i_{\mu}, x_{1}), \Pi pu \ 0 \le x_{1} < h_{1} + h_{2}, \text{ если } \frac{dx_{1}}{dt} < 0; \end{cases} \\ & m_{2} \frac{d^{2}x_{2}}{dt^{2}} = -\frac{m_{2}\overline{v}_{2}}{\tau_{u}} - \tilde{\lambda}_{2} + \tilde{\lambda}_{3} - f_{\tau p_{23}} \sin \frac{dx_{2}}{dt}; \\ & m_{3} \frac{d^{2}x_{3}}{dt^{2}} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_{3} + \tilde{\lambda}_{4} - f_{9M}(i_{\mu}, x_{1}) + (f_{\tau p_{13}} + f_{\tau p_{23}} - f_{\tau p_{34}}) \sin \frac{dx_{3}}{dt}, \\ & \Pi pu \ 0 \le x_{1} < h_{1} + h_{2}; \\ & \tilde{\lambda}_{1} - \tilde{\lambda}_{3} + \tilde{\lambda}_{4} - f_{9M}(i_{\mu}, x_{1}) + (f_{\tau p_{13}} + f_{\tau p_{23}} - f_{\tau p_{34}}) \sin \frac{dx_{3}}{dt}, \\ & \Pi pu \ x_{1} \ge h_{1} + h_{2}; \end{cases} \\ & m_{4} \frac{d^{2}x_{4}}{dt^{2}} = -\tilde{\lambda}_{4} + f_{\tau p_{34}} \sin \frac{dx_{4}}{dt} - F_{H}, \end{cases} \end{aligned}$$

где
$$\tilde{\lambda}_1 = b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3); \quad \tilde{\lambda}_2 = b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2;$$

 $\tilde{\lambda}_3 = b_3 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_3 (x_3 - x_2); \quad \tilde{\lambda}_4 = b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_4 (x_4 - x_3);$

 $\frac{m_1 \overline{v_1}}{\tau_{\mu}}$, $\frac{m_2 \overline{v_2}}{\tau_{\mu}}$ – импульсы сил, действующие на массы тел в конце удара; i_{Π} – ток

потерь, вызванный вихревыми токами и гистерезисом; *i*_µ – намагничивающий ток.

Полученная система дифференциальных уравнений динамического состояния электромагнитного ударного узла (см. рис. 1) позволяет производить всесторонний анализ электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах, учитывающих нелинейность магнитной системы, ударные взаимодействия инерционных масс и свойства упругих связей в механической системе, обусловленных различного рода потерями энергии. Составляющая тока потерь i_{Π} может быть учтена по методике, рассмотренной в [27, 28].

3. Пример реализации математической модели

При реализации математической модели ударного узла с помощью решения полевой задачи определялись массивы значений опорных точек статических параметров потокосцепления $\psi(i, \delta)$ и электромагнитного усилия $f_{\Im}(i, \delta)$ в зави-

симости от тока и положения бойка, где $\delta = h_1 - x_1$. Для решения полевой задачи следует рекомендовать стандартные программы конечно-элементного моделирования FEMM, ELCUT или ANSYS [29–31]. Для решения динамической части задачи применялся аппарат структурного моделирования в среде Matlab Simulink [32].

В качестве примера на рис. 3–5 представлены результаты моделирования одного из вариантов модернизированного электромагнитного ударного узла со свободным выбегом бойка, идентичного по конструкции и размерам ударному узлу MC-18/36 [7].

В качестве исходных данных использовались следующие параметры модели. Масса инерционных элементов конструкции ударного узла: $m_1 = 0,32$ кг; $m_2 = 0,36$ кг; $m_3 = 3,78$ кг; $m_4 = 0,5$ кг. Коэффициенты жесткости и вязкого трения упругих связей: $k_1 = 20 \cdot 10^3$ H/м; $b_1 = 8$ H·c/м; $k_2 = 2 \cdot 10^6$ H/м; $b_2 = 0$; $k_3 = 16 \cdot 10^3$ H/м; $b_3 = 45$ H·c/м; $k_4 = 6 \cdot 10^3$ H/м; $b_4 = 20$ H·c/м. Силы сухого трения скольжения: $f_{\text{тр13}} = 4$ H; $f_{\text{тр23}} = 10$ H; $f_{\text{тр34}} = 5$ H. Сила нажатия $F_{\text{H}} = 350$ H.

Материал магнитопровода – электротехническая сталь 1212. Боек выполнен цельнометаллическим из конструкционной стали 40XH. Катушка изготовлена из медного проводника диаметром $d_{\rm np} = 2,2$ мм с количеством витков w = 220 и активным сопротивлением r = 0,36 Ом. Питание цепи катушки осуществляется от однофазного источника напряжения с действующим значением U = 36 В по однополупериодной схеме выпрямления.

На рис. 3 показаны расчетная область модели и результаты построения картины поля линий магнитного потока.

Расчет статических параметров $\psi(i, \delta)$ и $f_{_{3M}}(i, \delta)$ осуществлялся через интегральные характеристики поля в режиме параметров блока по средневзвешенному тензору натяжения. Для визуализации процесса расчета статических параметров на рис. 4 приведены зависимости $\psi(i, \delta)$ и $f_{_{3M}}(i, \delta)$, при построении которых использовался массив значений (15×17), содержащий по 255 опорных точек.



Рис. 3 – Результаты построения картины поля линий магнитного потока
 Fig. 3 – The results of constructing a picture of the field of magnetic flux lines

При разработке алгоритма расчета средствами MatLab Simulink задание функции двух аргументов статических параметров модели выполнялось с помощью блоков двухмерных таблиц.



Рис. 4 – Пример расчета статических параметров: *a* – потокосцепления $\psi = f(i, \delta)$; *б* – электромагнитного усилия $f_{_{3M}} = f(i, \delta)$ *Fig.* 4 – Example of calculating statistical parameters: *a* – flux $\psi = f(i, \delta)$; *b* – electromagnetic force $f_{_{3M}} = f(i, \delta)$

На рис. 5 приведены временные диаграммы процесса включения электромагнитного ударного узла, где приняты следующие обозначения: u – напряжение на катушке; i – ток в цепи катушки; x_1 – рабочий ход бойка; v_1 – скорость бойка.



Рис. 5 – Временные диаграммы процесса включения электромагнитного ударного узла



Диаграммы (рис. 5) отражают переходный процесс ударного узла за время двух рабочих циклов, что соответствует по времени четырем периодам напряжения. Далее работа ударного узла осуществляется в квазиустановившемся режиме.

Результаты моделирования оценивались сравнением расчетных значений показателей, энергии удара – A_{yg} , действующего значения тока – I, потребляемой – P_1 и полезной – P_2 мощности, КПД и соѕ ϕ с показателями, полученными на ϕ и-

зической модели (таблица).

		-				
Значения	L.A	P. BT	P_{2} , BT	<i>А</i>	кпл %	cosφ
показателя	-,	-1,	,	удэрч	танд, 70	
Расчет	20,7	276	113,5	4,54	0,41	0,402
Эксперимент	21,7	289	116,9	4,68	0,4	0,39

Сравнение результатов моделирования Comparison of simulation results

Расхождение расчетных значений с экспериментальными не превышает 5...8 %, что позволяет сделать вывод об адекватности созданной модели.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показывает хорошее соответствие количественных значений показателей, что стало возможным только при точном учете аналогов механических характеристик модели ударного узла, работающего в условиях вязкого трения и трения скольжения.

Заключение

Разработана математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним свободным выбегом бойка, наиболее точно отражающая взаимосвязи в электромеханической
системе при возбуждении периодических ударных нагрузок и взаимодействии с деформируемой средой.

Особенностью модели является возможность учета взаимосвязанных электромеханических процессов с большим набором входных параметров в переходных и квазиустановившихся режимах, учитывающих магнитные свойства материалов, потоки рассеяния, степень подвижности инерционных масс, свойства упругих связей, коэффициента отскока и т. д., сопровождаемых различного рода потерями энергии.

Выполнена верификация математической модели сравнением значений выходных показателей, полученных с помощью разработанного алгоритма расчета методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink, с результатами физического эксперимента. Расхождение расчетных значений интегральных показателей модели для квазиустановившегося режима работы ударного узла соответствует погрешности 5...8 %, общепринятой для инженерных расчетов.

Установлено, что точность при динамических расчетах подобных систем в существенной степени определяется точностью воспроизведения аналогов механических характеристик модели, и в особенности это касается учета процессов, связанных с рассеянием энергии в упругих связях и потерями от сухого трения.

Полученные результаты открывают перспективы для модернизации существующих и создания новых математических моделей однокатушечных, двухкатушечных и многокатушечных электромагнитных ударных узлов, представляющих в большинстве случаев сложную и многофакторную динамическую систему с большим набором связанных переменных.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В. Электромагнитные прессы. Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
- 2. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
- 3. 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.
- Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
- 5. Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. – 220 с.
- 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.
- 7. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. Новосибирск: Наука, 1970. 260 с.
- 8. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 256–259.
- 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 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.
- 12. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // Электротехника. 2014. № 12. С. 45–49.
- Нейман Л.А. Анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машине с двухсторонним выбегом бойка // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 112–116.
- Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А. Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. Новосибирск: Издво НГТУ, 2011. С. 106–120.
- 15. **Мошкин В.И.** Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 4. – С. 93–96.
- 16. Оптимизация геометрии линейных электромагнитных двигателей с использованием конечноэлементного моделирования магнитного поля / Ю.Г. Соловейчик, В.Ю. Нейман, М.Г. Персова, М.Э. Рояк, Ю.Б. Смирнова, Р.В. Петров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 24–28.
- 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.
- 18. 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.
- Усанов К.М., Каргин В.А., Волгин А.В. Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2008. № 1. С. 86–87.
- 20. Татевосян А.А., Татевосян А.С. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325, № 4. С. 121–132.
- 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.
- 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.
- 23. 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.
- Расчет динамики включения электромагнита постоянного тока / Ю.А. Бахвалов, Б.Н. Лобов, Г.В. Могилевский, А.Г. Никитенко // Электротехника. – 1982. – № 1. – С. 48–51.
- 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.
- 26. Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1983. 576 с.
- 27. 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.
- 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.

- 29. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. М.: Академия, 2005. 336 с.
- 30. Андреева Е.Г., Семина И.А., Татевосян А.В. Исследование поля магнитной системы открытого типа с помощью программного пакета ANSYS // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 1. С. 173–175.
- 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. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в МАТLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

A DYNAMIC MODEL OF THE IMPACT SINGLE-INDUCTOR SYNCHRONOUS ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH TWO-SIDE HEAD RUNNING-OUT

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Creating an accurate mathematical model of an electromechanical oscillatory system with an electromagnetic impact drive is an actual research problem. Such a model most completely reflects the electromechanical system state under dynamic impact actions with respect to its interaction with the deformed medium. The research is focused on the electromagnetic impact unit with two-side head running out. Such an impact unit consists of a multi-mass oscillatory system with spring linkages excited by the inductor periodic magnetic field. The inductor is powered by 50 Hz AC voltage through a self-switched half-period rectifier. The developed mathematical model of the impact unit dynamic mode provides wide capabilities of the complete electromagnetic and electromechanical process analysis in different operation modes. The model takes into account magnetic material non-linear properties, leakage fluxes, an inertial mass mobility degree, spring linkage properties and friction forces accompanied by a power loss. The proposed mathematical model consists of differential equations describing the electrical balance of the motor non-linear system and translating inertial mass mechanical interaction. These equations were obtained by the Lagrange method. The proposed algorithm for numerical calculations permits using standard software packages.

The example of periodic electromechanical process calculation shows the model capabilities of a complete analysis of transient and quasi-stationary processes by the MatLab Simulik structural modeling tools. The model was verified by comparing calculated values with physical experiment data.

Keywords: mathematical model; electromagnetic impact unit; electromagnetic motor; mechanical oscillatory system, spring linkages; Lagrange methods; power loss.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-98-114

REFERENCES

- 1. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
- Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drive for pulse technology and vibroimpulsnyh]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
- 3. 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 with autonomous-powered]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2006. 284 p.
- 4. Aksyutin V.A., Neyman L.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. Pressovoe oborudovanie s lineinym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoi sborki i shtampovki melkikh izdelii [Pressure equipment with a linear electromagnetic drive for the mechanization of technological processes shock assembly and stamping small parts]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.

- Moshkin V.I., Neiman V.Yu., Ugarov G.G. *Impul'snye lineinye elektromagnitnye dvigateli* [Pulsed electromagnetic linear motors]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2010. 220 p.
- 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.
- Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovanie elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 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.
- 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.
- 11. 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. Lineinye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny dlya nizkochastotnykh udarnykh tekhnologii [Linear synchronous electromagnetic machine for lowfrequency percussion technology]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 45–49. (In Russian)
- Neyman L.A. Analiz protsessov energopreobrazovaniya v odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashine s dvukhstoronnim vybegom boika [Analysis of energy transformation processes in the single coil of an electromagnetic synchronous machine with double Coast striker]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 112–116.
- Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. [Structural analysis of synchronous electromagnetic percussion machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy*: sbornik nauchnykh trudov [Automated electromechanical systems: collection of scientific papers]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 106–120.
- 15. Moshkin V.I. Sravnenie magnitnykh tsiklov impul'snogo lineinogo elektromagnitnogo dvigatelya s uchetom moshchnosti poter' v ego obmotke [Comparing magnetic pulse cycles linear electromagnetic motor based on the power loss in its winding]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 93–96. (In Russian)
- Soloveichik Yu.G., Neyman V.Yu., Persova M.G., Royak M.E., Smirnova Yu.B., Petrov R.V. Optimizatsiya geometrii lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei s ispol'zovaniem konechnoelementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Optimization of geometry linear electromagnetic motors using finite element modeling of the magnetic field]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika Russian Electromechanics*, 2005, no. 2, pp. 24–28. (In Russian)
- 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.
- Usanov K.M., Kargin V.A., Volgin A.V. Otsenka effektivnosti energopreobrazovanii v elektromagnitnoi udarnoi mashine s uprugim vozvratnym elementom [Evaluating the effectiveness of energy conversion in the electromagnetic shock machine with an resilient return element]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2008, no. 1, pp. 86–87.
- 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)
- 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.
- 22. 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.
- 23. 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.
- Bakhvalov Yu.A., Lobov B.N., Mogilevskii G.V., Nikitenko A.G. Raschet dinamiki vklyucheniya elektromagnita postoyannogo toka [Calculation inclusion DC electromagnet dynamics]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 1982, no. 1, pp. 48–51. (In Russian)
- 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.
- 26. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 576 p.
- 27. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovode [Modelling of processes in the electromagnetic vibration transducer with energy losses in the yoke]. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 73–78.
- 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.
- 29. 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.
- 30. Andreeva E.G., Semina I.A., Tatevosyan A.A. Issledovanie polya magnitnoi sistemy otkrytogo tipa s pomoshch'yu programmnogo paketa ANSYS [Investigation of the magnetic

field open-type system using ANSYS software package]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin – Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2014, no. 1, pp. 173–175.

- 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.
- 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и технологии. Опубликовано более 90 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna (b. 1966) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor at the electrotechnological unit department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machine and technologies. She is the author of 90 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: 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. Email: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich (b. 1960) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the department of theoretical fundamentals of electrical engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests include power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 200 scientific and educational works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: nv.nstu@ngs.ru).

Статья поступила 03 июля 2016 г. Received July 03, 2016

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s dvukhstoronnim vybegom boika [Dynamical model of the impact single-inductor synchronous electromagnetic machine with head two-side 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. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-98-114

2016

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ июль–сентябрь

№ 3 (32)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.282.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕХФАЗНЫХ ТРЕХУРОВНЕВЫХ КВАЗИИМПЕДАНСНЫХ ИНВЕРТОРОВ Т-ТИПА

Т.Е. Шульц¹, А.А. Гусев²

¹Новосибирский государственный технический университет ²Черниговский национальный технологический университет

В данной работе проведен анализ электромагнитных процессов схем трехфазных трехуровневых импедансных инверторов Т-типа и квази-Т-типа с блокирующими диодами в установившемся режиме работы. Данный вид инверторов применим в электрогенерирующих установках с использованием солнечных батарей. Из проведенного анализа были сформированы рекомендации по выбору параметров схем импедансных инверторов Ттипа. Отмечено, что данный вид инверторов может работать в режимах как повышения, так и понижения выходного напряжения, а также устойчив к режимам короткого замыкания стоек. Кроме того, проведен сравнительный анализ данных схем, позволяющий утверждать, что несмотря на большее число компонентов инвертора квази-Т-типа, в целом, при одинаковых заданных параметрах формирования выходного напряжения и тока намагничивания катушек индуктивности инверторов, параметры пассивных компонентов (конденсаторов и индуктивностей) этих схем равны. Отмечено, что схема инвертора квази-Т-типа потребляет непрерывный входной ток, что положительно сказывается на характеристиках совместной работы импедансного инвертора квази-Т-типа и солнечных батарей.

Ключевые слова: солнечные батареи, инвертор, импедансный инвертор, расчет параметров.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-115-127

Введение

В последние годы наблюдается усиленный рост использования возобновляемых источников энергии. Если в 2010 году выработка электрической энергии от возобновляемых источников энергии составляла 16,7 % от общего мирового потребления электроэнергии, то уже в 2014 она составила около 26,4 %. К концу 2013 года установленная мощность электрогенерирующих установок на ветрогенераторах и солнечных батарей (СБ) достигла 318 ГВт и 139 ГВт соответственно [1, 2]. Традиционно для преобразования выработанной электрической энергии от СБ используются полупроводниковые инверторы. На данный момент представлено большое количество топологий инверторов [3, 4], среди них наиболее распространенными являются двухуровневые инверторы тока и напряжения. Отличительной особенностью данных схем является то, что они не способны увеличивать уровень выходного напряжения относительно уровня входного напряжения более чем в 2 раза. Для того чтобы решить эту проблему, используют промежуточные двухзвенные преобразователи энергии. Однако такое решение получается более дорогостоящим из-за схемотехнического усложнения, а также экономически невыгодным ввиду наличия двухзвенности преобразования энергии.

Относительно недавно, в 2003 году, были предложены схемы на основе импедансных цепей (ИЦ) [5, 6] и двухуровневых инверторов, те импедансные инверторы, призванные увеличивать коэффициент усиления инверторов. Эти схемы выгодно отличались от промежуточных преобразователей тем, что ИЦ работала

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00340 мол а.

^{© 2016} Т.Е. Шульц, А.А. Гусев

за счет ключей инвертора и не требовала дополнительной системы управления. Еще одним преимуществом таких схем является то, что им не страшен режим короткого замыкания стоек инвертора, а также то, что схема может работать как в понижающем, так и в повышающем режиме.

В работах [7–12] представлено большое количество схем импедансных инверторов, а в [13] было предложено использовать в ИЦ вместо обычных катушек индуктивности магнитосвязанные индуктивности. В этой работе продемонстрировано, что это техническое решение позволило уменьшить потери в сердечнике и в намотке, а также размер сердечника и число витков катушки, тем самым улучшив уже имеющиеся схемы. Затем на основе магнитосвязанных индуктивностей и трансформаторов было предложено еще несколько новых схем импедансных инверторов. Примером таких схем может служить импедансный инвертор Т-типа представленный в [14, 15].



Puc. 1 – Трехуровневые трехфазные импедансные инверторы Т-типа с блокирующими диодами (*a*); эквивалентная схема магнитосвязанной индуктивности (*б*)
 Fig. 1 – There level there phase Neutral Point Clamped (NPC) T-source inverters (*a*); equivalent circuit of coupled inductors (*b*)

Наряду с имеющимися двухуровневыми импедансными инверторами были предложены трехуровневые импедансные инверторы с блокирующими диодами. Эти схемы унаследовали преимущества традиционных трехуровневых инверторов [16–18], такие как улучшенное качество выходного напряжения, большая номинальная мощность инвертора и уменьшенное рабочее напряжение на силовых ключах инвертора. Например, в статьях [19, 20] была представлена, а затем запатентована в [21] схема трехуровневого импедансного инвертора Т-типа с блокирующими диодами (рис. 1, а). В дополнение была представлена схема импедансного инвертора квази-Т-типа (рис. 1, а). Основным отличием данных топологий является наличие у импедансного инвертора квази-Т-типа дополнительных конденсаторов C_{12} и C_{22} (рис. 1, *a*, отмечены серым цветом), которые обеспечивают потребление из источника непрерывного входного тока. В представленных работах производилось описание схем и режимов их работы. Однако не было описано методики, посвященной практическим рекомендациям по выбору компонентов для таких схем. Также не проводился сравнительный анализ схем импедансного инвертора Т-типа и квази-Т-типа с точки зрения параметров их пассивных компонентов. Учитывая свойства инверторов Т-типа, а также известные свойства СБ,

вышеобозначенный тип импедансных инверторов может быть широко использован в схемах генерирования электрической энергии на базе СБ. В этой связи возникает необходимость их детального анализа для выявления их функциональных характеристик.

1. Анализ установившегося режима работы инвертора

Проведем анализ электромагнитных процессов в установившемся режиме. В расчетах будут использованы следующие условные обозначения: u(t) = u – мгновенное значение переменной; U_{cp}^T – среднее значение переменной за период времени T; U – амплитудное значение переменной. Для дальнейшего анализа примем так же, что импедансные цепи симметричны и $C_{11} = C_{21}$, $C_{12} = C_{22}$, $L_{11} = L_{21}$, $L_{12} = L_{22}$. На рис. 2, a–e показаны эквивалентные схемы двух состояний стоек инверторов: активное состояние и состояние короткого замыкания (K3). В активном состоянии ключи инвертора работают как у обычного трехуровневого инвертора. В состоянии К3 все ключи инвертора открываются, создается короткое замыкание стоек инвертора. Магнитосвязанная индуктивность [22,23] для расчетов заменялась на идеальный трансформатор и индуктивность намагничивания, как показано на рис. 1, δ , где n – это коэффициент трансформации. Временные интервалы, используемые на рис. 2, d, обозначают следующее: T_{K3} – временной интервал состояния K3; T_a – временной интервал активного состояния; T – период коммутации.



Рис. 2 – Эквивалентные схемы инвертора Т-типа: активное состояние (*a*); состояние короткого замыкания стоек (б). Эквивалентные схемы инвертора квази-Т-типа: активное состояние (*в*); состояние короткого замыкания стоек (*г*). Идеализированные временные диаграммы установившегося режима работы трехуровневых импедансных инверторов (*д*)

Fig. 2 – T-source inverter equivalent circuits: active state (*a*); shoot-through state (*b*). Quasi-T-source inverter equivalent circuits: active state (*c*); shoot-through state (*d*). Idealized time diagrams of the 3L T-source inverters (*e*)

Напряжение на конденсаторе U_{C11} , амплитудное значение напряжения в звене постоянного тока U_{dc} и коэффициент усиления *В* определяются из условия баланса напряжений на индуктивностях:

$$U_{C11} = \frac{U_{\text{BX}}}{2} \frac{(1-D)}{1-(n+1)D}, \quad D = \frac{T_S}{T},$$
(1)

$$U_{dc} = U_{\rm BX} \frac{1}{1 - (n+1)D} = U_{dc1} + U_{dc2} , \qquad (2)$$

$$B = \frac{U_{dc}}{U_{\rm BX}} = \frac{1}{1 - (n+1)D} \,. \tag{3}$$

Уравнения (1)–(3) справедливы для обеих схем. Напряжение на конденсаторе U_{C12} определяется подобным образом:

$$U_{C12} = \frac{U_{\text{BX}}}{2} \frac{nD}{1 - (n+1)D}.$$
 (4)

2. Расчет параметров импедансного инвертора Т-типа

Временные диаграммы токов и напряжений пассивных компонентов схемы на рис. 2, *д* приведены для того, чтобы уточнить принцип работы инвертора. На рисунке видно, что высокая частота ШИМ становится причиной появления высокочастотных пульсаций. Очевидно, что значения пассивных компонентов можно рассчитать, определив уровень высокочастотных пульсаций токов и напряжений. Для этого необходимо оценить средние значения токов и напряжений, а также размах их пульсации. Предполагая, что схема работает без потерь, можно утверждать, что средние значения входной и выходной мощностей равны

$$P_{\rm BX\,cp}^T = P_{dc\,cp}^T = P \,. \tag{5}$$

Из уравнения (5) определяем средние значения входного тока $(I_{Bx cp}^T)$ и тока (I_{dccp}^{Ta}) :

$$I_{\rm BX\,cp}^{T} = \frac{P}{U_{\rm BX}(1-D)} = B I_{dc\,cp}^{Ta} \,, \tag{6}$$

$$I_{dc\,cp}^{Ta} = \frac{P}{U_{\rm BX}B(1-D)}.\tag{7}$$

Для интервала КЗ (*T*_{K3}) (см. рис. 2, б) можно записать следующее выражение:

$$L_{M11} \frac{di_{M11}}{dt} = U_{L11\,\text{cp}}^{T_{\text{K3}}} = n U_{C11\,\text{cp}}^{T_{\text{K3}}}.$$
(8)

Запишем уравнение для токов импедансного инвертора Т-типа на интервале T_a (см. рис. 2, *a*):

$$i_{\rm BX} = i_{M11} - \frac{i_{dc}}{n}$$
 (9)

Используя уравнения (5) и (9), получаем

$$\frac{1}{T} \int_{T_a} U_{\text{BX}} \left(i_{M11} - \frac{i_{dc}}{n} \right) dt = \frac{1}{T} \int_{T_a} i_{dc} U_{\text{BX}} \cdot B \cdot dt.$$
(10)

Тогда можно выразить среднее значение тока индуктивности намагничивания в активном состоянии (T_a) :

$$I_{M11\,\text{cp}}^{T_a} = I_{dc\,\text{cp}}^{T_a} \left(B + \frac{1}{n} \right). \tag{11}$$

Запишем условие для режима предельно непрерывного тока:

$$\frac{\Delta I_{M11}}{2} = I_{M11cp}^{T_{K3}} \,. \tag{12}$$

Поскольку ток в индуктивности будет непрерывным, можно записать, что $I_{M11\,cp}^{T_a} = I_{M11cp}^{T_{K3}}$ и, используя (8), (11) и (12), окончательное выражение для индуктивности L_{M11} записать как

$$L_{M11} \ge \frac{n^2 U_{\text{BX}}^2 DT(1-D)}{4P(1+n)(1-(n+1)D)}.$$
(13)

Рассчитанное по формуле (13) значение будет соответствовать минимальному допустимому значению индуктивности для нормальной работы схемы. Для уменьшения пульсаций тока величина индуктивности должна быть увеличена.

Для определение емкости, необходимо определить пульсации тока конденсатора. Ток, протекающий через конденсатор C_{11} на протяжении T_a , определяется как:

$$I_{C11\,\text{cp}}^{T_a} = C_{11} \frac{du_{C11}}{dt} \,, \tag{14}$$

Пульсации напряжения на конденсаторе С11 можно определить, как

$$\Delta U_{C11} \le k_1 \cdot U_{C11\,\text{cp}}^{I_a},\tag{15}$$

где k_1 – коэффициент пульсации напряжения конденсатора C_{11} .

Ток конденсатора C_{11} в течение активного интервала (T_a) выражается как

$$I_{C11cp}^{T_a} = I_{Bxcp}^{T_a} - I_{dc\,cp}^{T_a}.$$
 (16)

Наконец, из (1), (7), (14), (15) и (16) может быть получено выражение величины емкости конденсатора C_{11} :

$$C_{11} \ge \frac{2PTD(1-(n+1)D)(n+1)}{k_1 U_{\text{BX}}^2(1-D)}.$$
(17)

3. Расчет параметров импедансного инвертора квази-Т-типа

Для оценки величины пассивных компонентов импедансного инвертора квази-Т-типа также был проведен анализ установившегося режима работы инвертора. Единственное отличие заключалось в том, что в импедансном инверторе квазиТ-типа обеспечивается работа в режиме непрерывного входного тока наряду с обеспечением режима непрерывного тока индуктивности намагничивания.

Следующие уравнения определяют напряжение и ток индуктивности намагничивания на интервале КЗ (T_{K3}) для импедансного инвертора квази-Т-типа (см. рис. 2, *г*):

$$L_{M11}\frac{di_{M11}}{dt} = U_{L11cp}^{T_{K3}} = n \cdot U_{C11cp}^{T_{K3}}, \qquad (18)$$

$$I_{M11cp}^{T_{K3}} = \frac{I_{C12cp}^{T_{K3}} + I_{C11cp}^{T_{K3}}}{n} \,. \tag{19}$$

Уравнения для активного состояния (*T_a*) аналогичны (см. рис. 2, *в*):

$$I_{M11cp}^{T_a} = \frac{I_{dc\,cp}^{I_a}}{n} + I_{dc\,cp}^{T_a} + I_{C12\,cp}^{T_a} + I_{C11cp}^{T_a},$$
(20)

$$I_{C\,\mathrm{cp}}^{T_a} \cdot T_a = I_{C\,\mathrm{cp}}^{T_{\mathrm{K3}}} T_S \,, \tag{21}$$

где $I_{C\,cp}^{T_a}$ – средний ток конденсатора на интервале активного состояния; $I_{C\,cp}^{T_{\kappa_3}}$ – средний ток конденсатора на интервале КЗ.

Принимая во внимание то, что ток индуктивности намагничивания непрерывный $(I_{M11cp}^{T_a} = I_{M11cp}^{T_{3K}})$ и используя (7), (18), (19), (20), и (21), средний ток индуктивности намагничивания выражается как

$$I_{M11 cp}^{T_{K3}} = \frac{P}{U_{BX}} \left(\frac{1+n}{n}\right).$$
(22)

Наконец, используя (1), (12), (18), и (22), можно записать выражение для выбора величины индуктивности намагничивания L_{M11} :

$$L_{M11} \ge \frac{n^2 \cdot U_{BX}^2 \cdot D \cdot T \cdot (1-D)}{4 \cdot P \cdot (1+n)(1-(n+1) \cdot D)}.$$
(23)

Можно заметить, что выражение (23) для импедансного инвертора квази-Ттипа совпадает с выражением (13) для инвертора Т-типа.

Для того чтобы определить величину емкостей конденсаторов, необходимо определить уровень пульсации напряжения на этих конденсаторах. Ток в конденсаторе на интервале T_a определяется, как в (14). Пульсации напряжения на конденсаторе C_{11} можно найти из (15).

Среднее значение входного тока $\left(I_{\text{вх ср}}^{T}\right)$ определяется как

$$I_{\rm BX\,cp}^T = P/U_{\rm BX} \ . \tag{24}$$

Среднее значение тока $i_{dc} \left(I_{dc \, cp}^{T_a} \right)$ инвертора квази-Т-типа то же, что и у инвертора Т-типа и находится из выражения (7).

Следующие выражения справедливы для активного интервала (T_a) работы импедансного инвертора квази-Т-типа (рис. 2, *в*):

$$I_{\text{Cllcp}}^{T_a} = I_{\text{Bx cp}}^{T_a} - I_{dc \text{ cp}}^{T_a}, \qquad (25)$$

$$I_{C11cp}^{T_a} = \frac{P}{U_{BX}} \frac{D \cdot n}{(1 - D)}.$$
 (26)

Из (1), (18), (19) и (26) емкость C_{11} можно выразить как

$$C_{11} \ge \frac{2 \cdot P \cdot D \cdot n \cdot T \cdot (1 - (n+1) \cdot D)}{k_1 \cdot U_{\text{BX}}^2 \cdot (1 - D)}.$$
(27)

Находим емкость конденсатора C_{12} . Выражение, определяющее условие непрерывности входного тока,

$$I_{\text{BX cp}}^{T_{\text{K3}}} = I_{\text{BX cp}}^{T} , \qquad (28)$$

необходимо также учитывать следующее условие:

$$C_{12} \ge \frac{C_{11}}{n}$$
. (29)

Это выражение может быть подкреплено нижеследующим, принимая во внимание, что в любой момент времени:

$$U_{\rm BX} = u_{\rm C11} - u_{\rm C12} \,, \tag{30}$$

$$\frac{1}{C_{11}}i_{C11} = \frac{1}{C_{12}}i_{C12}.$$
(31)

Ток конденсатора на протяжении КЗ состояния (T_S) инвертора квази-Т-типа может быть получен из рис. 2, *г* и будет следующим:

$$I_{C12\,cp}^{T_{K3}} = C_{12} \frac{du_{C12}}{dt} \,. \tag{32}$$

Пульсация напряжения на конденсаторе C_{12} определяется как

$$\Delta u_{C12} \le k_2 \cdot U_{C12cp}^{T_{K3}},\tag{33}$$

где k_2 – коэффициент пульсации напряжения на конденсаторе C_{12} . Принимая во внимание то, что соблюдается условие для получения непрерывного входного тока, может быть получено следующее выражение:

$$I_{C12\,cp}^{T_{K3}} = I_{Bx\,cp}^{T_{K3}} = I_{Bx\,cp}^{T} = \frac{P}{U_{Bx}}.$$
(34)

Поскольку величина емкости C_{12} определяется из выражения (31), с учетом (4), (32), (33) и (34) можно вывести окончательное выражение для оценки коэффициента пульсации напряжения u_{C12} :

$$k_2 \ge \frac{2 \cdot P \cdot T \cdot \left(1 - (n+1) \cdot D\right)}{C_{12} \cdot U_{\text{BX}}^2 \cdot n}.$$
(35)

4. Обобщение полученных результатов

Результаты проведенного расчета (формулы (13), (17), (23), (29) и (35)) можно свести в табл. 1. В этой таблице приведены основные полученные формулы для выбора компонентов обеих схем. Также из табл. 1 можно сделать вывод о том, что сумма емкостей конденсаторов C_{11} и C_{12} схемы квази-Т-типа равна емкости конденсатора C_{11} схемы Т-типа. Таким образом, несмотря на большее количество конденсаторов во второй схеме, размер ее пассивных компонентов равен размеру пассивных компонентов схемы импедансного инвертора Т-типа. Из формул для расчета емкостей конденсаторов можно заметить, что величина емкости увеличивается с увеличением длительности интервала КЗ. Это значит, что усилительный режим работы схемы требует большой емкости конденсатора, тогда как в понижающем режиме работы можно обойтись без конденсатора.

Таблица 1 / Table 1

Импедансный инвертор Т-типа Импедансный инвертор квази-Т-типа Индуктивность намагничивания L_{M11} $L_{M11} \ge \frac{n^2 U_{IN}^2 DT(1-D)}{4P(1+n)(1-(n+1)D)}$ Емкость конденсатора C_{11} Емкость конденсатора C_{11} $C_{11} \ge \frac{2PTD(1-(n+1)D)}{k_1 U_{BX}^2(1-D)}(n+1)$ $C_{11} \ge \frac{2PDT(1-(n+1)D)}{k_1 U_{BX}^2(1-D)}n$ Емкость конденсатора C_{12} $C_{12} \ge \frac{2PDT(1-(n+1)D)}{k_1 U_{BX}^2(1-D)}$ Коэффициент пульсации u_{C12} $k_2 \ge \frac{2PT(1-(n+1)\cdot D)}{C_{12} U_{BX}^2 n}$

Правила выбора компонентов схем Т-импедансных инверторов Components design guidelines of T-source inverters

5. Результаты моделирования

Моделирование преобразователей проводилось в программе PSIM. Параметры моделирования, определенные в соответствии с выражениями, полученными в разделах 3–4, приведены в табл. 2. Результаты моделирования показаны на рис. 3. Предполагалось, что магнитосвязанные катушки не имеют индуктивности рассеяния и были приняты во внимание только потери проводимости.

Расчеты были проведены при условии непрерывного входного тока и тока индуктивности намагничивания L_{M11} с уровнем высокочастотных пульсаций 80%. Емкости C_{11} и C_{21} были выбраны так, чтобы обеспечить коэффициент пульсации напряжения k_1 на уровне около 1% и непрерывный входной ток.

В качестве алгоритма управления применялся алгоритм постоянного усиления (D = const). Полученные диаграммы токов и напряжений импедансного инвертора Т-типа показаны на рис. 3, a и e; аналогичные результаты для импедансного инвертора квази-Т-типа показаны на рис. 3, δ и c. Величина выходных индуктивных фильтров $L_{\phi a}$, $L_{\phi b}$, $L_{\phi c}$ приведена в табл. 2. Коэффициент гармоник выходного тока составил 3,5 %. Ток индуктивности намагничивания i_{LM11} и входной ток $i_{вx}$ содержат низкочастотную и высокочастотную пульсации. Низкочастотная пульсация имеет частоту в три раза большую частоты модулирующего сигнала, а высокочастотная пульсация имеет частоту ШИМ. Рис. 3, e показывает, что входной ток квази-T-импедансного инвертора является непрерывным в отличие от T-импедансного инвертора (рис. 3, e).



Рис. 3 – Результаты моделирования (сверху вниз), f = 50 Гц; инвертор Т-типа (*a*): выходное напряжение, напряжение звена постоянного тока, напряжение на конденсаторе C_{11} , входное напряжение, входной ток, ток в индуктивности намагничивания; инвертор квази-Т-типа (δ): выходное напряжение, напряжение звена постоянного тока, напряжение на конденсаторе C_{11} , напряжение на конденсаторе C_{12} , входное напряжение, входной ток, ток в индуктивности намагничивания; инвертор квази-Т-типа (δ): напряжение на конденсаторе C_{12} , входное напряжение, входной ток, ток в индуктивности намагничивания; f = 50 кГц; инвертор Т-типа (ϵ): напряжение на конденсаторе C_{11} , ток в индуктивности намагничивания, входной ток; инвертор квази-Т-типа (ϵ): напряжение на конденсаторе C_{12} , напряжение на конденсаторе C_{12} , пок в индуктивности намагничивания, входной ток; инвертор квази-Т-типа (ϵ): напряжение на конденсаторе C_{12} , напряжение на конденсаторе C_{11} , ток в индуктивности намагничивания, входной ток; инвертор квази-Т-типа (ϵ): напряжение на конденсаторе C_{12} , напря в на конденсаторе C_{12} , напря в на конденса

Fig. 3 – Modulationresults (Top to Bottom), f = 50 Hz; T-source inverter (*a*): output voltage, dc-link voltage, capacitor C_{11} voltage, input voltage, input current, magnetizing inductor current; quasi-T-source inverter (*b*): output voltage, dc-link voltage, capacitor C_{12} voltage, input voltage, input current, magnetizing inductor current; f = 50 KHz: T-source inverter (*c*): capacitor C_{11} voltage, magnetizing inductor current; quasi-T-source inverter (*d*): capacitor C_{12} voltage, magnetizing inductor current; input current; quasi-T-source inverter (*d*): capacitor C_{12} voltage, capacitor C_{11} voltage, magnetizing inductor current; input current; quasi-T-source inverter (*d*): capacitor C_{12} voltage, capacitor C_{11} voltage, magnetizing inductor current; input current

Таблица 2 / Table 2

Компоненты и параметры трехфазных трехуровневых импедансных инверторов Т-типа

Схема	Т-тип	Квази-Т-тип		
$U_{\rm вых}$ – действующее значение выходного напряжения	Три фазы 230 В			
D – длительность интервала КЗ	0,2			
<i>n</i> – коэффициент трансформации	2			
$U_{\rm BX}$ – входное напряжение	325 B			
<i>Р</i> – выходная мощность	1000 Bt			
<i>T</i> – период коммутации	20	мкс		

Components and parameters for three-phase three-levelT-source inverters

Схема	Т-тип	Квази-Т-тип		
M-модуляция	0,8			
k_1 – коэффициент пульсации напряжения C_{11}	1,3 %	1,3 %		
k_2 – коэффициент пульсации напряжения C_{12}		2,5 %		
k_3 – коэффициент пульсации тока L_{M11}	82 %	82 %		
$C_{11}-e$ мкость	11,4 мкФ	7,6 мкФ		
$C_{12} - e$ мкость		3,8 мкФ		
L _{M11} – индуктивность намагничивания	563,4 мкФ	563,4 мкФ		
$L_{{ m d} a}, L_{{ m d} b}, L_{{ m d} c}$ – индуктивность выходных фильтров	3 мГн			

0	к	0	Н	ч	а	Н	И	e	Т	а	б	Л.	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---

Заключение

Данная статья содержит сравнительный анализ двух топологий: схем трехуровневого импедансного инвертора с блокирующими диодами Т-типа и квази-Т-типа. В результате проведенного анализа было показано, что импедансный инвертор квази-Т-типа имеет лучшие характеристики, благодаря тому, что данная схема может потреблять от источника питания непрерывный входной ток, что позволяет повысить ресурс эксплуатации СБ. Недостатком этой схемы является то, что в ней используется в два раза большее количество конденсаторов, что в свою очередь может уменьшить надежность схемы. Однако суммарная емкость конденсаторов схемы квази-Т-типа будет такой же, как у схемы Т-типа. Также одинаковой оказалась величина индуктивности обеих схем. Кроме того, в результате проведенного анализа получены рекомендации по выбору пассивных компонентов схем. Эти результаты могут быть использованы при инженерном проектировании импедансных инверторов Т-типа и квази-Т-типа.

ЛИТЕРАТУРА

- Yan H., Zhou Z., Lu H. Photovoltaic industry and market investigation // 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. – Nanjing, China: IEEE, 2009. – P. 1–4.
- Renewables 2014 global status report / J.L. Savin, research direction. Paris: REN21 Secretariat, 2014.
- 3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
- Rashid M.H. Power electronics handbook: devices, circuits and applications. Burlington, MA: Academic Press, 2010.
- Peng F.Z. Z-source inverter // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. Vol. 39, iss. 2. – P. 504–510.
- Anderson J., Peng F.Z. Four quasi-Z-source inverters // PESC 08: 39th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, 15–19 June 2008: proceedings. – Piscataway, NJ: IEEE, 2008. – P. 2743–2749.
- Impedance-source networks for electric power conversion. Pt. 1. A topological review / Y.P. Siwakoti, F.Z. Peng, F. Blaabjerg, P.C. Loh, G.E. Town // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – Vol. 30, iss. 2. – P. 699–716.
- Single phase three-level neutral-point-clamped quasi-Z-source inverter / O. Husev, C. Roncero-Clemente, E. Romero-Cadaval, D. Vinnikov, S. Stepenko // IET Power Electronics. – 2015. – Vol. 8, iss. 1. – P. 1–10.
- Three-level Z-source inverters using a single LC impedance network / P.C. Loh, S.W. Lim, F. Gao, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, iss. 2. – P. 706–711.
- New type LCCT-Z-source inverters / M. Adamowicz, R. Strzelecki, F.Z. Peng, J. Guzinski, H. Abu-Rub // Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), 30 Aug. – 01 Sept. 2011, Birmingham, UK. – Piscataway, NJ: IEEE, 2011. – P. 1–10.

- Patent Application P386084 PL. The buck-boost inverter circuit especially designed for single-stage power conversion / R. Strzelecki, M. Adamowicz, B. Balkowski, N. Strzelecka. – 2008.
- Shults T.E., Husev O.O., Zakis J.G. Overview of impedance source networks for voltage source inverters // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2015), Erlagol, Altai, Russia 29 June – 3 July 2015. – Novosibirsk, 2015. – P. 514–520.
- Zakis J., Vinnikov D., Bisenieks L. Some design considerations for coupled inductors for integrated buck-boost converters // 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). – Piscataway, NJ: IEEE, 2011. – P. 1–6.
- New type T-source inverter / R. Strzelecki, M. Adamowicz, N. Strzelecka, W. Bury // 2009 Compatibility and Power Electronics. – Piscataway, NJ: IEEE, 2009. – P. 191–195.
- Trans-Z-source and Γ-Z-source neutral-point-clamped inverters / W. Mo, P.C. Loh, F. Blaabjerg, P. Wang // IET Power Electronics. – 2015. – Vol. 8, iss. 3. – P. 371–377.
- 16. Nordvall A. Multilevel inverter topology survey: MS thesis / Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2011.
- Recent advances and industrial applications of multilevel converters / S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57, iss. 8. – P. 2553–2580.
- Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49, iss. 4. – P. 724–738.
- Qian W., Peng F.Z., Cha H. Trans-Z-source inverters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2011. – Vol. 26, iss. 12. – P. 3453–3463.
- Patent Application P386085 PL. Multi-level inverter circuit especially for voltage boost / R. Strzelecki, M. Adamowicz, B. Balkowski, N. Strzelecka. – 2010.
- Trans-Z-source-like inverter with built-in dc current blocking capacitors / M. Adamowicz, J. Guzinski, D. Vinnikov, N. Strzelecka // 2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE). – Piscataway, NJ: IEEE, 2011. – P. 137–143.
- 22. Witulski A.F. Introduction to modeling of transformers and coupled inductors // IEEE Transactions on Power Electronics. 1995. Vol. 10, vol. 3. P. 349–357.
- 23. Valchev V.C., Bossche A. van den. Inductors and transformers for power electronics. Boca Raton: CRC press, 2005.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THREE-PHASE THREE-LEVEL T- SOURCE INVERTERS

Shults T.E.¹, Gusev O.O.²

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia ²Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

This paper presents a steady state analysis of the three-level three-phase T-source Neutral-Point-Clamped inverter and quasi-T-source Neutral-Point-Clamped inverter topologies. This sort of inverters is used for solar photovoltaic power generation. They can work in bucking and boosting modes and do not suffer from short circuits. Guidelines for component design of recently proposed topologies are proposed. T-source inverter and quasi-T-source inverter are described and compared. A comparative analysis shows that the quasi-T-source inverter has the same parameters of passive components as the T-source inverter, though their number is bigger. The output voltage quality along with the boost performance is identical. However, the quasi-T-source inverter consumes a continuous input current.

Keywords: photovoltaic panels; inverter; impedance network; component. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-3-115-127

REFERENCES

1. Yan H., Zhou Z., Lu H. Photovoltaic industry and market investigation. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, IEEE, 2009, pp. 1–4.

- 2. Savin J.L., research direction. *Renewables 2014 global status report*. Paris, REN21 Secretariat, 2014.
- Zinov'ev G.S. Osnovy silovoi elektroniki [Power electronics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2003.
- Rashid M.H. Power electronics handbook: devices, circuits and applications. Burlington, MA, Academic Press, 2010.
- 5. Peng F.Z. Z-source inverter. *IEEE Transactions on industry applications*, 2003, vol. 39, iss. 2, pp. 504–510.
- Anderson J., Peng F.Z. Four quasi-Z-source inverters. PESC 08: 39th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, 15–19 June 2008: proceedings, pp. 2743–2749.
- Siwakoti Y.P., Peng F.Z., Blaabjerg F., Loh P.C., Town G.E. Impedance-source networks for electric power conversion. Pt. 1. A topological review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, iss. 2, pp. 699–716.
- Husev O., Roncero-Clemente C., Romero-Cadaval E., Vinnikov D., Stepenko S. Single phase three-level neutral-point-clamped quasi-Z-source inverter. *IET Power Electronics*, 2015, vol. 8, iss. 1, pp. 1–10.
- Loh P.C., Lim S.W., Gao F., Blaabjerg F. Three-level Z-source inverters using a single LC impedance network. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, iss. 2, pp. 706– 711.
- Adamowicz M., Strzelecki R., Peng F.Z., Guzinski J., Abu-Rub H. New type LCCT-Zsource inverters. *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics* and Applications (EPE 2011), 30 Aug. – 01 Sept. 2011, Birmingham, UK, pp. 1–10.
- 11. Strzelecki R., Adamowicz M., Balkowski B., Strzelecka N. *The buck-boost inverter circuit especially designed for single-stage power conversion*. Patent Application PL, no. P386084, 2008.
- Shults T.E., Husev O.O., Zakis J.G. Overview of impedance source networks for voltage source inverters. 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2015), Erlagol, Altai, Russia 29 June – 3 July 2015. Novosibirsk, 2015, pp. 514–520.
- Zakis J., Vinnikov D., Bisenieks L. Some design considerations for coupled inductors for integrated buck-boost converters. 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). Piscataway, NJ, IEEE, 2011, pp. 1–6.
- 14. Strzelecki R., Adamowicz M., Strzelecka N., Bury W. New type T-source inverter. 2009 Compatibility and Power Electronics. Piscataway, NJ, IEEE, 2009, pp. 191–195.
- Mo W., Loh P.C., Blaabjerg F., Wang P. Trans-Z-source and Γ-Z-source neutral-pointclamped inverters. *IET Power Electronics*, 2015, vol. 8, iss. 3, pp. 371–377.
- Nordvall A. *Multilevel inverter topology survey*: MS thesis. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2011.
- Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J. Recent advances and industrial applications of multilevel converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, iss. 8, pp. 2553–2580.
- Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2002, vol. 49, iss. 4, pp. 724–738.
- Qian W., Peng F.Z., Cha H. Trans-Z-source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, vol. 26, iss. 12, pp. 3453–3463.
- Strzelecki R., Adamowicz M., Balkowski B., Strzelecka N. Multi-level inverter circuit especially for voltage boost. Patent Application PL, no. P386085, 2010.
- Adamowicz M., Guzinski J., Vinnikov D., Strzelecka N. Trans-Z-source-like inverter with built-in dc current blocking capacitors. 2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE). Piscataway, NJ, IEEE, 2011, pp. 137–143.
- 22. Witulski A.F. Introduction to modeling of transformers and coupled inductors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, vol. 10, iss. 3, pp. 349–357.
- Valchev V.C., Bossche A. van den. Inductors and transformers for power electronics. Boca Raton, CRC press, 2005.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шульц Татьяна Евгеньевна – родилась в 1991 году, младший науч. сотр., кафедра электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: силовая электроника. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20 к. 4. Email: shulcz.2012@corp.nstu.ru).

Shults Tatiana Evgenevna (b. 1991) – junior researcher, department ofelectronics and Electrical Engineering, NSTU. Her research interests are currently focused on power electronic systems. She is the author of 7 scientific papers. (Address: 20/4, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: shulcz.2012@corp.nstu.ru).



Гусев Александр Александрович – родился в 1986 году, канд. техн. наук, доцент, кафедра биометрических радиоэлектронных аппаратов и систем, Черниговский национальный технологический университет. Область научных интересов: силовая электроника. Опубликовано более 70 научных работ. (Адрес: 14027, Украина, Чернигов, улица Шевченка, дом 95. Email: gsfki@ukr.net).

Husev Oleksandr Oleksandrovich (b. 1986) – Candidate of Sciences (Eng), associate professor, department of biomedical radioelectronic apparatuses and systems, Chernihiv National University of Technology. His research interests are currently focused on power electronicssystems. He is the author over 70 scientific papers. (Address: 95, Shevchenka St., Chernihiv, 14027, Ukraine. Email: gsfki@ukr.net).

Статья поступила 29 августа 2016 г. Received August 29, 2016

To Reference:

Shults T.E., Gusev O.O. Sravnitel'nyi analiz trekhfaznykh trekhurovnevykh kvaziimpedansnykh invertorov T-tipa [Three phase three level T-source inverters comparative analysis]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 115–127. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-115-127

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Выпуск 3(32) июль-сентябрь 2016

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

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

Подписано в печать 20.10.2016. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16 Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 11,2. Печ. л. 8,0. Изд. № 253. Заказ № 1614

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