

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 62 (1104) 2014

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2014

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 62 (1104). – 147 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" внесено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. № 1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України № 6, 2010 р., стор. 3, № 20).

Серія "Інформатика та моделювання" Вісника НТУ "ХПІ" включена в наукометричні бази Copernicus (Польща), Elibrary (РІНЦ), DOAJ (Швеція), Google Scholar і базу даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Координаційна рада:

Л.Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К.О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; С.І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн.

наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук,

проф.; М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А.І. Грабченко, д-р техн. наук,

проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.;

Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;

В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;

О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; Є.Є. Олександров, д-р техн. наук,

проф.; П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.; В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;

М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: В.Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: С.Ю. Леонов, канд. техн. наук, доц.

Члени редколегії: А.Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.; Л.В. Дербунувич, д-р техн.

наук, проф.; Є.Г. Жиликов, д-р техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук,

проф.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.; О.С. Логунова, д-р техн. наук, проф.;

В.І. Носков, д-р техн. наук, проф.; А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.; Г.А.

Самігуліна, д-р техн. наук, проф. (Казахстан); О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

А.Г. Трифонов, д-р техн. наук, проф. (Білорусь); Ханлар Гамзаєв, д-р техн. наук,

проф. (Азербайджан); Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан); Ihor

Zanevsky, PhD, prof. (Polska).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 11 від 22 12. 2014 р.

© Національний технічний університет "ХПІ", 2014

**Розміщення Вісника НТУ "ХПИ",
серія "Інформатика та моделювання"
в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових
системах**

1. Serial registries: ISSN, Ulrich's Periodical Directory (США).

2. Abstracting systems: Copernicus (Польща), eLibrary (Россия), CiteFactor, SIS (Scientific Indexing Services), Open Academic Journals Index (Россия), UIF (Universal Impact Factor), Directory of Research Journals Indexing (Индия).

3. Web-based search systems: Google Scholar, Academic Index.

4. Electronic Libraries: Cyberleninka (Россия), Bielefeld Academic Search Engine (Германия), Open Journal Systems (Украина), Национальная библиотека им. Вернадского (Украина), Научно-техническая библиотека НТУ "ХПИ" (Украина), Text Archive (Россия).

5. Journal databases: Directory of open access journals (Швеция), OCLC WorldCat (США), Research Bible (Япония), Genamics Journal Seek (США), SHERPA/RoMEO, Academic Database Assessment Tool.

6. University Libraries: *США:* Walden University, Beardsley Library Journals, University at Albany, University of Texas, WRLC Catalogs, University Oregon, Monterey Bay Library, University of Kentucky, University of Georgia, Indiana University, Harvard Library, New York University, Northwestern University, San Jose State University, Library & Technology Services, Mercyhurst College Library System, Poudre River Public Library District, Virtual Science Library, Journal index, Jean and Alexander Heard Library. *Великобритания:* Birmingham Public Library, British Library, Social Services Knowledge Scotland, Linking Service, University of Strathclyde Glasgow, SUPrimo Library, University of Glasgow, Royal Holloway University of London, University of Cambridge, University of Essex, University of Nottingham, One Search, UCL Library Services. *Канада:* University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University. *Австралия:* Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. *Швеция:* IBRIS - Nationally bibliotheca system, Hogskolan Dalarna, Sodertorns hogskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. *Нидерланды:* Quality Open Access Market, University of Leiden. *Мексика:* University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. *Інші країни:* Universia (Испания), Vabord+ (Франция), SLU (Швеция), Serge EL (Чехия), BON (Португалия), AUT Library (Новая Зеландия), Polska Bibliografia Naukowa (Польща), Государственная национальная техническая библиотека (Украина), Научная библиотека имени Говорова (Россия, Санкт-Петербург), Universiteits bibliotheek Gent (Бельгия), E-Resources Subject Access (Китай).

Електронна адреса сайта Вісника НТУ "ХПИ" серії "Інформатика та моделювання" www.pim.net.ua

УДК 629.7.615.3

Н.С. АЩЕПКОВА, канд. техн. наук, доц., ДНУ им. О. Гончара,
Днепропетровск

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА

Рассмотрена задача кинематического анализа рычажного механизма. Определены особенности кинематики кривошипно-шатунного механизма. Разработано программное обеспечение для пакета прикладных программ Mathcad. Использование этого пакета позволяет провести кинематический анализ и моделирование движения кривошипно-шатунного механизма с нагрузкой или в режиме холостого хода. Ил.: 6. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: рычажный механизм, кривошипно-шатунный механизм, кинематический анализ, режим холостого хода.

Постановка проблемы и анализ литературы. В промышленных работах (ПР) применяются рычажные механизмы, состоящие из жестких звеньев, соединенных между собой кинематическими парами преимущественно V класса.

Задачи синтеза рычажных механизмов ПР и их кинематический анализ, относящиеся к теории механизмов и машин, требуют больших объемов вычислений. К сожалению, современные пакеты решения инженерных задач не содержат приемлемого обеспечения для решения подобных задач. В связи с этим актуальна разработка программного обеспечения для кинематического анализа механизмов ПР с использованием универсальных сред для решения инженерных задач, располагающих достаточно широким спектром инструментальных, информационных и графических средств.

При синтезе механизма ПР проектируется кинематическая схема, удовлетворяющая требуемым законам движения звеньев. В процессе синтеза решаются две основные задачи [1]:

- 1) Выбор структуры, т.е. построение конструкции рычажного механизма. Определение числа и вида кинематических пар.
- 2) Выбор размера и форм звеньев, обеспечивающих требуемые законы их движения.

На начальной стадии синтеза при выборе структуры механизма конструктор рассматривает четырехзвенные механизмы с кинематическими парами V класса [2]. Если с помощью таких

механизмов решить задачу нельзя, схема усложняется применением пятизвенных или многозвенных конструкций [3]. Кинематический анализ необходимо проводить для каждого рассматриваемого варианта конструкции и всех возможных законов движения ведущего звена [4].

Кинематическое исследование механизма заключается в изучении движения звеньев и (или) особых точек звеньев без учета действующих на механизм сил. Традиционные методы кинематического анализа механизмов: аналитический, графоаналитический, графический [5].

При традиционном методе расчета проводят кинематический анализ для восьми или двенадцати положений ведущего звена [3, 5]. Пакет прикладных программ Mathcad позволяет рассчитать координаты звеньев или особых точек рычажных механизмов в зависимости от изменения угла ведущего звена с любым шагом [6].

Система встроенных функций Mathcad позволяет выполнить символьное дифференцирование [7], т.е. вычислить скорости и ускорения особых точек рычажных механизмов; что даёт возможность рассчитать траектории заданных точек механизмов [8]. Эти результаты позволяют оценить пределы досягаемости схвата ПР, и выбрать допустимую траекторию движения. В [9] отмечается, что оптимальная траектория движения ПР состоит из отдельных фрагментов, которые должны быть непрерывны по положению, скорости и ускорению для достижения плавности движений робота.

Роботы, применяемые на космических аппаратах, также могут быть представлены как рычажные механизмы [10], т. е. разработанный метод может быть использован не только для ПР.

Цель статьи – разработка метода и программного обеспечения для кинематического анализа механизма ПР в пакете прикладных программ Mathcad.

Кинематические схемы и начальные условия. В качестве примера рассмотрим распространенный кривошипно-шатунный (кривошипно-ползунный) механизм. Задачи кинематического анализа состоят в определении положений звеньев, включая определение траекторий отдельных точек звеньев, скоростей и ускорений. При этом считаются известными законы движения начальных звеньев и кинематическая схема механизма.

Рассмотрим перемещение звеньев кривошипно-шатунного механизма с заданными размерами (рис. 1).

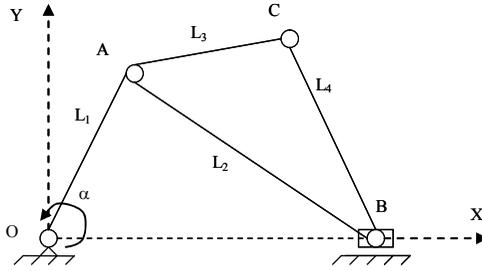


Рис. 1. Схема кривошипно-шатунного механизма

Допустим, что начальное положение ведущего звена – кривошипа $\alpha_0 = 62^\circ$. Размеры звеньев кривошипно-шатунного механизма соответственно $L_1 = 0.1$ м и $L_2 = 0.35$ м. Требуется определить положение, скорость и ускорение ведомого звена (точки B ползуна) кривошипно-шатунного механизма.

Алгоритм аналитического решения. Предложена методика формализации процесса кинематического анализа рычажных механизмов. Процесс решения разбиваем на этапы (вычислительные процедуры). Для определения положения, скорости и ускорения ведомого звена ползуна кривошипно-шатунного механизма нужно выполнить следующие действия:

1) Составить уравнения связей звеньев механизма в векторной форме

$$\overline{OB} = \overline{OA} + \overline{AB}.$$

2) Представить уравнения связей звеньев механизма в координатной форме:

$$X_a = L_1 \cdot \cos(\alpha); Y_a = L_1 \cdot \sin(\alpha);$$

$$X_b = X_a + \sqrt{L_2^2 - Y_a^2} = L_1 \cdot \cos(\alpha) + \sqrt{L_2^2 - (L_1 \cdot \sin(\alpha))^2}.$$

3) Определить линейную скорость ползуна. Для этого необходимо продифференцировать соответствующее уравнение связи:

$$X'_b = -L_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot \alpha' - \left(L_2^2 - (L_1 \cdot \sin(\alpha))^2 \right)^{0.5} \cdot L_1^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot \alpha'.$$

4) Определить линейное ускорение ползуна. Для этого необходимо продифференцировать соответствующее выражение скорости:

$$X_b'' = (X_b') = \left(-L_1 \sin(\alpha) \cdot \alpha - \frac{L_1^2 \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot \alpha'}{\sqrt{L_2^2 - (L_1 \sin(\alpha))^2}} \right)'$$

Алгоритм решения в Mathcad. Для решения данной задачи с использованием среды Mathcad необходимо выполнить следующие основные этапы:

1) Определение размеров звеньев кривошипно-шатунного механизма.

2) Определение закона движения и начального углового положения кривошипа.

Зададим размеры звеньев кривошипно-шатунного механизма, закон движения ведущего звена – кривошипа, начальный угол положения кривошипа, уравнения связей звеньев кривошипно-шатунного механизма в векторной и координатной формах (рис. 2). Угловые координаты необходимо представить в радианах, т.е. разделить градусную величину на 180 и умножить на π .

3) Составление уравнения связей звеньев кривошипно-шатунного механизма в координатной форме.

4) Определение координат особых точек звеньев кривошипно-шатунного механизма в зависимости от времени или от угла поворота ведущего звена (рис. 3, 4).

5) Составление аналитического выражения для вычисления скорости особой точки ползуна путём символьного дифференцирования в среде Mathcad уравнения координаты ползуна. Вычисление скорости особой точки ведомого звена для заданного угла поворота кривошипа (рис. 5).

6) Составление аналитического выражение для вычисления ускорения особой точки ползуна путём символьного дифференцирования в среде Mathcad уравнения скорости ползуна. Вычисление ускорения особой точки ведомого звена для заданного угла поворота кривошипа (рис. 6). Моделирование движения кривошипно-шатунного механизма с нагрузкой или в режиме холостого хода.

7) Представление в табличном, аналитическом или графическом виде искомых параметров кинематического анализа.

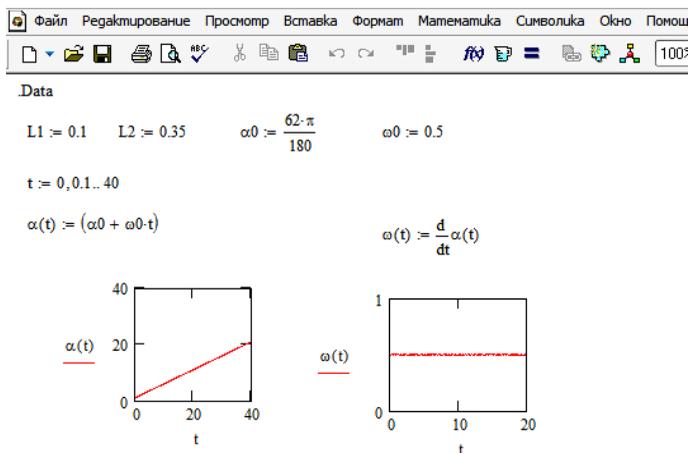


Рис. 2. Определение исходных данных для кинематического анализа кривошипно-шатунного механизма

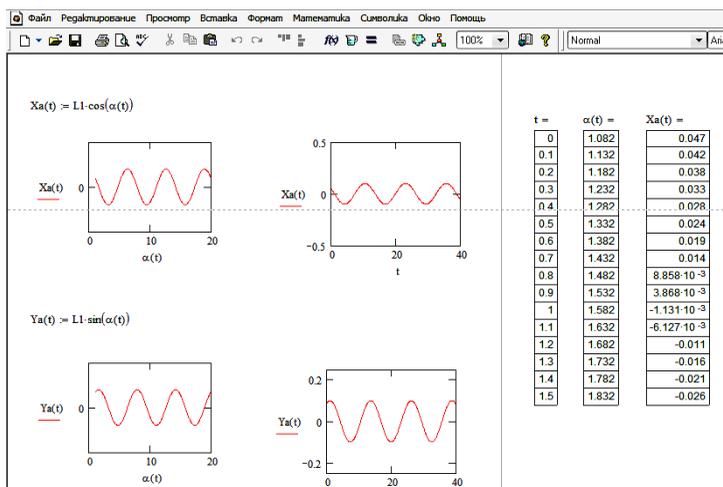


Рис. 3. Определение координат особых точек ведущего звена кривошипно-шатунного механизма

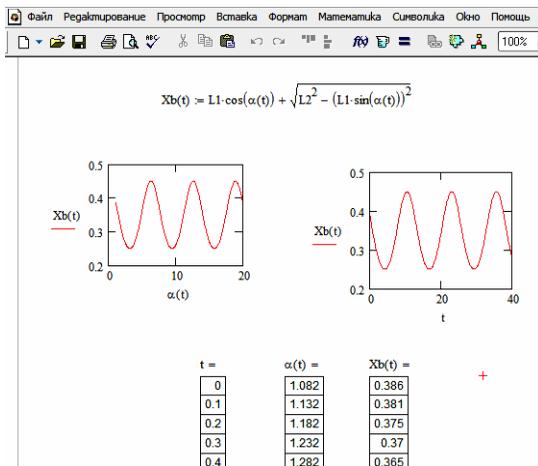


Рис. 4. Определение координат особых точек ведомого звена кривошипно-шатунного механизма

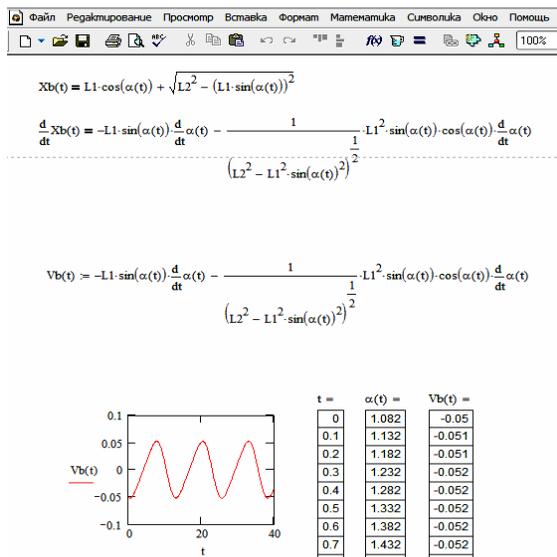


Рис. 5. Определение скорости особой точки ведомого звена кривошипно-шатунного механизма

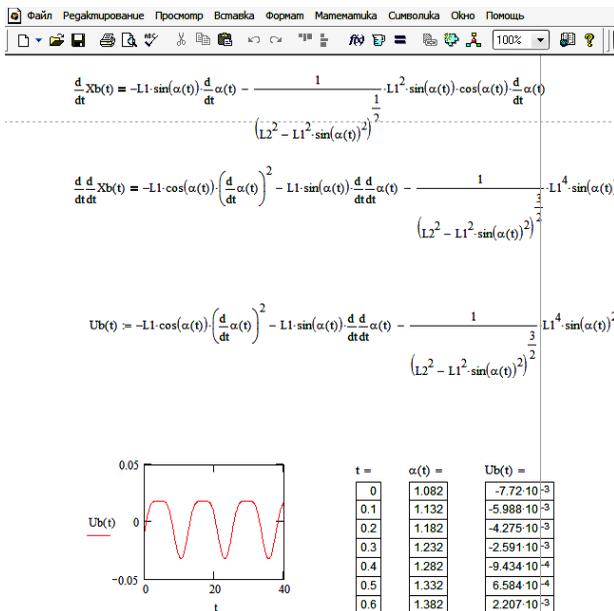


Рис. 6. Определение ускорения особой точки ведомого звена кривошипно-шатунного механизма

Таблица

Результаты кинематического анализа

Угол поворота кривошипа, α°	Координата ползуна, X_b , м	Скорость ползуна, V_b , м/с
0°	0.45	0
90°	0.335	-0.05
180°	0.25	0
270°	0.335	0.05

Выводы. Разработанное программное обеспечение для пакета прикладных программ Mathcad позволяет эффективно решать задачи кинематического анализа кривошипно-шатунного механизма. Решение задач разбивается на простые вычислительные процедуры. Контроль за правильностью расчета легко выполнять самостоятельно на каждом этапе решения. Кроме того, данное программное обеспечение позволяет провести моделирование движения кривошипно-шатунного механизма с

нагрузкой или в режиме холостого хода. Результаты моделирования допускают анимацию и импорт данных.

Приведены расчетные примеры, подтверждающие эффективность использования пакета прикладных программ Mathcad для решения данного типа задач.

Использование среды Mathcad позволяет не только выполнять инженерные расчеты, но и использовать его при обучении студентов, прививая им умения и навыки решения традиционных инженерных задач с использованием ЭВМ.

Список литературы: 1. Юревич Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. – Ленинград: Машиностроение, 1985. – 271 с. 2. Детали и механизмы роботов. Основы расчета, конструирования и технологии производства: учеб. пособие / Р.С. Веселков, Т.Н. Гонтаровская, В.П. Гонтаровский и др. / под. ред. Б.Б. Самопкина. – К.: Вища школа, 1990. – 343 с. 3. Бурдаков С.Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев. – М.: Высшая школа, 1986. – 264 с. 4. Сокол Г.И. Теория механизмов робототехнических систем. Кинематика: Навч. посібник / Г.И. Сокол. – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2002. – 92 с. 5. Евдокимов Ю.И. Кинематический анализ плоских рычажных механизмов: Методические указания / Ю.И. Евдокимов. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. аграр. ун-та, 2010. – 27 с. 6. Котлярский Л.Н. MathCad. Решение инженерных и экономических задач / Л.Н. Котлярский. – СПб.: Питер. – 2005. – 388 с. 7. Кудрявцев Е.М. Mathcad 2000 Pro / Е.М. Кудрявцев. – М.: ДМК Пресс. – 2001. – С. 530-540. 8. Эйзенштис А.А. MathCad 2000. Руководство пользователя / А.А. Эйзенштис. – М.: ДМК Пресс. – 2001. – 570 с. 9. Шахинпур М. Курс робототехники. Пер. с англ. / М. Шахинпур. – М.: Мир, 1990. – 527 с. 10. Ащепкова Н.С. Математическая модель движения космического аппарата с манипулятором / Н.С. Ащепкова, Ю.Д. Шептун // Космічна наука та технологія. – 1997. – Т. 3. – № 5/6. – С. 34-42.

Bibliography (transliterated): 1. Jurevich E.I. Osnovy robototekhniki / E.I. Jurevich. – Leningrad: Mashinostroenie, 1985. – 271 s. 2. Detali i mehanizmy robotov. Osnovy rascheta, konstruirovaniya i tehnologii proizvodstva: ucheb. posobie / R.S. Veselkov, T.N. Gontarovskaja, V.P. Gontarovskij i dr. / pod. red. B.B. Samotokina. – K.: Vishha shkola, 1990. – 343 s. 3. Burdakov S.F. Proektirovanie manipuljatorov promyshlennyh robotov i robotizirovannyh kompleksov / S.F. Burdakov, V.A. D'jachenko, A.N. Timofeev. – M.: Vysshaja shkola, 1986. – 264 s. 4. Sokol G.I. Teorija mehanizmv robototekhnichnih sistem. Kinematika: Navch. posibnik / G.I. Sokol. – Dnipropetrovs'k: RVV DNU, 2002. – 92 s. 5. Evdokimov Ju.I. Kinematičeskij analiz ploskih ryčazhnyh mehanizmov: Metodicheskie ukazaniya / Ju.I. Evdokimov. – Novosibirsk: Izd-vo Novosib. gos. agrar. un-ta, 2010. – 27 s. 6. Kotljarskij L.N. MathSad. Reshenie inženernyh i jekonomičeskikh zadach / L.N. Kotljarskij. – SPb.: Piter. – 2005. – 388 s. 7. Kudrjavcev E.M. Mathcad 2000 Pro / E.M. Kudrjavcev. – M.: DMK Press. – 2001. – S. 530-540. 8. Jeizenshpis A.A. MathSad 2000. Rukovodstvo pol'zovatelja / A.A. Jeizenshpis. – M.: DMK Press. – 2001. – 570 s. 9. Shahinpur M. Kurs robototekhniki. Per. s angl. / M. Shahinpur. – M.: Mir, 1990. – 527 s. 10. Ashhepkova N.S. Matematičeskaja model' dvizhenija kosmičeskogo apparata s manipuljatorom / N.S. Ashhepkova, Ju.D. Sheptun // Kosmična nauka ta tehnologija. – 1997. – T. 3. – № 5/6. – S. 34-42.

Поступила (received) 30.11.2014

*Статью представила д-р техн. наук, проф., профессор кафедры
механотроники ДНУ Сокол Г.И.*

Ashhepkova Natalja, Cand. Tech. Sci., Docent
Dnepropetrovsk national university by O. Gonchar
Str. Budjonniy, 16/44, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49102
Tel.: (066) 292-01-47, e-mail: ashhepkova_natalja@rambler.ru
ORCID ID: 0000-0002-1870-1062

УДК 621.165

В.И. ГНЕСИН, д-р техн. наук, проф., ИПМаш НАНУ, Харьков,

Л.В. КОЛОДЯЖНАЯ, д-р техн. наук, с.н.с., ИПМаш НАНУ,
Харьков,

Р. ЖАНДКОВСКИ, д-р техн. наук, ИПМ ПАН, Гданьск,

А.А. КОЛЕСНИК, асп., ИПМаш НАНУ, Харьков

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АЭРОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА ОСЕВОЙ ТУРБОМАШИНЫ

Представлен численный анализ аэроупругого поведения колеблющегося лопаточного венца осевой турбомашин в трехмерном трансзвуковом потоке идеального газа, основанный на решении связанной задачи нестационарной аэродинамики и упругих колебаний лопаток. Проведенный численный анализ связанных колебаний лопаток подтвердил аэродемпфирование при взаимодействии первых шести собственных форм. Ил.: 7. Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: аэроупругое поведение, лопаточный венец, идеальный газ, колебания лопаток.

Постановка проблемы и анализ литературы. Одной из важнейших проблем при создании или модернизации современных турбомашин является проблема надежности и безопасности.

Для того чтобы выполнить важнейшие требования надежности и безопасности эксплуатации газотурбинных двигателей, необходимо прогнозировать аэроупругое состояние лопаточных аппаратов [1], как можно раньше и точнее.

В последнее время развиваются новые подходы, основанные на маршевой по времени схеме, включающей интегрирование уравнений аэродинамики и динамики упругих колебаний. Эти методы привлекают корректностью постановки связанной задачи аэроупругости, учитывающей взаимное влияние колебаний лопаток и нестационарных аэродинамических нагрузок [2 – 6]. Конструктору необходимо прогнозировать спектр колебаний лопаток, чтобы избежать их разрушения. Режим колебаний определяется соотношением возмущающих сил и сил механического демпфирования и аэродемпфирования.

Если при колебаниях лопаток энергия основного потока подводится к лопаткам, происходит рост самовозбуждающихся колебаний (флаттер). Для постановки задачи аэроупругости турбинной ступени используется частично-интегральный метод, который включает последовательное интегрирование уравнений аэродинамики и упругих колебаний

© В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная, Р.-Жандковски, А.А. Колесник, 2014

лопаток отдельно, но при этом решение, полученное в каждой из физических сред, используется в качестве граничного условия для другой среды на следующей итерации [7]. Однако этот метод имеет определенные недостатки.

Цель статьи. На основе аэродинамической модели [2], и модального подхода к решению задачи динамики лопаток [3, 4] разработать метод решения связанной задачи и выполнить численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца в трансзвуковом потоке газа.

Аэроупругая модель. Рассматривается обтекание трехмерным потоком идеального газа вращающегося лопаточного венца с лопатками, колеблющимися по собственным формам при заданных законах гармонических колебаний и межлопаточном угле сдвига по фазе колебаний лопаток (МЛФУ).

В качестве объекта исследования рассмотрен лопаточный венец осевой турбины, который представляет собой кольцевую решетку [8].

Трехмерный трансзвуковой поток невязкого нетеплопроводного газа через венец осевой турбомашин рассматривается в физической области, включающей рабочее колесо (РК) турбины, вращающееся с постоянной угловой скоростью, и описывается полной системой нестационарных уравнений Эйлера, представленных в интегральной форме законов сохранения [2].

Для численного интегрирования исходных уравнений используется явная конечно-объемная разностная схема Годунова-Колгана со 2-м порядком аппроксимации [2, 7], обобщенная на случай произвольной пространственной деформируемой разностной сетки.

Разностная сетка разбивается на сегменты, каждый из которых включает одну лопатку и имеет протяженность в окружном направлении, равную шагу статора или ротора. В свою очередь, каждый из сегментов дискретизируется с использованием H -сетки для статорных каналов или гибридной H - H -сетки для каналов ротора. При этом внешняя H -сетка остается неподвижной в течение всего расчета, а внутренняя H -сетка перестраивается на каждой итерации по заданному алгоритму так, что ее внешние узлы остаются неподвижными, а внутренние жестко связаны с колеблющейся лопаткой.

На рис. 1, 2 приведены фрагменты разностной сетки – меридиональное сечение (рис. 1) и тангенциальное сечение в среднем слое (рис. 2). Количество тангенциальных сеточных сечений – 31. Количество узлов в каждом тангенциальном сечении в направлении оси y – 41, в направлении оси z – 65. Таким образом, количество сеточных узлов в каждом межлопаточном канале равно $31 \times 41 \times 65 = 82615$.

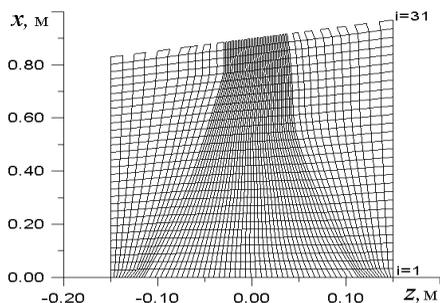


Рис. 1. Разностная сетка в меридиональной плоскости

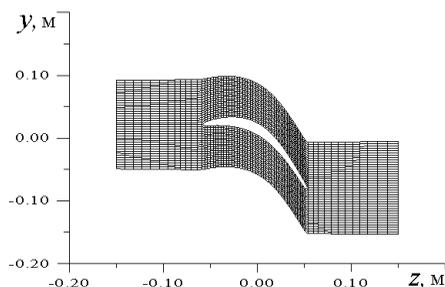


Рис. 2. Разностная сетка в среднем сечении

Динамическая модель колеблющейся лопатки в линейной постановке с использованием модального подхода [6], сводится к системе независимых дифференциальных уравнений относительно модальных коэффициентов собственных форм

$$\ddot{q}_i(t) + 2h_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \lambda_i(t). \quad (1)$$

Здесь h_i – коэффициент механического демпфирования i -й моды; ω_i – собственная частота i -й формы; λ_i – модальная сила, соответствующая перемещению по i -й форме, которая рассчитывается на каждой итерации по мгновенному распределению давления на поверхности лопатки

$$\lambda_i = \frac{\iint p \bar{U}_i \cdot \bar{n}^\circ d\sigma}{\iiint_V \rho \bar{U}_i^2 dv},$$

где p – давление на поверхности лопатки, U_i – вектор перемещения лопатки по i -й моде.

Модальную силу λ_i можно интерпретировать как обобщенную силу, действующую на лопатку при ее перемещении по i -й форме и отнесенную к единице массы.

Определив модальные коэффициенты i -й моды q_i из системы дифференциальных уравнений (1), получим перемещение и скорость лопатки в виде:

$$u(x, t) = \sum_i U_i(x) q_i(t),$$

$$\dot{u}(x, t) = \sum_i U_i(x) \dot{q}_i(t).$$

Решение связанной задачи заключается в параллельном решении на каждом шаге по времени аэродинамической и динамической задач с обменом результатов расчета каждой из задач на предыдущей итерации в качестве исходных данных на последующей итерации.

Численный анализ. Численные расчеты выполнены для лопаточного венца осевой турбины, вращающегося с постоянной угловой скоростью $\omega = 50$ Гц. Венец представляет собой кольцевую решетку, состоящую из 53 рабочих лопаток.

На первом этапе проведены расчеты аэродинамических характеристик турбинных лопаток для стационарного режима.

Значения газодинамических параметров на входе и выходе:

– полное давление $P_0 = 29400 \div 37800$ Па (рис. 3);

– температура заторможенного потока $T_0 = 348$ К;

– углы потока в окружном и радиальном направлениях (в абсолютной системе координат);

– статическое давление за рабочим венцом $p_2 = 10400$ Па (рис. 3).

Аэродинамический расчет ведется до установления периодической нестационарности потока с частотой, равной частоте колебаний лопаток.

Изменение полного давления по высоте лопатки \bar{L} во вращающейся системе координат P_{0w} при заданном числе оборотов $n = 3000$ об/мин приведено на рис. 3.

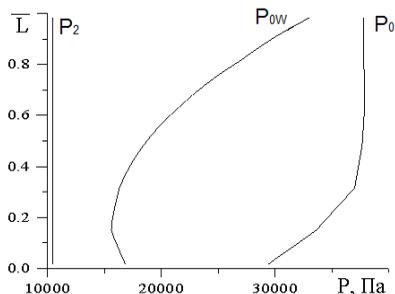


Рис. 3. Распределение по высоте лопатки полного давления в абсолютной системе, полного давления во вращающейся системе координат и статического противодействия

На рис. 4 приведены график изменения окружной силы, действующей на периферийный слой для МЛФУ = +90° с учетом 1 – 6 собственных форм колебаний.

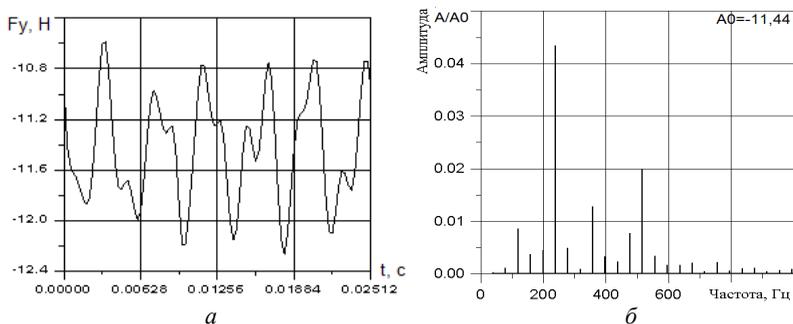


Рис. 4. Изменение аэродинамической силы, действующей на рабочую лопатку венца турбины (МЛФУ=+90 град): a – окружная сила; b – амплитудно-частотная характеристика

Аэроупругая устойчивость системы "поток газа – лопаточный венец" без учета механического демпфирования определяется аэродинамическим коэффициентом демпфирования D , равным взятому

со знаком "минус" коэффициенту работы W , совершаемой аэродинамическими силами за период колебаний:

$$W = \int_0^{\frac{1}{\nu}} \vec{F} \cdot \vec{v} dt, \quad D = - \frac{W}{(p_0 - p_1) \pi c h_0^2}, \quad (2)$$

где \vec{F} – вектор аэродинамической силы; \vec{v} – вектор скорости лопатки; c – хорда профиля; h_0 – амплитуда изгибных колебаний.

Проведен анализ коэффициентов аэродемпфирования лопаточного венца при заданных гармонических колебаниях лопаток с учетом 6-ти собственных форм при различных углах сдвига по фазе колебаний лопаток. Собственные частоты приведены в таблице.

Таблица

Собственные частоты

Номер формы	1	2	3	4	5	6
ν , Гц	119.43	159.24	238.85	358.3	477.7	517.5

На рис. 5 показано влияние межлопаточного угла сдвига фаз колебаний лопаток на коэффициент аэродемпфирования с учетом 1 – 6 собственных форм колебаний. Результаты расчетов показали устойчивое аэродемпфирование для всех форм колебаний.

Как видно из графика, зависимость коэффициента аэродемпфирования от угла сдвига фаз имеет характерную синусоидальную форму. Максимальное аэродемпфирование имеет место для МЛФУ = +45 град, – 90 град, минимальное аэродемпфирование – для МЛФУ = +90 град, – 45 град.

Знак коэффициента аэродемпфирования, рассчитанный при заданных кинематических колебаниях лопаток, может рассматриваться лишь как необходимое условие, но не достаточное для возникновения самовозбуждающихся колебаний. Окончательную оценку аэроупругого поведения лопаточного венца можно получить лишь при решении связанной задачи аэродинамики и упругих колебаний.

Ниже представлен численный анализ нестационарных аэродинамических нагрузок и амплитуд колебаний лопаток для МЛФУ = +90 град. с учетом взаимного влияния аэродинамических сил и упругих колебаний лопаток.

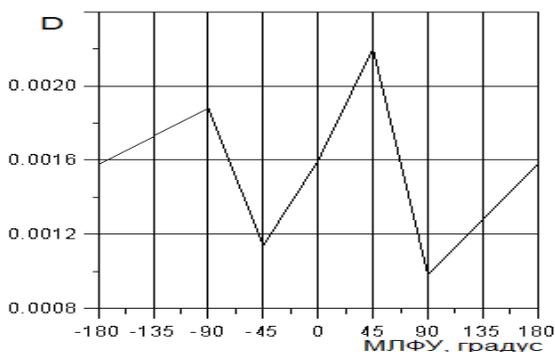


Рис. 5. Зависимость осредненного по высоте лопатки коэффициента аэродемпфирования от МЛФУ для 1 – 6 собственных форм колебаний

На рис. 6 приведены графики изменения аэродинамических нагрузок, действующих в периферийном слое рабочей лопатки.

На рис. 7 показано перемещение периферийного сечения лопаточного венца в окружном направлении и амплитудно-частотный спектр при межлопаточном угле сдвига колебаний лопаток, равном +90 градусов.

Основной вклад в изгибные колебания вносит гармоника с частотой близкой к частоте 1-й собственной формы колебаний. Данный режим характеризуется затуханием колебаний (аэродемпфированием).

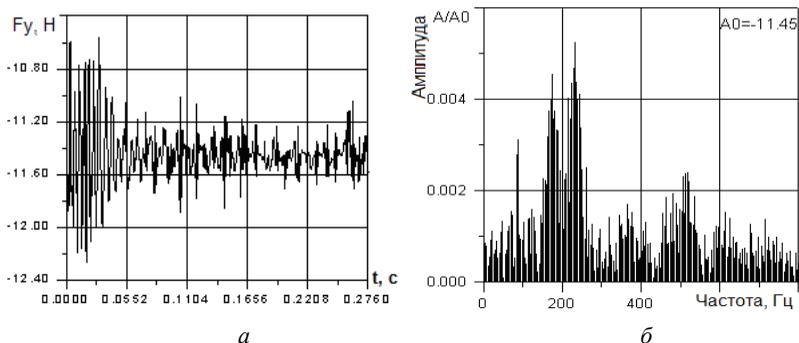


Рис. 6. Изменение аэродинамической силы, действующей на рабочую лопатку венца турбины (МЛФУ=+90 град): а, б – окружная сила и амплитудно-частотная характеристика

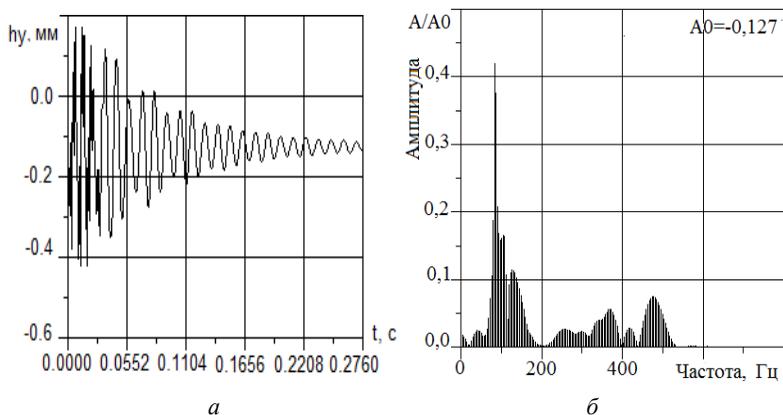


Рис. 7. Перемещение периферийного сечения лопаточного венца (МЛФУ = +90°):
 а – в окружном направлении; б – амплитудно-частотный спектр

Выводы. Проведен численный анализ аэроупругих характеристик лопаточного венца осевой турбины с использованием математической модели связанной задачи нестационарной аэродинамики и динамики упругих колебаний. При гармонических колебаниях лопаток по заданному закону с учетом взаимодействия всех шести форм имеет место "положительное" аэродемпфирование, т.е. отвод энергии от колеблющейся лопатки в основной поток. Численный анализ связанных колебаний подтвердил аэродемпфирование при взаимодействии первых шести собственных форм.

Список литературы: 1. Гнесин В.И. Аэроупругие явления в турбомашинах / В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная // Аэрогидродинамика и Аэроакустика: Проблемы и перспективы. Сборник научных трудов ХАИ, 2009. – № 3. – С. 53-62. 2. He L. Integration of 2D Fluid - Structure Coupled Systems for Calculation of Turbomachinery Aerodynamic, Aeroelastic Instabilities / L. He // J. of Comp. Fluid Dynamics. – 1994. – P. 217-231. 3. Гнесин В.И. Численный анализ аэроупругих характеристик турбинной ступени в трехмерном потоке вязкого газа / В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная // Вестник НТУ ХПИ. Серия: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2008. – № 6. – С. 13-22. 4. Bolcs A. Aeroelasticity in Turbomachines: Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results / A. Bolcs and T.H. Fransson // Communication du LTAT-EPFL, Switzerland. – 1986. – № 13. – 174 p. 5. Gallus H.E. Three-dimensional unsteady flow in a single axial-flow turbine and compressor / H.E. Gallus, C.A. Poensgen, K.J. Zesch // Proc. of the 6th Intern. Symp. on UAATP, Sept., 15-19. – 1991. – Notre Dame University, IN, USA. – 1991. – P. 487-506. 6. Соколовский Г.А. Нестационарные и вязкие течения в турбомашинах / Г.А. Соколовский, В.И. Гнесин. – Киев: Наук. думка, 1986. – 260 с. 7. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с. 8. Konig S. Experimental Investigation of the Clocking Effect in a 1.5 – Stage Axial Turbine – Part 1: Time Averaged Results / S. Konig, B. Stoffel, M.T. Schobeiri // ASME J. Turbomachines. – 2009. – 131. – P. 1-12.

Bibliography (transliterated): 1. *Gnesin V.I.* Ajerouprugie javlenija v turbomashinah / *V.I. Gnesin, L.V. Kolodjazhnaja* // Ajerogidrodinamika i Ajerookustika: Problemy i perspektivy. Sbornik nauchnyh trudov HAI, 2009. – № 3.– S. 53-62. 2. *He L.* Integration of 2D Fluid - Structure Coupled Systems for Calculation of Turbomachinery Aerodynamic, Aeroelastic Instabilities / *L. He* // *J. of Comp. Fluid Dynamics*. – 1994. – S. 217-231. 3. *Gnesin V.I.* Chislennyj analiz ajerouprugih karakteristik turbinnoj stupeni v trehmernom potoke vjazkogo gaza / *V.I. Gnesin, L.V. Kolodjazhnaja* // Vestnik NTU HPI. Serija: Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie. – 2008.– № 6. – S. 13-22. 4. *Bolcs A.* Aeroelasticity in Turbomachines: Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results / *A. Bolcs and T.H. Fransson* // Communication du LTAT-EPFL, Switzerland. – 1986. – № 13. – 174 p. 5. *Gallus H.E.* Three-dimensional unsteady flow in a single axial-flow turbine and compressor / *H.E. Gallus, C.A. Poensgen, K.J. Zesch* // Proc. of the 6th Intern. Symp. on UAATP, Sept., 15-19. – 1991. – Notre Dame University, IN, USA. – 1991. – S. 487-506. 6. *Sokolovskij G.A.* Nestacionarnye i vjazkie techenija v turbomashinah / *G.A. Sokolovskij, V.I. Gnesin*. – Kiev: Nauk. dumka, 1986. – 260 s. 7. Chislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoj dinamiki / *Pod red. S.K. Godunova*. – M.: Nauka, 1976. – 400 s. 8. *Konig S.* Experimental Investigation of the Clocking Effect in a 1.5 – Stage Axial Turbine – Part 1: Time Averaged Results / *S. Konig, B. Stoffel, M.T. Schobeiri* // ASME J. Turbomachines. – 2009. – 131. – P. 1-12.

Получена (received) 30.03.2014

Статью представил д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов ИПМаш НАН Украины Боробьев Ю.С.

Gnesin Vitaly, Dr.Sci.Tech, Professor
Institute of Mechanical Engineering Problems
of National Academy of Sciences of the Ukraine
Str. Pozharsky, 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046
Tel.: (057) 94-18-67, e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0001-6411-6158

Kolodyazhnaya Lyubov, Dr.Sci.Tech, leading scientific worker
Institute of Mechanical Engineering Problems
of National Academy of Sciences of the Ukraine
Str. Pozharsky, 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046
Tel.: (057) 94-18-67, e-mail: gnesin@ipmach.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0001-5469-4325

Rzadkowski Romuald, Dr.Sci.Tech, Professor
The Szewalski Institute of Fluid-Flow Machinery
Polish Academy of Sciences
Str. Fiszerza, Gdańsk, Poland, 80-231
Tel.: (+48) 58 3460 881, 58 3411 271, e-mail: z3@imp.gda.pl

Kolisnyk Oleksandr, Post Graduate Student
Institute of Mechanical Engineering Problems
of National Academy of Sciences of the Ukraine
Str. Pozharsky, 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046
Tel.: (057) 349-47-78, e-mail: sasha_24061988@mail.ru

УДК 681.5

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А.Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ, канд. техн. наук, доц., докторант
НТУ "ХПИ"

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ К ЭКВИВАЛЕНТНЫМ ЛИНЕЙНЫМ В ФОРМЕ БРУНОВСКОГО

Разработаны программные средства для автоматизации преобразований нелинейных моделей объектов к эквивалентным линейным моделям. С их помощью выполнен синтез линейной математической модели движения дизель-поезда в форме Бруновского, которая учитывает параллельную работу трёх тяговых асинхронных двигателей. Полученная модель может использоваться для поиска оптимальных управлений, а также для исследования процессов буксования и параллельной работы двигателей. Ил.: 2. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: форма Бруновского, линейная математическая модель движения дизель-поезда, параллельная работа двигателей.

Постановка проблемы и анализ литературы. Одними из главных задач, которые ставятся перед современными системами автоматического управления подвижным составом, являются задачи, связанные с выбором оптимальных режимов ведения поездов, при которых соблюдается заданный график движения и минимизируется расход энергоресурсов, а также задачи, связанные с оптимизацией работы отдельных составных частей подвижного состава [1 – 9]. Вопросами создания подобных систем управления занимались и занимаются множество специалистов, работы которых основаны на теории управления и теории оптимальных систем управления. К методам, получившим наиболее широкое распространение при проектировании систем управления железнодорожным транспортом, относятся, в первую очередь, методы функций Ляпунова, принципа максимума Понтрягина, классического вариационного исчисления, терминальных управлений и т.д. Данные методы позволяют выполнять синтез регуляторов для нелинейных объектов, однако они обладают и существенными недостатками, так как накладывают ограничения на порядок системы дифференциальных уравнений (не выше третьего порядка) и число управлений. Это значит, что их использование для синтеза оптимальных систем управления тяговым подвижным составом затруднено, особенно если речь идет об управлении приводом переменного тока. Трудности синтеза систем управления тяговыми асинхронными приводами, которые обычно более или менее точно описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений

выше третьего-четвертого порядка, привели к разработке или упрощенных моделей второго-третьего порядка, или к линеаризации исходных нелинейных моделей с последующим применением математического аппарата теории оптимального управления линейными системами. Линеаризация может выполняться как в малой окрестности рабочей точки (по Тейлору), так и с помощью методов современной геометрии. Исследования параллельной работы двигателей и буксования требуют в математической модели наличия двух или большего числа двигателей. При этом линеаризация по Тейлору практически неприменима для синтеза систем управления тяговыми электроприводами. В связи с этим более перспективной выглядит линеаризация нелинейных систем управления с помощью обратной связи в пространствах "вход – выход" или "вход – состояние" [10, 11]. Однако в этом случае необходимо выполнять трудоемкие аналитические преобразования, которые не автоматизированы ни в одном из известных пакетов моделирования и которые стали причиной разрыва между теоретическими результатами геометрической теории управления и решением практических задач синтеза систем управления [12, 13].

Целью исследования является разработка программных средств для универсального пакета моделирования, позволяющих автоматизировать сложные аналитические преобразования, необходимые в геометрической теории управления при получении из нелинейных математических моделей объектов эквивалентных линейных моделей в форме Бруновского. Демонстрация работоспособности программного обеспечения при синтезе линейной математической модели в форме Бруновского, описывающей процесс движения дизель-поезда.

В процессе разработки программного обеспечения согласно описанного в работе [13] алгоритма синтезированы функции, которые выполняют следующие действия:

- формируют векторные поля объектов по их моделям;
- проверяют условия инволютивности;
- вычисляют производные Ли;
- вычисляют преобразования переменных расширенной модели объекта в переменные в форме Бруновского;
- выполняют интегрирование системы дифференциальных уравнений.

Продемонстрируем эти функции в процессе синтеза линейной математической модели дизель-поезда с тремя тяговыми асинхронными двигателями.

Движение дизель-поезда в режиме тяги и в режиме перехода от тяги к буксованию может быть описано следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = k_1 V; \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{q=1}^3 (k_2^q \mu^q (\Psi_{ur}^{q;qs} - \Psi_{vr}^{q;qs})) - k_3 - k_4 V - k_5 V^2; \quad (2)$$

$$\frac{di_{us}^q}{dt} = \alpha^q \beta^q \Psi_{ur}^q - \gamma^q i_{us}^q + \frac{k_6 p \beta^q}{r^q} V \Psi_{vr}^q + \frac{1}{\sigma^q L_s^q} u_{us}^q, \quad q = \overline{1, 3}; \quad (3)$$

$$\frac{di_{vs}^q}{dt} = \alpha^q \beta^q \Psi_{vr}^q - \gamma^q i_{vs}^q + \frac{k_6 p \beta^q}{r^q} V \Psi_{ur}^q + \frac{1}{\sigma^q L_s^q} u_{vs}^q, \quad q = \overline{1, 3}; \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi_{ur}^q}{dt} = -\alpha^q \Psi_{ur}^q - \frac{k_6 p}{r^q} V \Psi_{vr}^q + \alpha^q L_m^q i_{us}^q, \quad q = \overline{1, 3}; \quad (5)$$

$$\frac{d\Psi_{vr}^q}{dt} = -\alpha^q \Psi_{vr}^q - \frac{k_6 p}{r^q} V \Psi_{ur}^q + \alpha^q L_m^q i_{vs}^q, \quad q = \overline{1, 3}; \quad (6)$$

где S – расстояние, пройденное от начала перегона; t – время; $k_1, k_2, k_2^1, k_2^2, k_2^3, k_3, \dots, k_6$ – постоянные коэффициенты; V – скорость

движения состава; $\mu^q = \frac{p L_m^q}{J^q L_r^q}$; q – число двигателей; p – число пар

полюсов статора у каждого двигателя; L_m^q ($q = \overline{1, 3}$) – индуктивность

контура намагничивания (взаимная индуктивность) q -го двигателя; J^q

($q = \overline{1, 3}$) – приведенный момент инерции q -го двигателя; L_r^q, L_s^q

($q = \overline{1, 3}$) – полные индуктивности, соответственно ротора и статора;

Ψ_{ur}^q, Ψ_{vr}^q ($q = \overline{1, 3}$) – потокосцепления по осям u и v роторов тяговых

двигателей; i_{vs}^q, i_{us}^q ($q = \overline{1, 3}$) – статорные токи двигателей по осям u и v ;

$\alpha^q = \frac{1}{T_r^q}$; T_r^q ($q = \overline{1, 3}$) – постоянная времени ротора q -го двигателя;

$\beta^q = \frac{L_m^q}{\sigma^q L_s^q L_r^q}$; $\sigma^q = 1 - \frac{(L_m^q)^2}{L_s^q L_r^q}$ ($q = \overline{1, 3}$) – полный коэффициент рассеяния

q -го тягового электродвигателя; $\gamma^q = \frac{R_r^q (L_m^q)^2}{\sigma^q L_s^q (L_r^q)^2} + \frac{R_s^q}{\sigma^q L_s^q}$; R_r^q , R_s^q

($q = \overline{1, 3}$) – активные сопротивления роторных и статорных обмоток тяговых электродвигателей; r^q ($q = \overline{1, 3}$) – радиус колеса q -го тягового двигателя; u_{us}^q , u_{vs}^q ($q = \overline{1, 3}$) – статорные напряжения q -го двигателя по осям u и v .

Преобразование исходной математической модели (1) – (6) к линейному виду начнем с введения в правые части обыкновенных дифференциальных уравнений (3) и (4) новых управлений U_i ($i = \overline{1, 6}$), позволяющих убрать из соответствующих уравнений нелинейные части:

$$U_1 = \alpha^1 \beta^1 \Psi_{ur}^1 + \frac{k_6 p \beta^1}{r^1} V \Psi_{vr}^1 + \frac{u_{us}^1}{\sigma^1 L_s^1}; \quad U_2 = \alpha^1 \beta^1 \Psi_{vr}^1 + \frac{k_6 p \beta^1}{r^1} V \Psi_{ur}^1 + \frac{u_{vs}^1}{\sigma^1 L_s^1};$$

$$U_3 = \alpha^2 \beta^2 \Psi_{ur}^2 + \frac{k_6 p \beta^2}{r^2} V \Psi_{vr}^2 + \frac{u_{us}^2}{\sigma^2 L_s^2}; \quad U_4 = \alpha^2 \beta^2 \Psi_{vr}^2 + \frac{k_6 p \beta^2}{r^2} V \Psi_{ur}^2 + \frac{u_{vs}^2}{\sigma^2 L_s^2};$$

$$U_5 = \alpha^3 \beta^3 \Psi_{ur}^3 + \frac{k_6 p \beta^3}{r^3} V \Psi_{vr}^3 + \frac{u_{us}^3}{\sigma^3 L_s^3}; \quad U_6 = \alpha^3 \beta^3 \Psi_{vr}^3 + \frac{k_6 p \beta^3}{r^3} V \Psi_{ur}^3 + \frac{u_{vs}^3}{\sigma^3 L_s^3}.$$

Обозначив $x_1 = S$; $x_2 = V$; $x_3 = \Psi_{ur}^1$; $x_4 = i_{vs}^1$; $x_5 = \Psi_{vr}^1$; $x_6 = i_{us}^1$;
 $x_7 = \Psi_{ur}^2$; $x_8 = i_{vs}^2$; $x_9 = \Psi_{vr}^2$; $x_{10} = i_{us}^2$; $x_{11} = \Psi_{ur}^3$; $x_{12} = i_{vs}^3$; $x_{13} = \Psi_{vr}^3$;
 $x_{14} = i_{us}^3$; $a_{11} = k_1$; $a_{21} = a_{22} = k_2^1 \mu^1$; $a_{23} = a_{24} = k_2^2 \mu^2$; $a_{25} = a_{26} = k_2^3 \mu^3$;
 $a_{27} = k_3$; $a_{28} = k_4$; $a_{29} = k_5$; $a_{31} = a_{51} = -\alpha^1$; $a_{32} = a_{52} = -\frac{k_6 p}{r^1}$;
 $a_{33} = a_{53} = \alpha^1 L_m^1$; $a_{41} = a_{61} = -\gamma^1$; $a_{71} = a_{91} = -\alpha^2$; $a_{72} = a_{92} = -\frac{k_6 p}{r^2}$;
 $a_{73} = a_{93} = \alpha^2 L_m^2$; $a_{81} = a_{101} = -\gamma^2$; $a_{111} = a_{131} = -\alpha^3$; $a_{112} = a_{132} = -\frac{k_6 p}{r^3}$;
 $a_{113} = a_{133} = \alpha^3 L_m^3$; $a_{121} = a_{141} = -\gamma^3$, из системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) – (6) получим следующую математическую модель, описывающую движение дизель-поезда по железнодорожному перегону:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_2 = f_1; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_3x_4 - a_{22}x_5x_6 + a_{23}x_7x_8 - a_{24}x_9x_{10} + a_{25}x_{11}x_{12} - a_{26}x_{13}x_{14} - a_{27} - \\ &- a_{28}x_2 - a_{29}x_2^2 = f_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_3 + a_{32}x_2x_5 + a_{33}x_6 = f_3; & \frac{dx_4}{dt} &= a_{41}x_4 + U_1 = f_4 + U_1; \\ \frac{dx_5}{dt} &= a_{51}x_5 + a_{52}x_2x_3 + a_{53}x_4 = f_5; & \frac{dx_6}{dt} &= a_{61}x_6 + U_2 = f_6 + U_2; \quad (7) \\ \frac{dx_7}{dt} &= a_{71}x_7 + a_{72}x_2x_9 + a_{73}x_{10} = f_7; & \frac{dx_8}{dt} &= a_{81}x_8 + U_3 = f_8 + U_3; \\ \frac{dx_9}{dt} &= a_{91}x_9 + a_{92}x_2x_7 + a_{93}x_8 = f_9; & \frac{dx_{10}}{dt} &= a_{101}x_{10} + U_4 = f_{10} + U_4; \\ \frac{dx_{11}}{dt} &= a_{111}x_{11} + a_{112}x_2x_{13} + a_{113}x_{14} = f_{11}; & \frac{dx_{12}}{dt} &= a_{121}x_{12} + U_5 = f_{12} + U_5; \\ \frac{dx_{13}}{dt} &= a_{131}x_{13} + a_{132}x_2x_{11} + a_{133}x_{12} = f_{13}; & \frac{dx_{14}}{dt} &= a_{141}x_{14} + U_6 = f_{14} + U_6. \end{aligned}$$

С системой дифференциальных уравнений (7) связаны векторные поля $X(x) = |f_1, f_2, f_3, \dots, f_{14}|^T$,

$$Y_1 = |0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T,$$

$$Y_2 = |0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T,$$

$$Y_3 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T,$$

$$Y_4 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0|^T,$$

$$Y_5 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0|^T,$$

$$Y_6 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1|^T,$$

которые в пакете Matlab могут быть заданы следующим образом:

```
f1 = sym('a11 * x2');
f2 = sym('a21 * x3 * x4 - a22 * x5 * x6 + a23 * x7 * x8 - a24 * x9 * x10 + a25 *
x11 * x12 - a26 * x13 * x14 - a27 - a28 * x2 - a29 * x2^2');
f3 = sym('a31 * x3 + a32 * x2 * x5 + a33 * x6');
f4 = sym('a41 * x4');
```

```

f5 = sym('a51 * x5 + a52 * x2 * x3 + a53 * x4');
f6 = sym('a61 * x6');
f7 = sym('a71 * x7 + a72 * x2 * x9 + a73 * x10');
f8 = sym('a81 * x8');
f9 = sym('a91 * x9 + a92 * x2 * x7 + a93 * x8');
f10 = sym('a101 * x10');
f11 = sym('a111 * x11 + a112 * x2 * x13 + a113 * x14');
f12 = sym('a121 * x12');
f13 = sym('a131 * x13 + a132 * x2 * x11 + a133 * x12');
f14 = sym('a141 * x14');
X = [f1; f2; f3; f4; f5; f6; f7; f8; f9; f10; f11; f12; f13; f14];
Y1 = [0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
Y2 = [0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
Y3 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
Y4 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0; 0];
Y5 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0];
Y6 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0];
x=[sym('x1') 'x2' 'x3' 'x4' 'x5' 'x6' 'x7' 'x8' 'x9' 'x10' 'x11' 'x12' 'x13' 'x14'];

```

Система уравнений (7) может быть преобразована к форме Бруновского только в случае, если инволютивны распределения $M^0 = \text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_6\}$, $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_6, L_X Y_1, \dots, L_X Y_6\}$ и M^2 для этой системы [11], где $\text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6\}$ – линейная оболочка векторов Y_1, Y_2, \dots, Y_6 ; $L_X Y_k$ ($k = \overline{1, 6}$) – производные Ли вдоль векторного поля X векторных полей Y_k ($k = \overline{1, 6}$).

Для проверки возможности преобразования широкого класса нелинейных систем управления к канонической форме Бруновского была разработана функция *involutivity*(M, x), проверяющая выполнение условий инволютивности последовательности распределений, которая возвращает значение "1", если для распределения M условия инволютивности выполняются и значение "0" – если нет, функция представляет собой следующую последовательность команд:

```

function involutive = involutivity(S, x)
saved_rank = rank(S);
lenght = size(S, 2);
for i = 1 : (lenght - 1)
for j = (i + 1) : lenght
S = [S diffie(S(:,i), S(:,j), x)]; end
end
involutive = saved_rank == rank(S);
end

```

Проверка инволютивности распределения M^0 в пакете моделирования Matlab с использованием описанной выше функции осуществляется следующим образом:

```
M0 = [Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6];
involutive = involutivity(M0, x);
>> involutive = 1
```

Поскольку векторные поля Y_i ($i = \overline{1, 6}$) постоянны, то распределение M^0 – инволютивно и размерность распределения $\dim M^0 = 6$.

Проанализируем распределение M^1 , для этого сначала осуществим вычисление производных Ли векторных полей Y_k ($k = \overline{1, 6}$) вдоль векторного поля X с помощью разработанной функции $Dif_Li(X, Y, x, N)$, которая возвращает N -ю производную Ли вдоль векторного поля X векторного поля Y , по элементам вектора x . Функция вычисления производной Ли представляет собой следующую последовательность команд:

```
function U = Dif_Li(X, Y, variables, N)
U(:, 1) = sym(Y);
for i = 2 : N+2
U(:, i) = diffli(X, U(:, i - 1), variables); end
end
```

Проверка инволютивности распределения M^1 в пакете моделирования Matlab с использованием функций Dif_Li и $involutivity$ осуществляется следующим образом:

```
C1_1 = Dif_Li(X, Y1, x, 2); M1_1 = C1_1(:, 1 : (size(C1_1, 2) - 1));
C1_2 = Dif_Li(X, Y2, x, 2); M1_2 = C1_2(:, 1 : (size(C1_2, 2) - 1));
C1_3 = Dif_Li(X, Y3, x, 2); M1_3 = C1_3(:, 1 : (size(C1_3, 2) - 1));
C1_4 = Dif_Li(X, Y4, x, 2); M1_4 = C1_4(:, 1 : (size(C1_4, 2) - 1));
C1_5 = Dif_Li(X, Y5, x, 2); M1_5 = C1_5(:, 1 : (size(C1_5, 2) - 1));
C1_6 = Dif_Li(X, Y6, x, 2); M1_6 = C1_6(:, 1 : (size(C1_6, 2) - 1));
M1=[M1_1(:,1), M1_2(:,1), M1_3(:,1), M1_4(:,1), M1_5(:,1), M1_6(:,1),
M1_1(:,2), M1_2(:,2), M1_3(:,2), M1_4(:,2), M1_5(:,2), M1_6(:,2)];
involutive = involutivity(M1, x);
>> involutive = 0
```

Проверка условий инволютивности показывает, что распределение M^1 не является инволютивным, однако проверка всех его

подраспределений $M_k^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, L_X Y_k\}$, $k = \overline{1, 6}$,
показывает, что они являются инволютивными:

```
M11=[M1_1(:,1), M1_2(:,1), M1_3(:,1), M1_4(:,1), M1_5(:,1), M1_6(:,1),
M1_1(:,2)];
involutive = involutivity(M11, x);
>>involutive = 1
```

.....

```
M16=[M1_1(:,1), M1_2(:,1), M1_3(:,1), M1_4(:,1), M1_5(:,1), M1_6(:,1),
M1_6(:,2)];
involutive = involutivity(M16, x);
>>involutive = 1
```

Поэтому дополнительные переменные или интеграторы можно вводить в любой канал управления. Однако введение одного, двух, трех, четырех или пяти интеграторов в любые каналы не позволяет решить проблему получения инволютивного распределения M^1 для расширенной системы. Распределение M^1 становится инволютивным только при введении одного интегратора в каждый канал объекта управления.

Для расширенной модели объекта управления введем следующие обозначения:

$$y_1 = x_1; y_2 = x_2; y_3 = x_3; y_4 = x_4; y_5 = U_1; \frac{dy_5}{dt} = U_1^*;$$

$$y_6 = x_5; y_7 = x_6; y_8 = U_2; \frac{dy_8}{dt} = U_2^*;$$

$$y_9 = x_7; y_{10} = x_8; y_{11} = U_3; \frac{dy_{11}}{dt} = U_3^*;$$

$$y_{12} = x_9; y_{13} = x_{10}; y_{14} = U_4; \frac{dy_{14}}{dt} = U_4^*;$$

$$y_{15} = x_{11}; y_{16} = x_{12}; y_{17} = U_5; \frac{dy_{17}}{dt} = U_5^*;$$

$$y_{18} = x_{13}; y_{19} = x_{14}; y_{20} = U_6; \frac{dy_{20}}{dt} = U_6^*.$$

В этих обозначениях расширенная модель объекта записывается таким образом:

$$\frac{dy_1}{dt} = a_{11}y_2 = \varphi_1;$$

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21}y_3y_4 - a_{22}y_6y_7 + a_{23}y_9y_{10} - a_{24}y_{12}y_{13} + a_{25}y_{15}y_{16} -$$

$$- a_{26}y_{18}y_{19} - a_{27} - a_{28}y_2 - a_{29}y_2^2 = \varphi_2;$$

$$\frac{dy_3}{dt} = a_{31}y_3 + a_{32}y_2y_6 + a_{33}y_7 = \varphi_3;$$

$$\frac{dy_4}{dt} = a_{41}y_4 + y_5 = \varphi_4; \quad \frac{dy_5}{dt} = U_1^*; \quad \varphi_5 = 0;$$

$$\frac{dy_6}{dt} = a_{51}y_6 + a_{52}y_2y_3 + a_{53}y_4 = \varphi_6;$$

$$\frac{dy_7}{dt} = a_{61}y_7 + y_8 = \varphi_7; \quad \frac{dy_8}{dt} = U_2^*; \quad \varphi_8 = 0;$$

$$\frac{dy_9}{dt} = a_{71}y_9 + a_{72}y_2y_{12} + a_{73}y_{13} = \varphi_9;$$

$$\frac{dy_{10}}{dt} = a_{81}y_{10} + y_{11} = \varphi_{10}; \quad \frac{dy_{11}}{dt} = U_3^*; \quad \varphi_{11} = 0;$$

$$\frac{dy_{12}}{dt} = a_{91}y_{12} + a_{92}y_2y_9 + a_{93}y_{10} = \varphi_{12};$$

$$\frac{dy_{13}}{dt} = a_{101}y_{13} + y_{14} = \varphi_{13}; \quad \frac{dy_{14}}{dt} = U_4^*; \quad \varphi_{14} = 0;$$

$$\frac{dy_{15}}{dt} = a_{111}y_{15} + a_{112}y_2y_{18} + a_{113}y_{19} = \varphi_{15};$$

$$\frac{dy_{16}}{dt} = a_{121}y_{16} + y_{17} = \varphi_{16}; \quad \frac{dy_{17}}{dt} = U_5^*; \quad \varphi_{17} = 0;$$

$$\frac{dy_{18}}{dt} = a_{131}y_{18} + a_{132}y_2y_{15} + a_{133}y_{16} = \varphi_{18};$$

$$\frac{dy_{19}}{dt} = a_{141}y_{19} + y_{20} = \varphi_{19}; \quad \frac{dy_{20}}{dt} = U_6^*; \quad \varphi_{20} = 0.$$

С этой моделью объекта управления связаны векторные поля:

$$Y(y) = \left| \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, \varphi_9, \varphi_{10}, \right.$$

$$\left. \varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}, \varphi_{15}, \varphi_{16}, \varphi_{17}, \varphi_{18}, \varphi_{19}, \varphi_{20} \right|^T;$$

$$\begin{aligned}
 Y_1^* &= |0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T; \\
 Y_2^* &= |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T; \\
 Y_3^* &= |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T; \\
 Y_4^* &= |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0|^T; \\
 Y_5^* &= |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0|^T; \\
 Y_6^* &= |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1|^T,
 \end{aligned}$$

которые в пакете Matlab могут быть заданы следующим образом:

```

f1 = sym('a11 * y2');
f2 = sym('a21 * y3 * y4 - a22 * y6 * y7 + a23 * y9 * y10 - a24 * y12 * y13 + a25
* y15 * y16 - a26 * y18 * y19 - a27 - a28 * y2 - a29 * y2^2');
f3 = sym('a31 * y3 + a32 * y2 * y6 + a33 * y7');

```

```

.....
f19 = sym('a141 * y19 + y20');
f20 = sym('0');
Y_new = [φ1; φ2; φ3; φ4; φ5; φ6; φ7; φ8; φ9; φ10; φ11; φ12; φ13; φ14; φ15;
φ16; φ17; φ18; φ19; φ20];
Y1_new = [0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];

```

```

.....
Y6_new = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1')];
y_new = [sym('y1') 'y2' 'y3' 'y4' 'y5' 'y6' 'y7' 'y8' 'y9' 'y10' 'y11' 'y12' 'y13' 'y14'
'y15' 'y16' 'y17' 'y18' 'y19' 'y20'];

```

Поскольку вектора Y_k^* ($k = \overline{1, 6}$) постоянны, то распределение $M^{0*} = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, Y_5^*, Y_6^*\}$ – инволютивно, что подтверждает и программное обеспечение.

```

M0_new=[Y1_new,Y2_new, Y3_new,Y4_new,Y5_new,Y6_new];
involutive = involutivity(M0_new, y_new);
>> involutive = 1

```

Так как производные Ли вдоль векторного поля Y векторных полей Y_k^* ($k = \overline{1, 6}$) являются постоянными векторами, то распределение M^{1*} для расширенной системы является инволютивным.

Проверка инволютивности распределения $M^{2*} = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, Y_5^*, Y_6^*, L_Y Y_1^*, L_Y Y_2^*, L_Y Y_3^*, L_Y Y_4^*, L_Y Y_5^*, L_Y Y_6^*, L_Y^2 Y_1^*,$

$L_Y^2 Y_2^*, L_Y^2 Y_3^*, L_Y^2 Y_4^*, L_Y^2 Y_5^*, L_Y^2 Y_6^* \}$, где $L_Y^2 Y_k$ ($k = \overline{1, 6}$) – производные Ли второго порядка, показывает, что оно не является инволютивным:

```
M2_new = [M1_1_new(:,1), M1_2_new(:,1), M1_3_new(:,1), M1_4_new(:,1),
M1_5_new(:,1), M1_6_new(:,1), M1_1_new(:,2), M1_2_new(:,2),
M1_3_new(:,2), M1_4_new(:,2), M1_5_new(:,2), M1_6_new(:,2),
M1_1_new(:,3), M1_2_new(:,3), M1_3_new(:,3), M1_4_new(:,3),
M1_5_new(:,3), M1_6_new(:,3)];
involutive = involutivity(M2_new, y_new);
>> involutive = 0
```

Однако инволютивными являются все подраспределения $M_k^{2*} = \text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_6, L_Y Y_1^*, L_Y Y_2^*, \dots, L_Y Y_6^*, L_Y^2 Y_k^*\}$, $k = \overline{1, 6}$, распределения M^{2*} :

```
M21_new = [M1_1_new(:,1), M1_2_new(:,1), M1_3_new(:,1), M1_4_new(:,1),
M1_5_new(:,1), M1_6_new(:,1), M1_1_new(:,2), M1_2_new(:,2),
M1_3_new(:,2), M1_4_new(:,2), M1_5_new(:,2), M1_6_new(:,2),
M1_1_new(:,3)];
involutive = involutivity(M21_new, y_new)
>> involutive = 1
```

.....

```
M26_new = [M1_1_new(:,1), M1_2_new(:,1), M1_3_new(:,1), M1_4_new(:,1),
M1_5_new(:,1), M1_6_new(:,1), M1_1_new(:,2), M1_2_new(:,2),
M1_3_new(:,2), M1_4_new(:,2), M1_5_new(:,2), M1_6_new(:,2),
M1_6_new(:,3)];
involutive = involutivity(M26_new, y_new)
>> involutive = 1
```

Этого оказывается достаточно для осуществления динамической линеаризации и получения системы линейных дифференциальных уравнений в форме Бруновского. На основании теоремы о линейных эквивалентах для нелинейных аффинных систем с m управлениями [11], получим, что каноническая форма Бруновского имеет шесть клеток, а индекс управляемости k_{\max} для данного объекта равен шести. Математическая модель объекта управления в форме Бруновского в пространстве "вход – состояние" имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dz_i}{dt} &= z_{i+1}, \quad i = \overline{1, 20}, \quad i \neq 5, 8, 11, 14, 17, 20; \\ \frac{dz_5}{dt} &= v_1; \quad \frac{dz_8}{dt} = v_2; \quad \frac{dz_{11}}{dt} = v_3; \quad \frac{dz_{14}}{dt} = v_4; \quad \frac{dz_{17}}{dt} = v_5; \quad \frac{dz_{20}}{dt} = v_6, \end{aligned} \quad (8)$$

где y_j ($j = \overline{1, 6}$) – управления.

Поскольку модель объекта в форме Бруновского имеет шесть клеток, то необходимо определить шесть функций $T_j(\mathbf{y})$ ($j = \overline{1, 6}$), преобразующих переменные расширенной модели объекта управления в переменные модели в форме Бруновского:

$$z_1 = T_1(\mathbf{y}); z_6 = T_2(\mathbf{y}); z_9 = T_3(\mathbf{y}); z_{12} = T_4(\mathbf{y}); z_{15} = T_5(\mathbf{y}); z_{18} = T_6(\mathbf{y}).$$

Методика определения этих функций известна [8, 11, 13]. В данном случае они являются однокомпонентными составляющими вектора $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_{20})$. Из этих функций путем последовательного дифференцирования вдоль векторного поля $\mathbf{Y}^* = \mathbf{Y} + U_1\mathbf{Y}_1^* + U_2\mathbf{Y}_2^* + U_3\mathbf{Y}_3^* + U_4\mathbf{Y}_4^* + U_5\mathbf{Y}_5^* + U_6\mathbf{Y}_6^*$ можно получить выражения для определения соответственно z_2, z_3, z_4, z_5 (из функции $T_1(\mathbf{y})$), z_7, z_8 (из функции $T_2(\mathbf{y})$), z_{10}, z_{11} (из функции $T_3(\mathbf{y})$), z_{13}, z_{14} (из функции $T_4(\mathbf{y})$), z_{16}, z_{17} (из функции $T_5(\mathbf{y})$), z_{19}, z_{20} (из функции $T_6(\mathbf{y})$). В качестве примера рассмотрим получение зависимостей для определения переменных z_2, z_3, z_4, z_5 с помощью функции $T_1(\mathbf{y})$.

Для вычисления функций перехода от переменных расширенной нелинейной модели объекта управления к переменным модели в форме Бруновского применялась специально разработанная для этого функция *brunovsky*(X, Y, T, x, N), которая дифференцируя функцию T вдоль векторных полей X и Y , по элементам вектора x , возвращает для каждой клетки формы Бруновского массив из N выражений, связывающих переменные в линейной и нелинейной моделях, а также новое управление для соответствующей клетки линейной модели в форме Бруновского. Функция *brunovsky* представляет собой следующую последовательность команд:

```
function [Z, V] = brunovsky(X, Y, T, x, N)
Z(1, 1) = T;
for i = 2 : N
Z(i, 1) = diffvec(Z(i-1, 1), x, 1) * X; end
V = diffvec(Z(N, 1), x, 1) * X;
end
```

Для исследуемого объекта управления имеем: $T_1(\mathbf{y}) = y_1$, поэтому $z_1 = y_1$ и

T1 = [sym('y1')];
 [Z1_2_3_4_5, V1] = brunovsky(Y_new, [Y1_new], T1, y_new, 5);
 Z1_2_3_4_5 = simple(Z1_2_3_4_5)

Дифференцируя функцию $T_1(\mathbf{y})$ вдоль векторного поля \mathbf{Y}^* и учитывая, что z_2, z_3, z_4 и их производные не зависят от управлений, получим функции перехода к канонической форме Бруновского:

$$z_2 = \frac{dz_1}{dt} = \mathbf{L}_{\mathbf{Y}^*} T_1(\mathbf{y}) = \mathbf{L}_{\mathbf{Y}} T_1(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{20} \frac{\partial T_1(\mathbf{y})}{\partial y_i} \varphi_i = a_{11} y_2 ;$$

$$z_3 = \frac{dz_2}{dt} = \mathbf{L}_{\mathbf{Y}^*} (\mathbf{L}_{\mathbf{Y}} T_1(\mathbf{y})) = \mathbf{L}_{\mathbf{Y}} (a_{11} y_2) = \sum_{i=1}^{20} \frac{\partial (\mathbf{L}_{\mathbf{Y}} T_1(\mathbf{y}))}{\partial y_i} \varphi_i = a_{11} \varphi_2 =$$

$$= a_{11} (a_{21} y_3 y_4 - a_{22} y_6 y_7 + a_{23} y_9 y_{10} - a_{24} y_{12} y_{13} + a_{25} y_{15} y_{16} - a_{26} y_{18} y_{19} -$$

$$- a_{27} - a_{28} y_2 - a_{29} y_2^2);$$

$$z_4 = \frac{dz_3}{dt} = \mathbf{L}_{\mathbf{Y}^*} (\mathbf{L}_{\mathbf{Y}}^2 T_1(\mathbf{y})) = \mathbf{L}_{\mathbf{Y}} (a_{11} \varphi_2) = \sum_{i=1}^{20} \frac{\partial (\mathbf{L}_{\mathbf{Y}} (a_{11} \varphi_2))}{\partial y_i} \varphi_i =$$

$$= a_{11} [(a_{28} + 2a_{29} y_2) \varphi_2 + a_{11} a_{25} y_{16} \varphi_{15} - a_{11} a_{26} y_9 \varphi_{18} + a_{11} a_{21} y_4 \varphi_3 +$$

$$+ a_{11} a_{23} y_{10} \varphi_9 - a_{11} a_{22} y_7 \varphi_6 - a_{11} a_{24} y_{13} \varphi_{12} - a_{11} a_{24} y_{12} \varphi_{13} + a_{11} a_{25} y_{15} \varphi_{16} -$$

$$- a_{11} a_{26} y_{18} \varphi_{19} + a_{11} a_{21} y_3 \varphi_4 + a_{11} a_{23} y_9 \varphi_{10} - a_{11} a_{22} y_6 \varphi_7];$$

$$z_5 = \frac{dz_4}{dt} = \mathbf{L}_{\mathbf{Y}^*} (\mathbf{L}_{\mathbf{Y}}^3 T_1(\mathbf{y})) = \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial (\mathbf{L}_{\mathbf{Y}^*} (\mathbf{L}_{\mathbf{Y}}^2 T_1(\mathbf{y})))}{\partial y_i} \varphi_i .$$

Аналогичным образом могут быть получены соотношения для определения остальных переменных модели в форме Бруновского.

На рис. 1 и 2 приведены процессы, полученные с помощью математических моделей (7) и (8).

На рис. 1 с помощью переменных x_1 (модель (7)) и z_1 (модель (8)) показано изменение во времени пройденного дизель-поездом расстояния при разгоне состава до 60 км/ч на ровном участке железнодорожного пути. Как следует из рисунка $x_1 \equiv z_1$. На рис. 2 показаны изменения скорости дизель-поезда, полученные с помощью модели (7), переменная x_2 , и модели (8), переменная z_2 . как видно из рисунка $x_2 \equiv z_2$. Таким образом, линейная математическая модель в форме Бруновского (8) эквивалентна исходной нелинейной модели объекта (7).

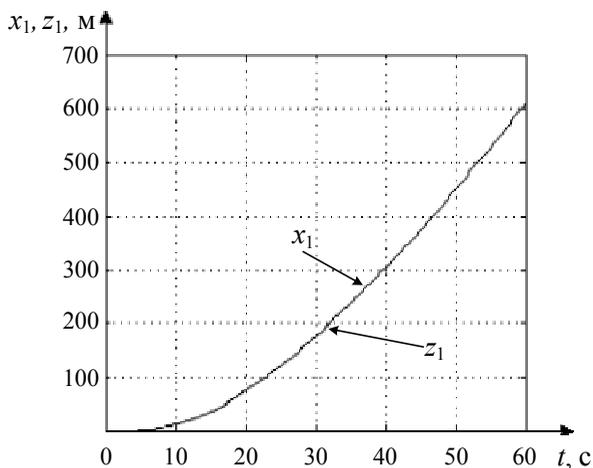


Рис. 1. Поведение переменных x_1 и z_1 во времени.

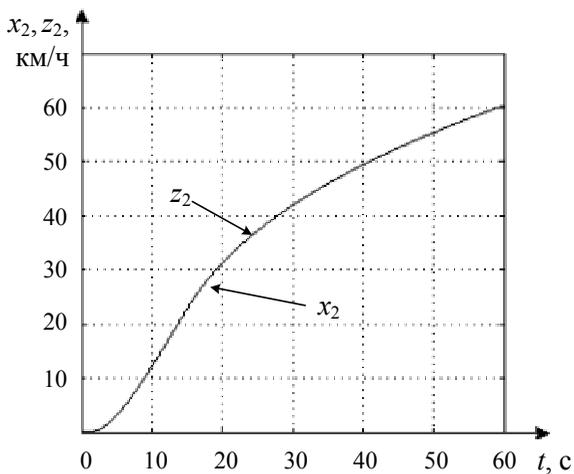


Рис. 2. Поведение переменных x_2 и z_2 во времени.

Выводы. Таким образом, для универсального пакета моделирования разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать сложные аналитические преобразования в геометрической теории управления при получении из нелинейных математических моделей объектов управления эквивалентных линейных моделей в форме Бруновского. С помощью разработанного программного обеспечения

получена линейная математическая модель движения дизель-поезда в канонической форме Бруновского, которая учитывает параллельную работу трёх тяговых асинхронных двигателей. Полученная модель может использоваться для поиска оптимальных управлений, а также для исследования процессов буксования и параллельной работы двигателей.

Список литературы: 1. *Бауэр Х.П.* Оптимальное использование сцепления на электровозе с трехфазным тяговым приводом / *Х.П. Бауэр* // Железные дороги мира. – 1987. – № 8. – С. 10-23. 2. *Ohishi K.* Adhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer / *K. Ohishi, Y. Ogawa* // IEEE, Advanced Motion Control. – April, 2000. – P. 323-328. 3. Тяговые и токовые характеристики электроподвижного состава с асинхронным тяговым двигателем / *Омельяненко В.И., Калюжный Н.Н., Кулиш Т.А., Кривякин Г.В.* // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы LXVI международной конференции. – Днепропетровск: ДИИТ, 2006. – С. 123. 4. *Шапран Е.Н.* Совершенствование микропроцессорных систем управления с высоким использованием сил сцепления / *Е.Н. Шапран* // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 23. – С. 145-154. 5. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / *Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заповловский Н.И., Леонов С.Ю.* – Х.: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с. 6. *Артеменко А.Н.* Система автоматического выравнивания нагрузки тягового электропривода карьерного электровоза / *А.Н. Артеменко* // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайло Остроградського. – Кременчук: КДН ім. Михайло Остроградського. – 2010. – Вип. 4. – Частина 3. – С. 56-58. 7. *Прутула М.Г.* Моделирование та розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів / *М.Г. Прутула, Р.Р. Шлякович* // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2007. – Вип. 5. – С. 139-145. 8. *Дмитриенко В.Д.* Синтез оптимальных законов управления тяговым электроприводом методами дифференциальной геометрии и принципа максимума / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный* // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС. – 2009. – Вип. 4 (78). – С. 42-51. 9. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти томах. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. *К.А. Пупкова и И.Д. Егунова.* – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с. 10. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и томах. Т. 5: Методы современной теории управления / Под ред. *К.А. Пупкова, Н.Д. Егунова.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с. 11. *Краснощеченко В.И.* Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза / *В.И. Краснощеченко, А.П. Грищенко.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с. 12. *Дмитриенко В.Д.* Линеаризация математической модели привода методами дифференциальной геометрии / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный* // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – № 19. – С. 64-77. 13. *Дмитриенко В.Д.* Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный.* – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Baujer H.P.* Optimal'noe ispol'zovanie sceplenija na jelektrovoze s trehfaznym t'jagovym privodom / *H.P. Baujer* // Zheleznyje dorogi mira. – 1987. – № 8. – S. 10-23. 2. *Ohishi K.* Adhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer / *K. Ohishi, Y. Ogawa* // IEEE, Advanced Motion Control. – April, 2000. – S. 323-328. 3. T'jagovye i tokovye harakteristiki jelektropodvizhnogo sostava s asinhronnym t'jagovym dvigatelem / *Omel'janenko V.I., Kaljuzhnyj N.N., Kulish T.A., Krivyakin G.V.* // Problemy i perspektivy razvitija zheleznodorozhnogo transporta: Tezisy LHVI mezhdunarodnoj konferencii. – Dnepropetrovsk: DIIT, 2006. – S. 123. 4. *Shapran E.N.*

Sovershenstvovanie mikroprocessornyh sistem upravlenija s vysokim ispol'zovaniem sil scepdenija / *E.N. Shapran* // Visnik NTU "HPI". – Harkiv: NTU "HPI". – 2006. – № 23. – S. 145-154. **5.** Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija i kontrolja lokomotivov / *Noskov V.I., Dmitrienko V.D., Zapolovskij N.I., Leonov S.Ju.* – H.: HFI "Transport Ukrainy", 2003. – 248 s. **6.** *Artemenko A.N.* Sistema avtomaticheskogo vyravnivanja nagruzki tjagovogo jelektroprivoda kar'ernogo jelektrovoza / *A.N. Artemenko* // Visnik Kremenčuc'kogo derzhavnogo universitetu im. Mihajlo Ostrograds'kogo. – Kremenčuk: KDN im. Mihajlo Ostrograds'kogo. – 2010. – Vip. 4. – Chastina 3. – S. 56-58. **7.** *Pritula M.G.* Modeljuvannja ta rozrahunok optimal'nih parametriv ruhu poizdiv / *M.G. Pritula, R.R. Shpakovich* // Fiziko-matematichne modeljuvannja ta informacijni tehnologii. – 2007. – Vip. 5. – S. 139-145. **8.** *Dmitrienko V.D.* Sintez optimal'nyh zakonov upravlenija tjagovym jelektroprivodom metodami differencial'noj geometrii i principa maksimuma / *V.D. Dmitrienko, A.Ju. Zakovorotnyj* // Sistemi obrobki informacii. – Harkiv: HUPS. – 2009. – Vip. 4 (78). – S. 42-51. **9.** Metody klassičeskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija: Učebnik v 5-ti tomah. T. 4: Teorija optimizacii sistem avtomaticheskogo upravlenija / Pod red. *K.A. Pupkova i I.D. Egunova*. – M.: MGTU im. N.Je. Bauman, 2004. – 744 s. **10.** Metody klassičeskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija: Učebnik v 5-i tomah. T. 5: Metody sovremennoj teorii upravlenija / Pod red. *K.A. Pupkova, N.D. Egunova*. – M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauman, 2004. – 784 s. **11.** *Krasnoshhjochenko V.I.* Nelinejnye sistemy: geometricheskij metod analiza i sinteza / *V.I. Krasnoshhjochenko, A.P. Grishhenko*. – M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauman. – 2005. – 520 s. **12.** *Dmitrienko V.D.* Linearizacija matematičeskoj modeli privoda metodami differencial'noj geometrii / *V.D. Dmitrienko, A.Ju. Zakovorotnyj* // Visnik NTU "HPI". – Harkiv: NTU "HPI". – 2007. – № 19. – S. 64-77. **13.** *Dmitrienko V.D.* Modelirovanie i optimizacija processov upravlenija dvizheniem dizel'-poezdov / *V.D. Dmitrienko, A.Ju. Zakovorotnyj*. – H.: Izd. centr "HTMT", 2013. – 248 s.

Поступила (received) 01.12.2014

Статью представил д-р техн. наук, проф., заслуженный изобретатель Украины, зав. кафедрой "Системы информации" НТУ "ХПИ" Серков А.А.

Dmitrienko Valerii, Dr.Tech.Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Zakovorotnyy Alexandr, Cand.Tech.Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel. (067) 546-35-27, e-mail: arcade@i.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

УДК 004.383.8: 681.322

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
С.Ю. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ АРТ, РАСПОЗНАЮЩАЯ ИЗМЕНЯЮЩИЕСЯ ОБЪЕКТЫ

На основе нейронной сети адаптивной резонансной теории (АРТ), способной определять несколько решений, разработана архитектура и алгоритмы функционирования стабильно-пластичной дискретной нейронной сети АРТ, которая может распознавать объекты, изменяющиеся в дискретные моменты времени. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: нейронная сеть, распознающая изменяющиеся объекты, адаптивная резонансная теория (АРТ), стабильно-пластичная дискретная нейронная сеть АРТ.

Постановка проблемы и анализ литературы. С помощью нейронных сетей (НС) решаются различные сложные задачи [1 – 8]. Однако, хотя многослойные перцептроны и целый ряд других НС успешно используются во многих практических приложениях, они имеют и серьёзные недостатки: большое время обучения; не обладают свойством стабильности – пластичности, то есть способностью воспринимать и запоминать новую информацию без потери или искажения уже имеющейся; не могут выделять новую входную информацию и т.д. Эти недостатки существенно затрудняют использование НС при решении практических задач, поскольку в реальных задачах, как правило, входная информация на этапе обучения НС полностью не известна и может быть получена лишь при эксплуатации реального объекта или системы, что требует многократного и трудоемкого переобучения сети и часто не позволяет использовать НС. Этих недостатков нет у нейронных сетей адаптивной резонансной теории (АРТ) [1, 2, 8 – 11]. Эти сети обнаруживают новую входную информацию и в определенной мере решают противоречивые задачи чувствительности (пластичности) к новым данным и сохранения полученной ранее информации (стабильности). Поэтому проблемы адаптации систем на основе НС в процессе эксплуатации могут решаться на основе нейронных сетей АРТ. Однако с помощью сетей АРТ не могут решаться такие важные задачи как распознавание изменяющихся во времени объектов. Распознавание таких объектов затруднено и с помощью других нейронных сетей. Во многом это связано с тем, что при

распознавании изменяющихся объектов необходимо получать число решений, равное числу моментов времени, в которые наблюдается распознаваемый объект. Однако существующие нейронные сети, за редким исключением, не позволяют получать несколько решений даже в тех случаях, когда они реально существуют. Одним из исключений является дискретная нейронная сеть АРТ, предложенная в работе [9] на основе нейронной сети АРТ-1.

Таким образом, существует общая проблема, требующая совершенствования архитектуры и алгоритмов обучения нейронных сетей с целью их более эффективного использования в науке и технике, в частности, для решения задач распознавания объектов, изменяющихся во времени.

Целью статьи является разработка на основе дискретной нейронной сети АРТ, позволяющей определять несколько решений, архитектуры и алгоритмов функционирования НС, способной распознавать объекты, изменяющиеся во времени.

Архитектура дискретной нейронной сети АРТ, способной определять несколько решений (если они имеются), приведена на рис. 1. В прямоугольнике, нарисованном пунктирной линией, изображена архитектура нейронной сети АРТ-1. Основой архитектуры сети являются три слоя нейронов:

- слой чувствительных S -нейронов, воспринимающих входную информацию в виде черно-белых изображений или бинарных входных векторов;
- слой бинарных интерфейсных Z -нейронов;
- слой распознающих Y -нейронов.

Кроме этого имеются еще три управляющих нейрона: R , G_1 и G_2 .

В любой момент времени нейроны S_i и Z_i ($i = \overline{1, n}$), G_1 и G_2 находятся в одном из двух состояний: 0 или 1.

Нейроны Y -слоя с помощью дополнительной нейронной сети, на рис. 1 не показанной, образуют слой конкурирующих нейронов. Каждый элемент Y_j ($j = \overline{1, m}$) распознающего слоя может находиться в одном из четырех состояний:

- активен, сеть АРТ-1 функционирует в режиме определения выходных сигналов нейронов распознающего слоя, выходной сигнал $U_{\text{вых}Y_j}$ удовлетворяет условию $0 \leq U_{\text{вых}Y_j} \leq 2$ и определяется выходными сигналами Z -элементов;

– активен, $U_{\text{вых}Y_j} = 1$, нейрон Y_j является победителем при текущем предъявлении входного изображения;

– неактивен, $U_{\text{вых}Y_j} = 0$, нейрон установлен в начальное состояние или проиграл соревнование с другими нейронами при текущем предъявлении входного изображения;

– заторможен, $U_{\text{вых}Y_j} = -1$, информация, хранящаяся в весах связей нейрона, не удовлетворяет текущему входному изображению по величине параметра сходства, поэтому нейрон исключен из соревнования.

Все связи нейронной сети АРТ-1 являются возбуждающими, за исключением связей от Y -элементов к нейрону G_1 и от интерфейсных Z -элементов к нейрону R , которые передают тормозящие сигналы.

Эта сеть относит предъявленное изображение к одному из запомненных классов только в случае, если оно достаточно похоже на прототип этого класса, то есть на изображение, хранящееся в весах связей нейронной сети. Если такое свойство, установленное с помощью специального параметра сходства между двумя изображениями, имеет место в режиме обучения, то найденный прототип модифицируется, чтобы стать более похожим на предъявленное сети входное изображение. В режиме распознавания – параметры сети не меняются, а только фиксируется класс, к которому относится входное изображение. При отсутствии достаточного сходства между предъявленным изображением и прототипами всех имеющихся классов, оно запоминается сетью как прототип нового класса. Это возможно благодаря тому, что информация об изображении-прототипе хранится в весах связей одного распознающего Y -нейрона, и сеть имеет значительное число неиспользуемых распознающих нейронов, избыток которых уменьшается по мере поступления новой входной информации. Наличие избыточных распознающих нейронов является принципиальной особенностью сетей АРТ, поскольку при их отсутствии новые входные изображения просто теряются. Таким образом, локальное хранение информации и наличие избыточных распознающих нейронов позволяет запоминать новую информацию (новые образы), не искажая или теряя уже имеющуюся [1, 2, 10, 11].

Выход каждого бинарного нейрона S_i ($i = \overline{1, n}$) входного слоя связан однонаправленной связью с единичным весовым коэффициентом с бинарным нейроном Z_i ($i = \overline{1, n}$) интерфейсного слоя и входами управляющих нейронов R , G_1 и G_2 . Каждый интерфейсный нейрон Z_i

$(i = \overline{1, n})$ связан со всеми элементами Y_j ($j = \overline{1, m}$) распознающего слоя и с управляющим нейроном R . Связи с весовыми коэффициентами W_{ij}^1 ($i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$), $0 \leq W_{ij}^1 \leq 1$ передают сигналы с выхода каждого Z -элемента на входы каждого Y -нейрона.

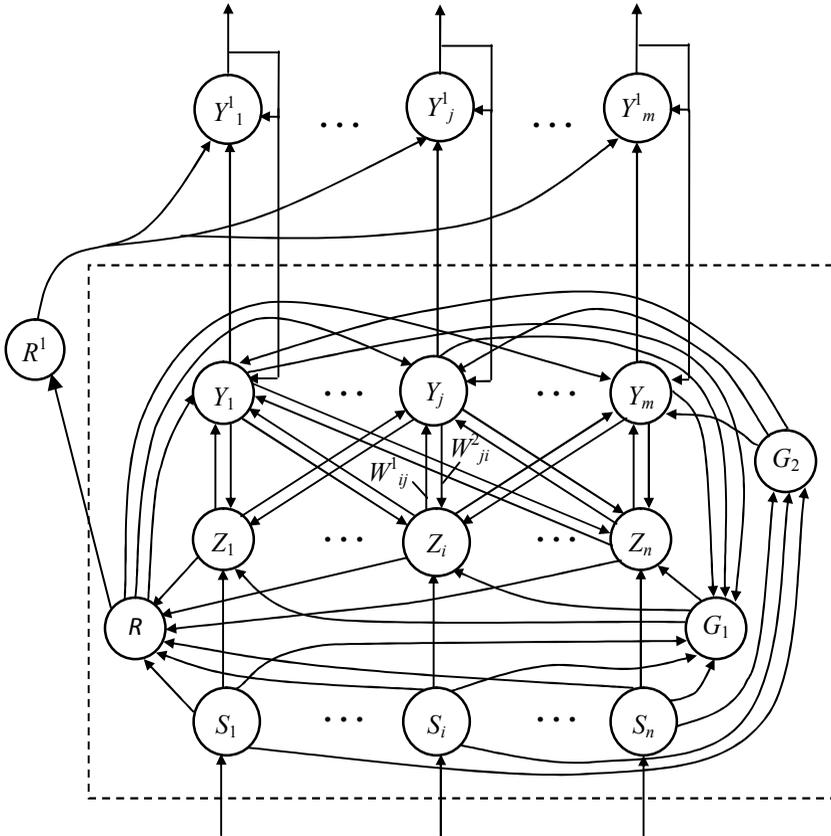


Рис. 1. Архитектура дискретной нейронной сети АРТ для поиска нескольких решений в задачах распознавания

Бинарные связи с весовыми коэффициентами W_{ji}^2 ($j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}$) связывают выход каждого распознающего

нейрона с входом каждого интерфейсного нейрона. На входы каждого Z -элемента по связям с единичными весовыми коэффициентами поступает также сигнал с выхода бинарного управляющего нейрона G_1 . Сигналы с выходов всех Z -элементов по связям с единичными весовыми коэффициентами поступают на входы управляющего нейрона R . Такими же связями выходы всех распознающих нейронов соединены со входами нейрона G_1 , а их входы – с выходами управляющих нейронов G_2 и R .

Z - и Y -нейроны получают сигналы из трех источников: Z -нейроны – от управляющего нейрона G_1 и от нейронов слоев S и Y ; Y -нейроны – от управляющих нейронов G_2 , R и от Z -нейронов. Z - и Y -элементы переходят в активное состояние по правилу "два из трех", то есть только при наличии сигналов из двух различных источников.

Для обучения дискретных нейронных обычно используется метод быстрого обучения, при котором равновесные веса связей нейронов определяются за одно предъявление входного изображения [1, 9, 11].

При предъявлении входного изображения сеть относит это изображение с помощью параметра сходства к первому близкому классу изображений, представители которых хранятся в весах связей распознающих Y -нейронов, и тем самым определяет принадлежность входного изображения к одному из классов. Остальные возможные варианты решения задачи распознавания теряются. Для расширения возможностей дискретной нейронной сети АРТ-1 и получения всех возможных вариантов решения задачи распознавания к базовой архитектуре АРТ-1 (рис. 1) добавляется еще один управляющий нейрон R^1 , инвертирующий выходные сигналы нейрона R , и слой регистрирующих бинарных нейронов Y_j^1 ($j = \overline{1, m}$). Один из входов каждого нейрона Y_j^1 связан однонаправленной бинарной связью с выходом соответствующего нейрона Y_j , а другой вход каждого нейрона Y_j^1 связан с выходом управляющего нейрона R^1 . Перед началом режима распознавания нейроны Y_j^1 ($j = \overline{1, m}$), как и другие нейроны сети, переводятся в пассивное состояние по цепям связей, не показанным на рисунке. Нейроны Y_j^1 ($j = \overline{1, m}$) переходят в активное состояние по правилу "два из трех" – при наличии единичных сигналов на выходе управляющего нейрона R^1 и нейрона-победителя Y_j . Единичный сигнал с выхода нейрона Y_j^1 по цепи обратной связи фиксирует единичный выходной сигнал элемента Y_j^1 и затормаживает нейрон-победитель Y_j .

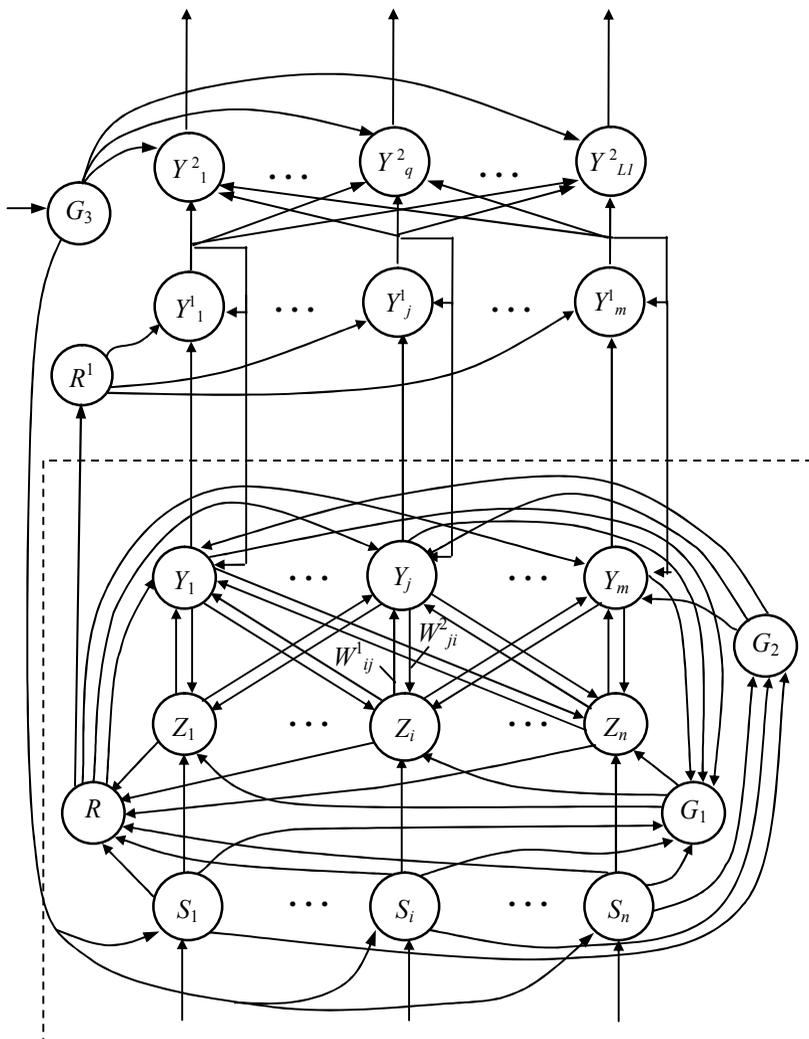


Рис. 2. Архитектура дискретной нейронной сети ART для распознавания изменяющихся во времени изображений

соответствующий объекту O_r , появляется на выходе нейрона Y_r^2 . При этом веса связей этого нейрона следующие:

$$\begin{aligned} W_{Y_{r(k+1)-k}^1 Y_r^2} &= W_{Y_{r(k+1)-k+1}^1 Y_r^2} = \dots = W_{Y_{r(k+1)}^1 Y_r^2} = 1, \\ W_{Y_1^1 Y_r^2} &= W_{Y_2^1 Y_r^2} = \dots = \\ &= W_{Y_{r(k+1)-k-1}^1 Y_r^2} = W_{Y_{r(k+1)+1}^1 Y_r^2} = W_{Y_{r(k+1)+2}^1 Y_r^2} = \dots = W_{Y_m^1 Y_r^2} = 0. \end{aligned}$$

Для распознавания нейронной сетью некоторого объекта O_r ($r = \overline{1, L}$) по его неискаженным изображениям $S_{O_r}(t_0), S_{O_r}(t_1), \dots, S_{O_r}(t_k)$ необходимо выполнить следующие шаги:

- инициировать параметры и начальные веса связей сети, все нейроны сети перевести в пассивное состояние по вспомогательным цепям связей, не показанным на рисунке;

- на вход нейронной сети подать первое изображение $S_{O_r}(t_0)$ r -го объекта и определить нейрон-победитель в слое распознающих нейронов. Этот нейрон своим единичным выходным сигналом переводит в активное состояние нейрон $Y_{r(k+1)-k}^1$ слоя нейронов Y^1 .

- на вход НС подать второе изображение $S_{O_r}(t_1)$ r -го объекта и определить нейрон-победитель в слое распознающих нейронов, который затем своим выходным сигналом переводит в активное состояние нейрон $Y_{r(k+1)-k+1}^1$;

- на вход сети последовательно подать все изображение $S_{O_r}(t_2), S_{O_r}(t_3), \dots, S_{O_r}(t_k)$ r -го объекта, которые с помощью нейрон-победителей распознающего слоя активируют нейроны $Y_{r(k+1)-k+2}^1, Y_{r(k+1)-k+3}^1, \dots, Y_{r(k+1)}^1$. Элементы слоя Y^1 своими единичными сигналами переводят в активное состояние нейрон Y_r^2 , имеющий функцию активации вида (2). Нейрон Y_r^2 и указывает, что распознан объект O_r , изменяющийся в моменты времени t_0, t_1, \dots, t_k .

При использовании зашумленных исходных данных при больших значениях параметра сходства входных изображений и изображений, хранящихся в весах связей нейронной сети, возможно ослабление требования распознавания объектов во все заданные моменты времени. В этом случае изменяется функция активации (2) нейронов выходного слоя:

$$U_{\text{вых}Y_q^2} = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{\text{вх}Y_q^2} = \sum_{q=1}^m U_{\text{вх}Y_q^1} < l, \\ 1, & \text{если } U_{\text{вх}Y_q^2} = \sum_{q=1}^m U_{\text{вх}Y_q^1} \geq l, \end{cases}$$

где l – заданное число распознанных с заданным значением параметра сходства изображений q -го объекта, изменяющегося в дискретные моменты времени.

Выводы. На основе дискретной нейронной сети адаптивной резонансной теории, способной определять несколько решений (если они имеются), разработана архитектура и алгоритмы функционирования стабильно-пластичной дискретной нейронной сети АРТ, которая может распознавать объекты, изменяющиеся в дискретные моменты времени. Перспективой дальнейших исследований является разработка непрерывных нейронных сетей АРТ, способных решать задачи распознавания изменяющихся во времени объекты.

Список литературы: 1. *Leonov S.Yu. K-Value Adaptive Resonance Theory of the Neural Network for Analyzing the Operability of Computing Devices / S.Yu. Leonov, V.D. Dmitrienko, T.V. Gladkikh // World Applied Sciences Journal. – 2014. – 30 (12). – P. 1932-1938.* 2. *Dmitrienko V.D. Neural Networks Art: Solving problems with multiple solutions and new teaching algorithm / V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotnyi, S.Yu. Leonov, I.P. Khavina // Open Neurology Journal. – 2014. – 8. – P. 15-21.* 3. *Neural networks for control / Edited by W. Thomas Miller III, Richard S. Sutton, and Paul J. Werbos, – Cambridge, Massachusetts, London: MIT Press, 1996. – 524 P.* 4. *Хавина И.П. Применение нейронных сетей в технологических процессах механообработки / И.П. Хавина, В.В. Лимаренко // Сборник научных трудов "Автоматизированные технологии и производства" Магнитогорского государственного технологического университета им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – С. 233-239.* 5. *Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.* 6. *Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.* 7. *Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае. В 2-х томах. Том 2 / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 464 с.* 8. *Леонов С.Ю. К-значная нейронная сеть АРТ для анализа работоспособности вычислительных устройств / С.Ю. Леонов // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2013. – Вип. 39 (1012). – С. 115-128.* 9. *Дмитриенко В.Д. Вычислительная сеть для решения задач распознавания с несколькими решениями / В.Д. Дмитриенко, И.П. Хавина // Вісник НТУ "ХПІ". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2007. – № 19. – С. 58-63.* 10. *Grossberg S. Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance / S. Grossberg // Cognitive Science – 1987. – Vol. 11. – P. 23-63.* 11. *Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications / L. Fausett. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p.*

Bibliography (transliterated): 1. *Leonov S.Yu. K-Value Adaptive Resonance Theory of the Neural Network for Analyzing the Operability of Computing Devices / S.Yu. Leonov,*

V.D. Dmitrienko, T.V. Gladkikh // World Applied Sciences Journal. – 2014. – 30 (12). – P. 1932-1938. **2.** *Dmitrienko V.D. Neural Networks Art: Solving problems with multiple solutions and new teaching algorithm / V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotnyi, S.Yu. Leonov, I.P. Khavina // Open Neurology Journal. – 2014. – 8. – P. 15-21.* **3.** *Neural networks for control / Edited by W. Thomas Miller III, Richard S. Sutton, and Paul J. Werbos, – Cambridge, Massachusetts, London: MIT Press, 1996. – 524 P.* **4.** *Havina I.P. Primenenie nejronnyh setej v tehnologicheskikh processah mehanoobrabotki / I.P. Havina, V.V. Limarenko // Sbornik nauchnyh trudov "Avtomatizirovannye tehnologi i proizvodstva" Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova. – 2013. – S. 233-239.* **5.** *Hajkin S. Nejrnonnye seti: polnyj kurs / S. Hajkin. – M.: Izdatel'skij dom "Vil'jams", 2006. – 1104 s.* **6.** *Barskij A.B. Nejrnonnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinjatие reshenij / A.B. Barskij. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 176 s.* **7.** *Galushkin A.I. Nejrrokomp'jutery i ih primenenie na rubezhe tysjacheletij v Kitae. V 2-h tomah. Tom 2 / A.I. Galushkin. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2004. – 464 s.* **8.** *Leonov S.Ju. K-znachnaja nejronnaja set' ART dlja analiza rabotosposobnosti vychislitel'nyh ustrojstv / S.Ju. Leonov // Visnik NTU "HPI". – Harkiv: NTU "HPI", 2013. – Vip. 39 (1012). – S. 115-128.* **9.** *Dmitrienko V.D. Vychislitel'naja set' dlja reshenija zadach raspoznavanija s neskol'kimi reshenijami / V.D. Dmitrienko, I.P. Havina // Visnik NTU "HPI". – H.: NTU "HPI" – 2007. – № 19. – S. 58-63.* **10.** *Grossberg S. Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance / S. Grossberg // Cognitive Science – 1987. – Vol. 11. – P. 23 – 63.* **11.** *Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications / L. Fausett. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p.*

Поступила (received) 25.12.2014

Статью представил д-р техн. наук, проф., заслуженный изобретатель Украины, зав. кафедрой "Системы информации" НТУ "ХПИ" Серков А.А.

Dmitrienko Valerii, Dr.Tech.Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Sergey Leonov, Dr.Tech.Sci., Dotcent
National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute"
Str. Frunze 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (099) 911-911-3, e-mail: serleomail@gmail.com
ORCID ID 0000-0001-8139-0458

УДК 616-71

А.Л. ЕРОХИН, д-р техн. наук, проф., ХНУРЭ, Харьков,
В.В. ЧМОВЖ, канд. техн. наук, доц., ХАИ, Харьков,
А.С. НЕЧИПОРЕНКО, канд. техн. наук, ХНУРЭ, Харьков,
О.Г. ГАРЮК, канд. мед. наук, доц., ХМАПО, Харьков

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕДНЕЙ АКТИВНОЙ РИНОМАНОМЕТРИИ

Рассмотрены вопросы диагностики функции носового дыхания с помощью метода передней активной риноманометрии. Проведен сравнительный анализ схем измерения дифференциального давления. Проведен расчёт относительной погрешности измерений, обусловленной потерями дифференциального давления. Ил.: 5. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: передняя активная риноманометрия, дифференциальное давление, относительная погрешность измерений.

Постановка проблемы. В последнее время наблюдается тенденция к росту числа как острых, так и хронических заболеваний носа и околоносовых пазух, которые сопровождаются нарушением функции носового дыхания. Такие нарушения могут быть вызваны как различными воспалительными процессами, протекающими в полости носа, так и деформацией её анатомических структур. Согласно рекомендациям международного комитета по оценке носового дыхания для объективной оценки функции носового дыхания используется комплекс методов: компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ), передняя активная риноманометрия и акустическая ринометрия [1]. Для исследования характеристик воздушного потока, протекающего через носовую полость, в современной медицинской практике в основном используется метод передней активной риноманометрии (ПАРМ) [2, 3].

Анализ литературы. Измеряемые величины при проведении риноманометрического исследования по методу ПАРМ – это дифференциальное давление между носоглоткой и подмасочным пространством и расход воздушного потока [1]. Измеряемые параметры регистрируются синхронно. Измерение давления в носоглотке осуществляется в одной obturated половине носа. Эта половина исключается из акта дыхания. Поэтому измерение проводится для

каждой половины носа отдельно, исследуются вдох и выдох. В основном, в устройствах, реализующих принцип передней активной риноманометрии, например в риноманометрах [4], измерение давления в подмасочном пространстве производится на бактериальном фильтре. Однако при такой схеме измерений возникают искажения в измерении давления за счет того, что в области измерения присутствует поток воздуха, имеющий определенную скорость. Такую динамическую составляющую можно учесть только при помощи использования дополнительных устройств калибровки. В устройстве [5], реализующем способ определения перепада давления в верхних дыхательных путях человека согласно методу риноманометрии, отмечены такие недостатки как внесение ошибки в процедуру измерений дифференциального давления по причине того, что измерительный канал участвует в создании дополнительного дифференциального давления.

Таким образом, давление в носоглотке измеряется во всех случаях стандартно, в obturированной (противоположной измеряемой) половине носа, тогда как измерение давления в подмасочном пространстве у разных производителей риноманометров проводится по-разному [6].

Цель данной статьи – оценка влияния способа измерения дифференциального давления при передней активной риноманометрии на точность измерений.

Методика измерений и обработки данных. Для объективной оценки носового дыхания используется разработанный программно-аппаратный комплекс для риноманометрических исследований [7]. Функционально комплекс состоит из измерительного модуля, маски и программного обеспечения. Основой измерительного модуля являются датчики дифференциального давления и расхода воздушного потока. Датчик дифференциального давления – микромеханический датчик, основным элементом которого является кристалл, на котором расположена кремниевая диафрагма с чувствительным элементом. Функционирование чувствительного элемента микромеханического датчика давления основывается на тензорезистивном эффекте. Датчик измерения массового расхода двунаправленного воздушного потока основан на принципе теплопередачи и состоит из MEMS-микромоста с термочувствительным резистором с использованием тонкопленочных покрытий из платины и нитрида кремния. Датчик имеет внутренние цепи стабилизации, линеаризации характеристики и термокомпенсации. Отображаемый диапазон измерения расхода воздуха ± 1200 см³/с, дифференциального давления ± 1200 Па, частота опроса измерительных каналов – 100 Гц. Комплекс прошел метрологическую аттестацию

(свидетельство государственной метрологической аттестации № 05/0612 от 24.09. 2013 г.). Структурная схема комплекса представлена на рис. 1

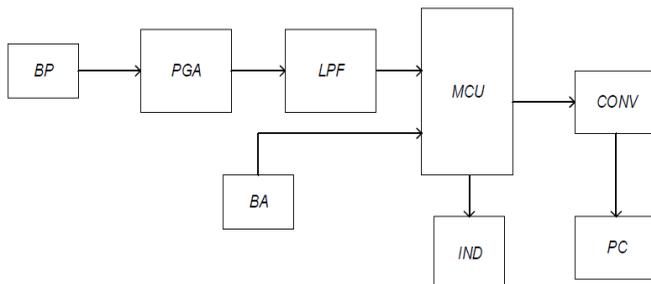


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для риноманометрических исследований

В данной структурной схеме *BP* – датчик дифференциального давления, *PGA* – инструментальный усилитель с программируемым коэффициентом усиления, *BA* – датчик расхода воздушного потока, *LPF* – фильтр нижних частот, *MCU* – микроконтроллер, *IND* – блок индикации, *CONV* – конвертер интерфейсов, *PC* – персональный компьютер.

Графические зависимости измеряемых величин расхода воздушного потока и дифференциального давления от времени приведены на рис. 2.

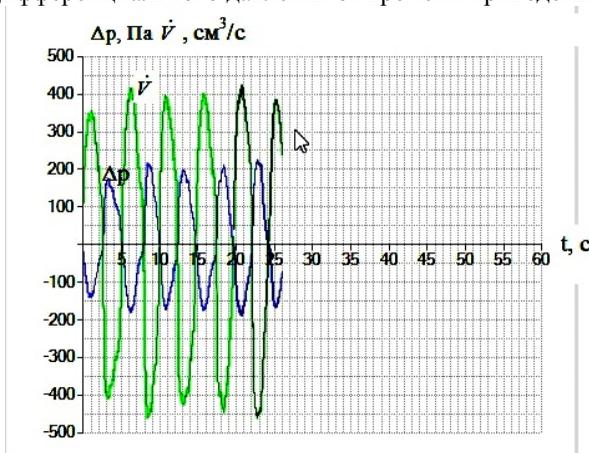


Рис. 2. Риноманометрические данные

Основным диагностическим параметром ПАРМ является носовое сопротивление, по значению которого определяется степень обструкции [8]. В большинстве случаев в клинической практике выполняется расчет коэффициента носового сопротивления по формуле

$$R = \frac{\Delta p}{\dot{V}}, \quad (1)$$

где Δp – дифференциальное давление, \dot{V} – расход воздушного потока.

Существует два основных фактора, вызывающих искажения при измерении дифференциального давления – это потери дифференциального давления за счёт присутствия скорости воздушного потока в канале измерения и влияние характеристик бактериальных фильтров, используемых в схеме измерения. В основном, в устройствах, реализующих принцип передней активной риноманометрии [4], измерение дифференциального давления Δp проводится между носоглоткой и фильтром. Это является причиной возникновения дополнительных потерь за счёт наличия динамической составляющей давления на участке измерения.

Нашей научной группой была проведена оценка влияния данных факторов на точность измерений и, как следствие, на расчёт основного диагностического параметра – носового сопротивления. Для данных целей были проведены измерения по методу ПАРМ с использованием традиционной схемы измерения дифференциального давления между носоглоткой и бактериальным фильтром и схемы, разработанной авторами [6]. Согласно данной схеме, дифференциальное давление измеряется между носоглоткой и подмасочным пространством, а именно в зоне над спинкой носа, где скорость воздушного потока равна нулю. Таким образом, исключаются дополнительные потери на участке измерения дифференциального давления. Для традиционной схемы были проведены измерения с тремя основными типами фильтров, откуда можно сделать вывод о том, что чем меньше расстояние между коннектором и каналом измерения расхода, тем точность измерений выше. Основные типы бактериальных фильтров используемых для риноманометрических измерений представлены на рис. 3.

Результаты измерений, выполненных для схем с потерями дифференциального давления и без таковых, представлены на рис. 4.



Рис. 3. Основные типы бактериальных фильтров

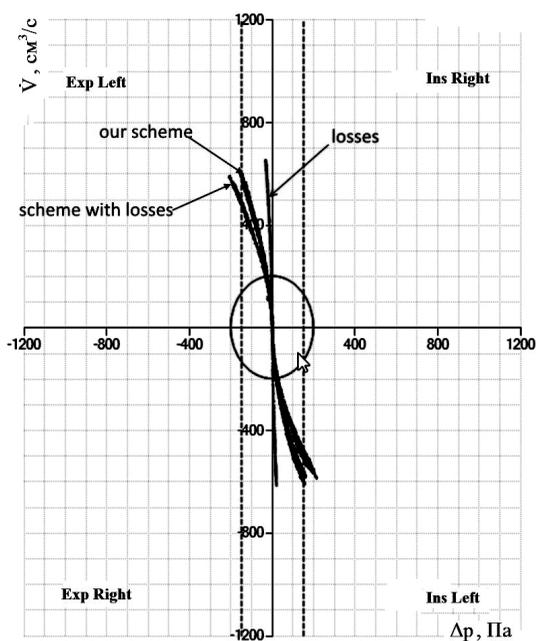


Рис. 4. Графические зависимости дифференциального давления от расхода воздушного потока с потерями и без потерь

В клинической практике выделяют два основных метода расчёта коэффициента носового сопротивления: расчёт при фиксированном значении дифференциального давления согласно (2) и расчёт при

фиксированном значении расхода воздушного потока в соответствии с (3)

$$R_{150} = \frac{\Delta p}{\dot{V} - \dot{V}'}, \quad (2)$$

где Δp – дифференциальное давление, равное 150 Па, \dot{V} – расход воздушного потока для схемы без потерь, \dot{V}' – потери расхода воздушного потока для схемы с потерями,

$$R_{\dot{V}=\text{const}} = \frac{\Delta p + \Delta p'}{\dot{V}}, \quad (3)$$

где Δp – дифференциальное давление для схемы без потерь, $\Delta p'$ – потери дифференциального давления для схемы с потерями, \dot{V} – расход воздушного потока, $\dot{V} = \text{const}$.

Поскольку расчёт параметра R_{150} наиболее широко применяется в клинической практике [9], был проведен анализ, каким образом потери дифференциального давления влияют на расчёт коэффициента носового сопротивления R_{150} по формуле (2). Результаты измерений и расчётов для традиционной схемы измерений дифференциального давления (применялся фильтр с наименьшим расстоянием между коннектором и каналом измерения расхода) и схемы, предложенной авторами [6], представлены в табл.

Таблица

Результаты измерений и расчётов

\dot{V} , см ³ /с	$(\dot{V} - \dot{V}')$, см ³ /с	R_{150} , Па*с/см ³	$R_{150(\text{loss})}$, Па*с/см ³	$\delta\%$
362	350	0,414	0,429	3,62
472	446	0,318	0,336	5,7
350	340	0,429	0,441	2,8
115	114	1,304	1,316	0,92
396	378	0,378	0,397	5,02
292	285	0,514	0,526	2,3
508	475	0,295	0,316	7,1
256	252	0,586	0,595	1,53
153	151	0,98	0,993	1,32

На рис. 5 представлен график зависимости коэффициента носового сопротивления R_{150} от относительной погрешности измерения, обусловленной потерями дифференциального давления.

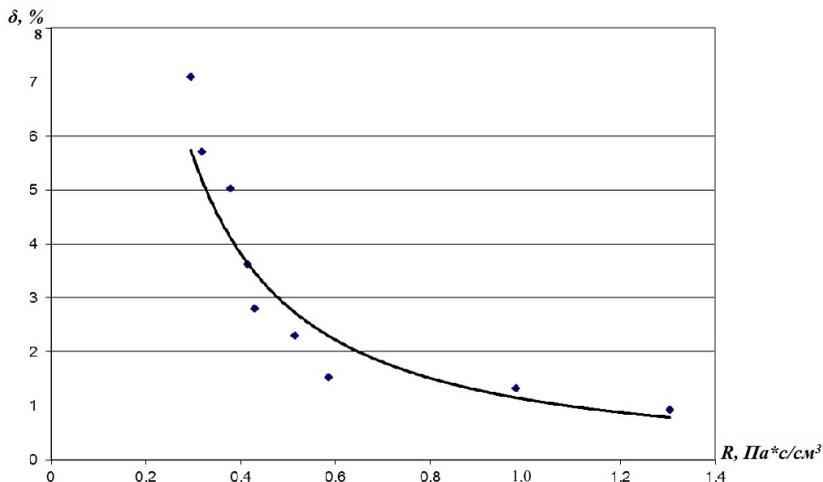


Рис. 5. Графическая зависимость R_{150} от относительной погрешности измерения

Из графика видно, что зависимость обратно пропорциональная, а наибольшая погрешность наблюдается при коэффициенте носового сопротивления R_{150} в диапазоне нормы и слабой обструкции.

Выводы. Таким образом, в работе была проведена оценка влияния схемы измерения дифференциального давления на точность риноманометрических измерений. Расчёт относительной погрешности при традиционной схеме измерений показал, что она изменяется в диапазоне от 1 до 8 %. Данный факт существенно влияет на диагностическую эффективность метода передней активной риноманометрии, поскольку значения параметра R_{150} могут находиться в смежных диапазонах степени обструкции носового дыхания.

Предложенная схема измерения дифференциального давления базируется на основных принципах гидромеханики и даёт возможность исключить все возможные путевые потери давления, что полностью исключает искажение измеряемых данных и необходимость дополнительной калибровки устройства. Перспективой дальнейших

исследований является оценка влияния точности измерения дифференциального давления на расчёт критического значения расхода воздушного потока при шестифазовой концепции риноманометрических измерений.

Список литературы: 1. *Clement P.A.* Standardisation Committee on Objective Assessment of the Nasal Airway. Consensus report on acoustic rhinometry and rhinomanometry / *P.A. Clement, F. Gordts* // *Rhinology*. – 2005. – № 43. – P. 169-179. 2. *Demirbas D.* Use of rhinomanometry in common rhinologic disorders / *D. Demirbas, C. Cingi, H. Cakli, E. Kaya* // *Expert Rev. Med. Devices*. – 2011. – № 8 (6). – P. 769-777. 3. *Thulesius H.L.* Rhinomanometry in clinical use. A tool in the septoplasty decision making process: doctoral dissertation, clinical sciences / *H.L. Thulesius*. – 2012. – 67 p. 4. *Vogt K.* 4-Phase- Rhinomanometry (4PR) – basics and practice 2010 / *K. Vogt, A.A. Jalowayski, W. Althaus, C. Cao, D. Han, W. Hasse, H. Hoffrichter, R. Mosges, J. Pallanch, K. Shah-Hosseini, K. Peksis, K.D. Wernecke, L. Zhang and P. Zaporoshenko* // *Rhinology*. – 2010. – Suppl. 21. – P. 1-50. 5. Patent US 6,565,517, A61B 5/00 Apparatus and methods for rhinomanometry / Brabrand S. (USA), 20.05.2003 6. *Nechyporenko A.* Improved method for measuring the differential pressure at the active anterior rhinomanometry / *A. Nechyporenko, O. Garyuk, V. Chmolvzh* // *Rhinology*. – 2014. – Amsterdam. – № 52 (Suppl. 25). – P. 277. 7. *Нещипоренко А.С.* Технические аспекты риноманометрии / *А.С. Нещипоренко* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013 – Т. 4. – № 9 (64). – С. 11-14. 8. *Clement P.A.* Committee report on standardization of rhinomanometry / *P.A. Clement* // *Rhinology*. – 1984. – № 22 (3). – P. 151-155. 9. *Hilberg O.* PAR The objective assessment of nasal patency / *O. Hilberg, P.A. Clement, A.S. Jones, D.E. Phillips, F.J.M. Hilgers* // *Diseases of the Head and Neck, Nose and Throat*. – 1998. – P. 719-742.

Bibliography (transliterated): 1. *Clement P.A.* Standardisation Committee on Objective Assessment of the Nasal Airway . Consensus report on acoustic rhinometry and rhinomanometry / *P.A. Clement, F. Gordts* // *Rhinology*. – 2005. – № 43. – P. 169-179. 2. *Demirbas D.* Use of rhinomanometry in common rhinologic disorders / *D. Demirbas, C. Cingi, H. Cakli, E. Kaya* // *Expert Rev. Med. Devices*. – 2011. – № 8 (6). – P. 769-777. 3. *Thulesius H.L.* Rhinomanometry in clinical use. A tool in the septoplasty decision making process: doctoral dissertation, clinical sciences / *H.L. Thulesius*. – 2012. – 67 p. 4. *Vogt K.* 4-Phase- Rhinomanometry (4PR) – basics and practice 2010 / *K. Vogt, A.A. Jalowayski, W. Althaus, C. Cao, D. Han, W. Hasse, H. Hoffrichter, R. Mosges, J. Pallanch, K. Shah-Hosseini, K. Peksis, K.D. Wernecke, L. Zhang and P. Zaporoshenko* // *Rhinology*. – 2010. – Suppl. 21. – P. 1-50. 5. Patent US 6,565,517, A61B 5/00 Apparatus and methods for rhinomanometry / Brabrand S. (USA), 20.05.2003 6. *Nechyporenko A.* Improved method for measuring the differential pressure at the active anterior rhinomanometry / *A. Nechyporenko, O. Garyuk, V. Chmolvzh* // *Rhinology*. – 2014. – Amsterdam. – № 52 (Suppl. 25). – P. 277. 7. *Nechiporenko A.S.* Tekhnicheskiye aspekty rinoanometrii / *A.S. Nechiporenko* // Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2013. – Т. 4. – № 9 (64). – С. 11-14. 8. *Clement P.A.* Committee report on standardization of rhinomanometry / *P.A. Clement* // *Rhinology*. – 1984. – № 22 (3). – P. 151-155. 9. *Hilberg O.* PAR The objective assessment of nasal patency / *O. Hilberg, P.A. Clement, A.S. Jones, D.E. Phillips, F.J.M. Hilgers* // *Diseases of the Head and Neck, Nose and Throat*. – 1998. – P. 719-742.

Поступила (received) 05.11.2014

Статью представил д-р физ-мат. наук, зав. кафедрой МЭПУ ХНУРЕ проф. Бондаренко И.Н.

Andrey Yerokhin, Dr.Tech.Sci., Professor
Professor of Software Engineering department
Kharkiv National University of Radio Electronics
Ave. Lenina, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (067) 5758481, e-mail: ayerokhin@ukr.net
ORCID ID:0-8297-2014

Vitaliy Chmovzh, Cand.Tech.Sci.
Head of Department of Aerodynamics
Kharkiv National Aerospace University "KhAI"
Str. Chkalova, 17, Kharkiv, Ukraine
Tel.: (050) 6636470, e-mail: v.chmovzh@khai.edu
ORCID ID: 0-8738-2014

Alina Nechiporenko, Cand.Tech.Sci.
Associate professor of Biomedical Engineering department
Kharkiv National University of Radio Electronics
Ave. Lenina 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (050) 8728100, e-mail: alinanechiporenko@gmail.com
ORCID ID: 0-8286-2014

Oleg Garyuk, Cand. Med. Sci.
Associate professor of Otolaryngology department
Kharkiv Medical Academy of Postgraduate Education
Str. Korchagintsev 58, Kharkiv, Ukraine, 61176
Tel.: (067) 5792341, e-mail: O.Garyuk@gmail.com
ORCID ID: 0-8979-2014

УДК 621. 791. 1

Е.В. КАРПОВИЧ, канд. техн. наук, доц. ДНУ им. О. Гончара,
Днепропетровск,
И.И. КАРПОВИЧ, ст. преп. ДНУ им. О. Гончара, Днепропетровск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В работе приведена математическая модель процессов, происходящих при диффузионной сварке деталей по охватываемым поверхностям контакта, и ее реализация методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus. На основе математической модели предложен алгоритм определения напряжений в биметаллическом соединении на каждом этапе диффузионной сварки. Ил.: 5. Табл.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: математическое моделирование, диффузионная сварка, метод конечных элементов, биметаллическое соединение.

Постановка проблемы. Многослойные металлические композиции широко применяются в узлах энергетических аппаратов, криогенной, ракетной и авиационной техники. Наиболее распространенными из них являются биметаллические переходники для соединения трубопроводов различного назначения с другими элементами системы. Основные эксплуатационные характеристики биметаллической конструкции, такие как прочность, герметичность, вакуумная плотность, зависят от способа получения соединений, наиболее перспективным из которых является диффузионная сварка, позволяющая соединять различные сочетания материалов.

Существуют три основные схемы диффузионной сварки трубчатых биметаллических переходников: торцовая, конусная и по охватываемым поверхностям [1]. С точки зрения технологии схема диффузионной сварки по торцам наиболее простая. По этой схеме все режимы сварки достаточно легко осуществляются и контролируются установкой для диффузионной сварки [2]. В эксплуатационных условиях, при действии внутреннего давления жидкости или газа повышенной или пониженной температуры, такие соединения испытывают напряжения изгиба, растяжения и среза, величина которых растет с увеличением различия в коэффициентах термического расширения (КТР) материалов деталей.

Диффузионная сварка переходников по конусным поверхностям аналогична сварке по торцам [1 – 3]. Трубные заготовки при нагреве

также сдвигаются в осевом направлении, только осевое усилие уменьшается пропорционально увеличению угла конуса таким образом, чтобы нормальное усилие сдвигания свариваемых поверхностей не отличалось от сварочного давления, применяемого для торцовых соединений. В соединениях труб по конусным поверхностям [1] в сварном соединении толщина стенки каждой трубы плавно изменяется от номинала до нуля. Термические напряжения по краям соединения в каждом металле на заостренных концах будут максимальными и могут достигать предела текучести или превышать его, что снижает надежность конструкции.

Переходники, сваренные по охватываемым поверхностям [1 – 3], отличаются более высокой технологичностью по сравнению с предыдущими двумя схемами сварки за счет возможности получения давления в контакте из-за разницы КТР материалов свариваемых деталей и использования не только специализированных установок для диффузионной сварки, но и обычных вакуумных печей, применяемых для пайки или отжига. В процессе эксплуатации переходников с развитыми поверхностями контакта картина нагружения меняется на более благоприятную, по сравнению с торцовой схемой переходника. Соединение будет воспринимать напряжения от действия внутреннего давления по всей длине, как единая конструкция, при этом касательные напряжения среза будут минимальными в средней части и максимальными на краях сварного шва. Величина последних зависит от длины контактных поверхностей свариваемых деталей и может ограничиваться требуемым уровнем прочности на этапе изготовления.

В процессе работы переходник трубопровода находится под действием внутреннего давления. При этом температура рабочей жидкости или газа внутри переходника может быть выше или ниже температуры окружающей среды, что приводит к появлению дополнительных термических напряжений в конструкции. В результате совместного действия силовых и температурных нагрузок в сварном шве переходника с охватываемыми поверхностями контакта возникают растягивающие или сжимающие напряжения. Вероятно, что растягивающие напряжения являются неблагоприятными, снижают эксплуатационные характеристики соединений и могут привести к разрушению. В тоже время сжимающие напряжения могут оказаться полезными и использоваться как дополнительный резерв повышения прочности и надежности биметаллических переходников. Для реализации положительного эффекта сжимающих напряжений в сварном соединении при эксплуатации переходника с охватываемыми поверхностями контакта требуется определение величины остаточных

напряжений на всех этапах диффузионной сварки. Таким образом, разработка математической модели технологии диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям контакта с целью определения остаточных напряжений на этапе изготовления и эксплуатации биметаллического переходника является актуальной теоретической и прикладной задачей.

Анализ литературы. Процесс диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям заключается в сборке деталей с натягом, обеспечивающим получение ювенильных контактных поверхностей и требуемого давления при температуре сварки, нагреве, выдержке собранной конструкции и охлаждении [1, 2, 4]. Обязательным условием получения сварного соединения является создание физического контакта соединяемых материалов, которое осуществляется путем пластического деформирования микронеровностей на контактных поверхностях. В процессе сборки свариваемых деталей деформация микронеровностей происходит с относительно высокими скоростями, что приводит к образованию у контактной поверхности слоя с повышенным сопротивлением пластической деформации, тормозящим образование физического контакта. Увеличение напряжения в контакте за пределы пропорциональности свариваемых металлов приведет к «проседанию» этого слоя на менее упрочненном основном металле. Повышение температуры приводит к разупрочнению и облегчению микропластической деформации, создавая благоприятные условия для развития физического контакта при меньших напряжениях в контакте. По мере увеличения площади микропластическая деформация не отличается от пластической и процесс образования физического контакта протекает с низкой интенсивностью за счет медленно протекающих диффузионных процессов [2, 4].

Диффузионная сварка производится при относительно высокой температуре, достигающей 0,7...0,8 температуры плавления более легкоплавкого материала конструкции [3]. При таких температурах в металле интенсивно протекают процессы релаксации и ползучести, в результате которых напряженное состояние в сборке за время выдержки меняется. Процесс изменения давления является неконтролируемым в отличие от сварки по торцам, при которой давление создается приложением внешнего контролируемого усилия.

После выдержки сварная конструкция охлаждается на воздухе до нормальной температуры. В соединениях, изготовленных из материалов с различным значением КТР, процесс охлаждения сопровождается появлением деформаций и напряжений, как в радиальном направлении,

так и по длине сварного шва. Величина возникающих напряжений может превышать прочность сварного соединения и привести к его разрушению.

В работе [5] представлена математическая модель диффузионной сварки для двухслойной осесимметричной конструкции и приведены результаты численного эксперимента, на основе которых разработаны рекомендации к технологии диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям, где показано, что наибольшее влияние на величину давления в контакте оказывают КТР свариваемых материалов и сварку деталей из любых их сочетаний необходимо проводить в технологической обойме. При этом задача решена в упругой постановке и в результате расчета величина давления в контакте будет завышенной по сравнению с упруго-пластическими условиями деформирования. Метод определения остаточных термических напряжений в многослойной осесимметричной конструкции представлен в работе [6], где рассматривается упругопластическая деформация тела вращения с различными условиями контакта между слоями. Однако, в работе [6] отсутствуют результаты численного расчета с рекомендациями для выбора геометрических параметров свариваемых деталей и обоймы и в обоих работах [5, 6] не учитывается явление ползучести и релаксации напряжений в процессе выдержки при температуре сварки.

На основе рекомендаций, приведенных в работе [5], возможных технологических схем диффузионной сварки соединений с развитыми цилиндрическими поверхностями контакта [2, 4], а также учитывая эксплуатационные условия биметаллических переходников, рассмотренные ранее, можно предложить следующие схемы диффузионной сварки переходников по охватываемым поверхностям:

1. При повышенной температуре рабочей среды внутри переходника, внутренняя деталь должна изготавливаться из материала с большим КТР, наружная – с меньшим КТР. В процессе сварки необходимо использовать внутреннюю обойму с КТР меньшим, чем у первой детали, что позволит предотвратить отставание свариваемых поверхностей при охлаждении соединения.

2. При пониженной температуре рабочей среды, внутренняя деталь должна изготавливаться из материала с меньшим КТР, наружная – с большим КТР. Внешняя обойма должна иметь меньший КТР, чем у второй детали, для предотвращения образования зазора между свариваемыми поверхностями в процессе нагревания соединения до температуры сварки.

3. Если температуры рабочей и внешней среды трубопровода одинаковы, то для сварки материалов с различным значением КТР можно выбрать любую из схем.

4. При равных значениях КТР свариваемых материалов рекомендуется принимать вторую схему, так как при нагреве и охлаждении в соединениях материалов с одинаковым значением КТР остаточные напряжения отсутствуют. Внешняя обойма, изготовленная из материала с меньшим значением КТР, чем у соединяемых материалов, ограничит перемещение наружной поверхности всей сварной конструкции и позволит получить требуемое давление сварки на контактных поверхностях.

Каждый вариант технологической схемы диффузионной сварки переходников по охватываемым поверхностям представляет собой трехслойную конструкцию, собранную с определенным расположением слоев-деталей и слоя-обоймы. Согласно технологическим рекомендациям, приведенным в [5], на контактных поверхностях свариваемых деталей необходимо наличие малой конусности для облегчения процесса сборки. Контактную поверхность внутренней обоймы в первой схеме также будет целесообразно выполнить конусной, что обеспечит постоянный контакт поверхностей на всех этапах сварки.

Цель статьи – разработка математической модели, которая позволит решить задачу определения остаточных напряжений после температурной деформации упругопластического осесимметричного составного тела вращения, состоящего из трех слоев, контактные поверхности которых расположены под определенным углом.

Модель диффузионной сварки по охватываемым поверхностям. Конструкцию сварного соединения можно представить в виде осесимметричного составного тела вращения (рис. 1). Тип взаимодействия между слоями определяется функциональным назначением поверхностей при сварке. На контактных свариваемых поверхностях деталей в процессе сборки и нагревания рассматривается проскальзывание без трения; после охлаждения – слои сцеплены. На технологических поверхностях, контактируемых с внутренней или внешней обоймами, на всех этапах сварки поверхности проскальзывают без трения.

Поставленную задачу определения остаточных напряжений в трехслойном упругопластическом теле после его нагрева и охлаждения невозможно решить в аналитическом виде. Наиболее приемлемым методом для отыскания ее решения является вариационная формулировка задачи в рамках теории малых упругопластических

деформаций с последующей дискретизацией вариационной задачи методом конечных элементов.

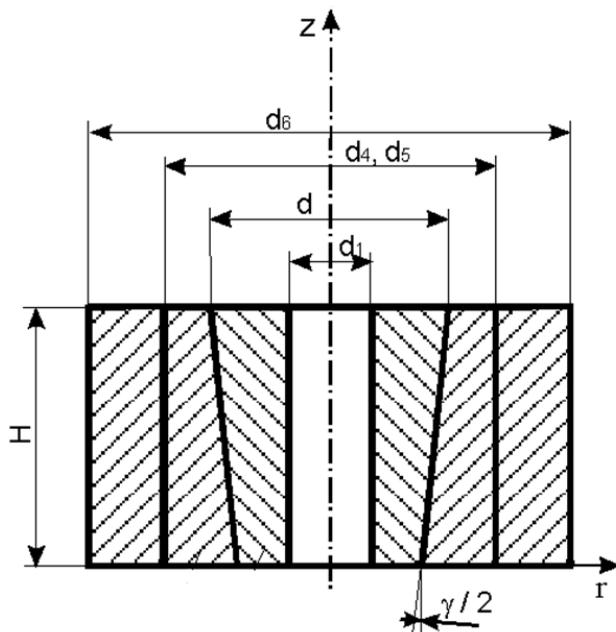


Рис. 1. Конструкция сварного соединения

Данный метод расчета реализован во многих программных комплексах, позволяющих выполнять линейный и нелинейный анализ с различным сочетанием действующих нагрузок, ограничений и контактных взаимодействий. Наиболее удобным является многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа Abaqus, в котором математическое моделирование диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям можно выполнить поэтапно в отдельном расчетном шаге. При этом необходимо назначить ограничения модели и условия взаимодействия между контактными поверхностями.

Во всех разработанных схемах диффузионной сварки соединений с охватываемыми поверхностями контакта обойма должна ограничивать перемещения поверхностей деталей в радиальном направлении, что предполагает ее более высокие характеристики жесткости по сравнению

со свариваемыми деталями. Следовательно, при моделировании обойма может выступать как абсолютно жесткое тело.

В среде Abaqus для математического моделирования и определения всех компонент напряжений и деформаций реализованы следующие шаги расчета:

1. Сборка конструкции методом запрессовки требуемой детали в ответную некоторым усилием P . На модель накладываются ограничения перемещения торца ответной детали вдоль оси соединения, а именно принимаются равными нулю. Взаимодействие между свариваемыми поверхностями – проскальзывание без трения.

2. Нагрев конструкции моделируется наложением однородного температурного поля, соответствующего температуре сварки, на все тело модели. Кроме уже имеющегося ограничения, для второй схемы сварки устанавливается перемещение наружной поверхности охватывающей детали равным нулю.

3. На этапе выдержки соединения при температуре сварки определяется поле напряжений и деформаций с учетом установившейся ползучести материалов деталей. В программном комплексе Abaqus расчет напряжений ползучести может выполняться по теории упрочнения, теории старения и закону гиперболического синуса. В рассматриваемой задаче для оценки напряжений ползучести целесообразно использовать теорию старения, как наиболее простой из законов, который не требует большого количества данных по константам материалов при достаточно высокой температуре сварки:

$$\dot{\varepsilon} = A \tilde{q}^n t^m, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – одноосные эквивалентные скорости деформации ползучести; A , n и m – константы материала при определенной температуре; \tilde{q} – одноосный эквивалентный девиатор напряжений; t – время.

4. Охлаждение конструкции до нормальной температуры моделируется наложением однородного температурного поля с температурой 293 К. В модели, составленной по первой схеме сварки перемещение внутренней поверхности охватываемой детали принимается равным нулю. Взаимодействие на контактных свариваемых поверхностях – жесткое сцепление слоев.

5. Моделирование эксплуатационных условий биметаллического переходника выполняется приложением на его внутренней поверхности давления с требуемым значением и температурного поля, соответствующего температуре рабочей среды.

В разработанной математической модели диффузионной сварки соединений по охватываемым поверхностям расчет выполняется в упругопластической постановке с характеристиками материалов, зависящими от температуры.

Данная математическая модель использовалась для определения остаточных напряжений на каждом этапе диффузионной сварки биметаллического соединения из титанового сплава ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В дальнейшем из полученных биметаллических заготовок изготавливаются биметаллические переходники для соединения трубопровода из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с шаробаллоном из титанового сплава ВТ6С. Рабочая среда внутри трубопровода и переходника имеет пониженную температуру, следовательно, для осуществления процесса диффузионной сварки по охватываемым поверхностям необходима вторая конструктивная схема с внешней обоймой. При этом охватываемая деталь должна изготавливаться из титанового сплава ВТ6, как материала с меньшим КТР, а охватывающая – из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Физико-механические и теплофизические характеристики свариваемых материалов при температуре сварки 1173 К определялись по данным из [7, 8] (табл. 1).

Константы материалов для расчета напряжений ползучести за время выдержки 600 с при температуре сварки приняты по данным работ [9, 10] (табл. 2).

Проведенные расчеты показали, что после этапа запрессовки усилием 5 МПа напряжения на контактных поверхностях не превышают предела текучести обоих материалов (рис. 2), что обеспечит формирование физического контакта за счет микропластической деформации без значительного деформирования деталей в объеме.

Нагревание собранного соединения ВТ6-12Х18Н10Т до температуры сварки 1173 К приводит к появлению высокого уровня сжимающих напряжений в конструкции и интенсивности напряжений Мизеса (рис. 3), превышающих пределы текучести обоих материалов (табл. 1) по всему сечению деталей. Совокупность полученных условий при температуре сварки обеспечит требуемое контактное давление, которое будет превышать рекомендуемое 5 МПа для торцевой сварки биметаллических соединений ВТ6-12Х18Н10Т и обеспечит дальнейшее формирование физического контакта на соединяемых поверхностях деталей с интенсификацией процессов диффузии. Выдержка соединения при температуре сварки в течении 10 мин приводит к уменьшению давления на контактных свариваемых поверхностях практически до нуля (рис. 4), что объясняется высокой интенсивностью процессов ползучести

и релаксации в материалах деталей с заданными константами установившейся ползучести (табл. 2).

Таблица 1

Физико-механические и теплофизические свойства титанового сплава ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Характеристика материала	Титановый сплав ВТ6				Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т			
	293 К		1173 К		293 К		1173 К	
Модуль упругости, МПа	115000		66476		195200		0,285	
Коэффициент Пуассона	0,32		0,32		127870		0,353	
Коэффициент температурного расширения, 1/К	$8 \cdot 10^{-6}$		$1,22 \cdot 10^{-5}$		$1,6 \cdot 10^{-5}$		$1,93 \cdot 10^{-5}$	
Параметры диаграммы растяжения	σ , МПа	ϵ	σ , МПа	ϵ	σ , МПа	ϵ	σ , МПа	ϵ
	475	0	150	0	237,5	0	75,1	0
	750	0,001	180	0,001	275	0,002	102,1	0,002
	925	0,002	260	0,002	300	0,005	107,7	0,005
	950	0,003	270	0,003	440	0,02	163,8	0,02
	950	0,004	270	0,02				
	962,5	0,005						
	950	0,01						
	950	0,02						

Таблица 2

Константы титанового сплава ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т для расчета напряжений ползучести

Характеристика материала	Титановый сплав ВТ6	Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
	1173 К	1173 К
$A, (Н/мм^2) \cdot c^{-1}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-12}$
n	2	3,2
m для установившейся ползучести	0	0

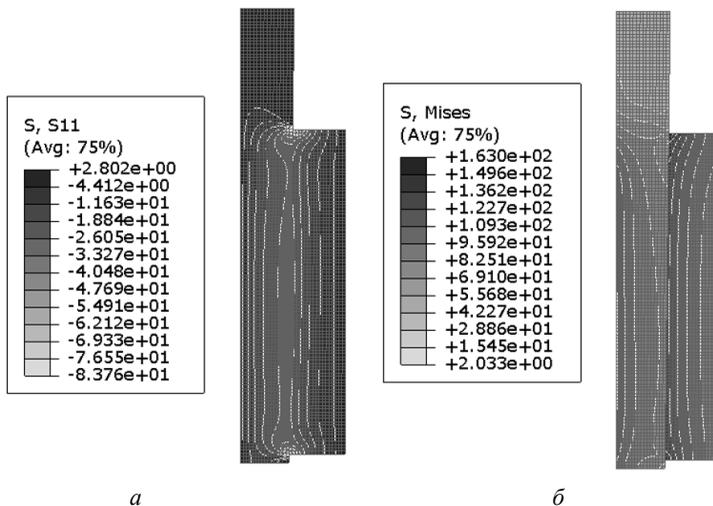


Рис. 2. Напряжения в биметаллическом соединении VT6-12X18H10T после запрессовки: *а* – радиальные напряжения, МПа; *б* – напряжения Мизеса, МПа

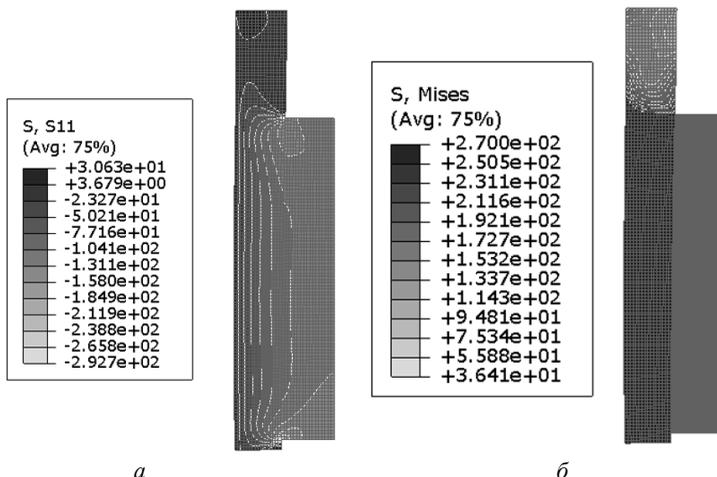


Рис. 3. Напряжения в биметаллическом соединении VT6-12X18H10T после нагревания: *а* – радиальные напряжения, МПа; *б* – напряжения Мизеса, МПа

После охлаждения конструкции до нормальной температуры в сварном соединении возникают остаточные сжимающие напряжения, интенсивность которых по теории Мизеса превышает предел текучести нержавеющей стали 12X18H10T по всему сечению наружной детали. При этом интенсивность напряжений по сечению детали, изготовленной из титанового сплава ВТ6, ниже значения предела текучести и достигает максимальной величины на внутренней поверхности и минимальной – на внешней контактной (рис. 5). Расчетное распределение интенсивности напряжений по сечению конструкции показало, что при нормальной температуре внутренняя деталь из титанового сплава ВТ6 будет деформироваться упруго, а наружная – из нержавеющей стали 12X18H10T, вполне пластически. Величина касательных напряжений на контактных поверхностях (рис. 5, в) не превышает предела текучести материалов свариваемых деталей и не приведут к снижению прочности соединения или его разрушению.

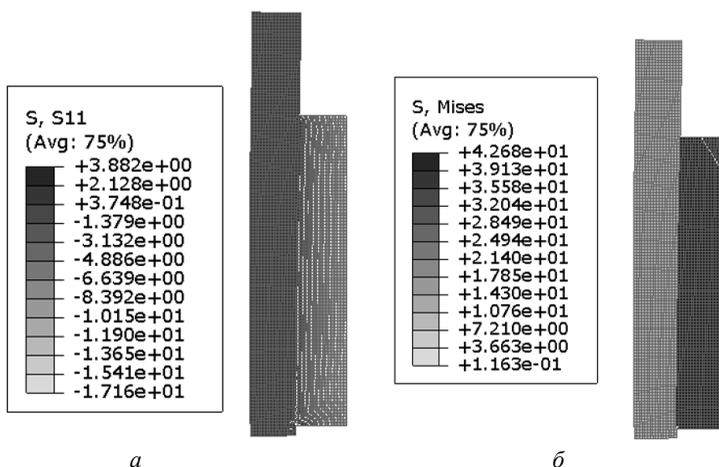


Рис. 4. Напряжения в биметаллическом соединении ВТ6-12Х18Н10Т после выдержки 10 мин: а – радиальные напряжения, МПа; б – напряжения Мизеса, МПа

Анализ результатов проведенных расчетов показал, что на всех этапах диффузионной сварки биметаллического соединения по охватываемым поверхностям из титанового сплава ВТ6 и нержавеющей стали 12X18H10T обеспечиваются условия образования физического контакта и диффузии на свариваемых поверхностях. Это подтверждает

правильность выбранной схемы диффузионной сварки для соединения ВТ6-12Х18Н10Т.

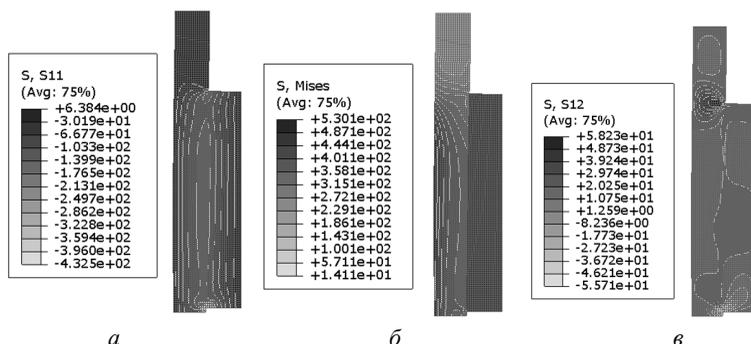


Рис. 5. Напряжения в биметаллическом соединении ВТ6-12Х18Н10Т после охлаждения до нормальной температуры: *а* – радиальные напряжения, МПа; *б* – напряжения Мизеса, МПа; *в* – касательные напряжения, МПа

На основе проведенных исследований разработана методика проектирования и расчета биметаллических переходников с охватываемыми поверхностями контакта, получаемых методом диффузионной сварки:

1. Определение физико-механических и теплофизических свойств соединяемых материалов при температуре сварки.
2. Определение констант свариваемых материалов для степенной зависимости установившейся ползучести при температурах близких к температуре сварки.
3. Определение конструктивной схемы сварки в зависимости от теплофизических характеристик свариваемых материалов.
4. Построение математической модели в программном комплексе Abaqus с ограничениями и контактными взаимодействиями, зависящими от схемы диффузионной сварки.
5. Расчет полей деформаций и напряжений на каждом этапе сварки с целью выявления уровня пластической деформации свариваемых деталей, что особенно важно на этапе нагрева, когда хотя бы одна из соединяемых поверхностей должна быть в пластическом состоянии.

Выводы. В результате проделанной работы была предложена методика, которая может использоваться для разработки технологии диффузионной сварки биметаллических соединений по охватываемым поверхностям с различным сочетанием материалов. По результатам

расчетов также могут быть определены диапазоны геометрических параметров свариваемых деталей для обеспечения оптимальных условий формирования соединения.

Список литературы: 1. *Киселев С.Н.* Соединение труб из разнородных материалов / *С.Н. Киселев, Г.Н. Шевелев, В.В. Роцин.* – М.: Машиностроение, 1981. – 176 с. 2. Диффузионная сварка материалов: справочник / Под ред. *Н.Ф. Казакова.* – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с. 3. *Каракозов Э.С.* Сварка металлов давлением / *Э.С. Каракозов.* – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с. 4. *Карпович Е.В.* Формирование зоны соединения при изготовлении переходников с развитыми поверхностями контакта / *Е.В. Карпович* // Вісник Дніпропетровського університету: Ракетно-космічна техніка. – 2000. – Вип. 4. – С. 76-80. 5. *Чернецкий С.А.* Математическое моделирование процесса диффузионной сварки соединений с развитыми поверхностями контакта / *С.А. Чернецкий, Е.В. Карпович* // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9. – № 1. – С. 150-158. 6. *Чернецки, С.А.* Математическое моделирование термонапряженных процессов в многослойных осесимметричных конструкциях / *С.А. Чернецкий, Е.В. Карпович* // Вісник Дніпропетровського університету. – 2008. – Т. 16. – № 4. – С. 185-188. 7. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник / Под ред. *Б.Е. Неймарка.* – Л.: Энергия, 1967. – 240 с. 8. *Безухов Н.И.* Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / *Н.И. Безухов, В.Л. Бажанов, И.И. Гольденблат,* под общ. ред. *И.И. Гольденблата.* – М.: Машиностроение, 1965. – 568 с. 9. *Локощенко А.М.* Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении / *А.М. Локощенко, С.А. Шестериков* // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – № 3. – С. 155-159. 10. *Зунг Н.С.* Моделирование технологических процессов сверхпластической формовки оболочек из двухфазных титановых сплавов: дис. канд. техн. наук: 05.13.05, защищена 01.10.14 / *Нгуен Суан Зунг.* – М., 2014. – 184 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Kiselev S.N.* Soedinenie trub iz raznorodnyh materialov / *S.N. Kiselev, G.N. Shevelev, V.V. Roshhin.* – M.: Mashinostroenie, 1981. – 176 s. 2. Diffuzionnaja svarka materialov: spravochnik / Pod red. *N.F. Kazakova.* – M.: Mashinostroenie, 1981. – 271 s. 3. *Karakozov Je. S.* Svarka metallov davleniem / *Je. S. Karakozov.* – M.: Mashinostroenie, 1986. – 280 s. 4. *Karpovich E.V.* Formirovanie zony soedinenija pri izgotovlenii perehodnikov s razvitymi poverhnostjami kontakta / *E.V. Karpovich* // Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu: Raketno-kosmiczna tehnika. – 2000. – Vip. 4. – S. 76-80. 5. *Cherneckij S.A.* Matematicheskoe modelirovanie processa diffuzionnoj svarki soedinenij s razvitymi poverhnostjami kontakta / *S.A. Cherneckij, E.V. Karpovich* // Kosmiczna nauka i tehnologija. – 2003. – T. 9. – № 1. – S. 150-158. 6. *Cherneckij S.A.* Matematicheskoe modelirovanie termonaprjazhennyh processov v mnogoslojnyh osesimmetrichnyh konstrukcijah / *S.A. Cherneckij, E.V. Karpovich* // Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. – 2008. – T. 16. – № 4. – S. 185-188. 7. Fizicheskie svojstva stalej i spлавov, primenjaemyh v jenergetike: spravochnik / Pod red. *B.E. Nejmarka.* – L.: Jenergija, 1967. – 240 s. 8. *Bezuhov N.I.* Raschetny na prochnost', ustojchivost' i kolebanija v uslovijah vysokih temperatur / *N.I. Bezuhov, V.L. Bazhanov, I.I. Gol'denblat,* pod obshh. red. *I.I. Gol'denblata.* – M.: Mashinostroenie, 1965. – 568 s. 9. *Lokoshhenko A.M.* Metodika opisanija polzuchesti i dlitel'noj prochnosti pri chistom rastjazhenii / *A.M. Lokoshhenko, S.A. Shesterikov* // Prikladnaja mehanika i tehnickaja fizika. – 1980. – № 3. – S. 155-159. 10. *Zung N.S.* Modelirovanie tehnologicheskikh processov sverhplasticheskoj formovki obolochek iz dvuhfaznyh titanovyh spлавov: dis. kand. tehn. nauk: 05.13.05, zashhishhena 01.10.14 / *Nguen Suan Zung.* – M., 2014. – 184 s.

Поступила (received) 30.11.2014

*Статью представил д-р техн. наук, профессор Днепропетровского
национального университета имени Олеся Гончара Санин А.Ф.*

Karpovych Elena, Cand.Tech.Sci.
Dnipropetrovsk National University
Str. Zelena, 1/147, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49102
Tel.: (095) 4243054, e-mail: kelv@ua.fm
ORCID ID: 0000-0002-0677-5822

Karpovych Ivan, Senior Lecturer
Dnipropetrovsk National University
Str. Zelena, 1/147, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49102
Tel.: (050) 5675101, e-mail: ivkarp70@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-3633-8532

УДК 681.518+621.373

С.І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПІ",
О.В. ГУСЕЛЬНИКОВ, асп., НТУ "ХПІ"

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ВИМІРЮВАЧА ВАГИ ТЕСТОВИМ МЕТОДОМ

В статті розглянуто використання тестового методу підвищення точності автогенераторного вимірювача ваги. Наведені структурна схема та алгоритм роботи вимірювача ваги. Розглянутий алгоритм реалізації тестового методу. Лл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: тестовий метод підвищення точності, автогенераторний вимірювач ваги.

Постановка проблеми та аналіз літератури: Широке використання вимірювачів ваги у промисловості, побуті, медицині [1] висуває підвищені вимоги до їх вартісних, експлуатаційних та метрологічних характеристик [2, 3]. При цьому вихідний сигнал таких приладів в багатьох випадках необхідно отримати в цифровій формі для можливості його передачі і подальшої обробки на ЕОМ [4]. Відомі на сьогодні високоточні вимірювачі ваги мають такі недоліки як: висока вартість та складність конструкції.

Одним з ефективних варіантів підвищення точності є тестові методи [5, 6], але їх використання без значного ускладнення конструкції та алгоритму роботи вимірювача можливо за умови лінійного зв'язку між вимірювальною величиною та вихідним сигналом приладу.

Мета статті – підвищення точності автогенераторного вимірювача ваги без значного ускладнення його конструкції та алгоритму роботи за допомогою тестового методу.

Автогенераторний вимірювач ваги. Розроблено автогенераторний вимірювач ваги (ВВ) [7, 8, 9], що має лінійну характеристику перетворення. Вимірювач, структурна схема якого наведена на рис. 1, складається з: автогенераторного датчика АГД, мікроконтролера (МК), відлікового пристрою (ВП). АГД включає в себе два ідентичні канали: вимірювальний та компенсаційний. Вимірювальний канал складається з чутливого елемента (ЧЕ1) – балки рівного перетину, яка в свою чергу є частиною ємнісного первинного перетворювача (ПП1), що включений у LC-контур автогенератора АГ1. Компенсаційний канал складається з

ідентичних ємнісного перетворювача (ПП2) та автогенератора АГ2.

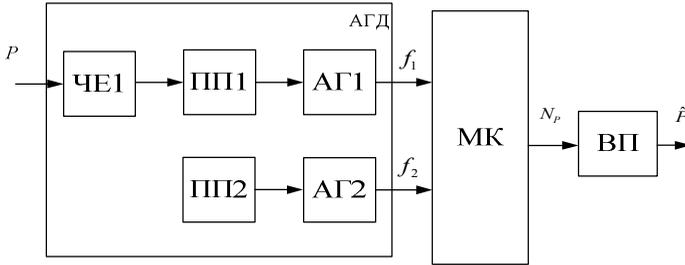


Рис. 1. Структурна схема автогенераторного вимірювача ваги

Вимірювач працює наступним чином: при відсутності на вході ВВ вимірювальної величини ($P = 0$) АГД виробляє однакові вихідні частотні сигнали

$$f_1 = f_2 = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}. \quad (1)$$

Зміна вхідного сигналу ($P \neq 0$) викликає зміну положення ЧЕ1, а отже і зміну ємності C_0 ПП1 на ΔC , та відповідно зміну вихідного частотного сигналу вимірювального каналу АГД:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + \Delta C)}} = f_0(1 + KP)^{-0.5}, \\ f_2 = f_0, \end{cases} \quad (2)$$

де $K = \frac{\Delta\tilde{N}}{\tilde{N}_0P}$ – сумарний коефіцієнт перетворення ЧЕ1 та ПП1.

Далі вихідні сигнали f_1 і f_2 вимірювального АГ1 і опорного АГ2 автогенераторів подаються на перший та другий частотні входи МК [10], де формується інтервал часу τ_1 , що заповнюється імпульсами з частотою f_1 , отриманою від опорного генератора, до досягнення, заздалегідь встановленого в пам'яті МК, числа N_0 , далі за сформований інтервал часу τ_1 підраховується кількість імпульсів, що надіслані на вхід 2 МК з частотою f_2

$$N_1 = \tau_1 f_2 = N_0 f_1^{-1} f_2, \quad (3)$$

Число імпульсів N_1 зберігається у пам'яті МК, після чого формується часовий інтервал τ_2 , який заповнюється імпульсами з частотою f_1 до досягнення збереженого у пам'яті МК значення N_1

$$\tau_2 = N_1 f_1^{-1} = N_0 f_1^{-2} f_2. \quad (4)$$

Часовий інтервал τ_2 зберігається у пам'яті МК, після чого підраховується кількість імпульсів N_2 , що надіслані на 1-й вхід МК з частотою f_2 за інтервал часу τ_2 :

$$N_2 = \tau_2 f_2 = N_0 f_1^{-2} f_2^2. \quad (5)$$

Число імпульсів N_2 зберігається у пам'яті МК.

Далі в блоці обчислення МК виконується формування вихідного сигналу датчика у вигляді числового коду N_P , що лінійно залежить від вимірювальної ваги P наступним чином:

$$N_P = N_2 - N_0 = N_0 f_1^{-2} f_2^2 - N_0 = N_0 \left(f_0^2 (f_0 (1 + KP)^{-0.5})^{-2} - 1 \right) = N_0 KP. \quad (6)$$

Тестовий метод підвищення точності. Експериментальні дослідження показали, що результуюча похибка ВВ має значимі адитивні ($\Delta_{\Sigma A}$) і мультиплікативні ($\delta_{\Sigma M}$) складові, для зменшення яких використаний тестовий метод.

Алгоритм тестового методу наступний: при дії вимірюваної ваги P на ЧЕ формується вихідний сигнал ВВ у вигляді числового коду

$$N_1 = KP(1 + \delta_{\Sigma M}) + \Delta_{\Sigma A}. \quad (7)$$

Цей сигнал зберігається в пам'яті МК. Далі до вимірюваної ваги P , додається вага еталонної гирі ΔP та формується вихідний сигнал ВВ (адитивний тест)

$$N_2 = K(P + \Delta P)(1 + \delta_{\Sigma M}) + \Delta_{\Sigma A}. \quad (8)$$

Після цього чутливість ВВ змінюється в A разів і формується вихідний сигнал (мультиплікативний тест)

$$N_3 = AKP(1 + \delta_{\Sigma M}) + \Delta_{\Sigma A}. \quad (9)$$

Сформовані сигнали зберігаються в пам'яті МК.

За результатами проведених вимірювань в МК складається та вирішується система з трьох рівнянь:

$$\begin{cases} N_1 = KP(1 + \delta_{\Sigma M}) + \Delta_{\Sigma a}, \\ N_2 = K(P + \Delta P)(1 + \delta_{\Sigma M}) + \Delta_{\Sigma a}, \\ N_3 = AKP(1 + \delta_{\Sigma M}) + \Delta_{\Sigma a}. \end{cases} \quad (10)$$

Рішення цієї системи рівнянь дозволяє виразити результат вимірювання як

$$P = \frac{N_3 - N_1}{N_2 - N_1} \frac{\Delta P}{A - 1}. \quad (11)$$

Як видно з останнього рівняння застосування сумісного (адитивного і мультиплікативного) тестового методу дозволяє зменшити адитивні і мультиплікативні складові похибки до незначних величин. Похибка результату в основному визначається похибкою тестових сигналів, значення якої набагато менше результуючої похибки вимірювача ваги до застосування тестів.

Висновки. Розроблений ВВ, до застосування тестового методу, в діапазоні (0,01 ÷ 0,1) Н мав похибку вимірювання 2%. Застосування тестового методу зменшило результуючу похибку ВВ до 1%.

Список літератури: 1. *Туричин А.М.* Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб. и доп. / *А.М. Туричин, П.В. Новицкий.* – Л.: "Энергия", 1975. – 576 с. 2. *Левшина Е.С.* Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи): учеб. пособие для ВУЗов. / *Е.С. Левшина, П.В. Новицкий.* – "Энергоатомиздат". Ленингр. отд-ние, 1983. – 320 с. 3. *Евтихеев Н.Н.* Измерение электрических и неэлектрических величин: учеб. пособие для ВУЗов / *Н.Н. Евтихеев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров* // Под ред. Н.Н. Евтихеева. – М.: "Энергоатомиздат", 1990. – 352 с. 4. *Новицкий П.В.* Цифровые приборы с частотными датчиками / *П.В. Новицкий, В.Г. Кнорринг, В.С. Гутников.* – Л.: "Энергия", 1970. – 424 с. 5. *Бромберг Э.М.* Тестовые методы повышения точности измерений / *Э.М. Бромберг, К.Л. Куликовский.* – М.: "Энергия", 1978. – 176 с. 6. *Кондрашов С.И.* Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах. Монографія / *С.И. Кондрашов.* – Харків: НТУ "ХПИ", 2004. – 224 с. 7. Пат. 59973 UA. Автогенераторний вимірювач фізичних величин / *О.В. Гусельников*; заявник і патентовласник О.В. Гусельников (UA), опубл. 10.06.2011. 8. *Кондрашов С.И.* Метод построения универсальных преобразователей физических величин с частотным представлением измерительной информации / *С.И. Кондрашов, О.В. Гусельников* // Украинский метрологический журнал. – 2011. – № 2. – С. 55-58. 9. *Кондрашов С.И.* Автогенераторний перетворювач фізичних величин / *С.И. Кондрашов, О.В. Гусельников* // Метрологія та вимірювальна техніка (метрологія 2010): 7 Міжнар. науково-техн. конф, 12-14 жовт. 2010 р.: тез. допов. / ННЦ "Ин-т Метрології". – Харків, 2010. – Т. 2. – С. 337-340. 10. *Штак Ю.А.* Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров / *Ю.А. Штак.* – К.: "МК-Пресс", 2006. – 400 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Turichin A.M.* Jeletricheskie izmerenija nejelektricheskikh velichin. Izd. 5-e, pererab. i dop. / *A.M. Turichin, P.V. Novickij.* – L.: "Jenergija", 1975. – 576 s. 2. *Levshina E.S.* Jeletricheskie izmerenija fizicheskikh velichin: (Izmeritel'nye preobrazovateli): ucheb. posobie dlja VUZov / *E.S. Levshina, P.V. Novickij.* – "Jenergoatomizdat". Leningr. otd-nie, 1983. – 320 s. 3. *Evtiheev N.N.* Izmerenie jelektricheskikh i nejelektricheskikh velichin: ucheb. posobie dlja VUZov / *N.N. Evtiheev, Ja.A. Kupershmidi, V.F. Papulovskij, V.N. Skugorov* // Pod red. N.N. Evtiheeva. – M.: "Jenergoatomizdat", 1990. – 352 s. 4. *Novickij P.V.* Cifrovye pribory s chastotnymi datchikami / *P.V. Novickij, V.G. Knorring, V.S. Gutnikov.* – L.: "Jenergija", 1970. – 424 s. 5. *Bromberg Je.M.* Testovye metody povyshenija tochnosti izmerenij / *Je.M. Bromberg, K.L. Kulikovskij.* – M.: "Jenergija", 1978. – 176 s. 6. *Kondrashov S.I.* Metodi pidvishhennja tochnosti sistem testovih viprobuvan' elektrichnih vim irjuval'nih peretvorjuvachiv u robochih rezhimah. Monografija / *S.I. Kondrashov.* – Harkiv: NTU "HPI", 2004. – 224 s. 7. Pat. 59973 UA. Avtogenerornij vimirjuvach fizichnih velichin / *O.V. Gusel'nikov*; zavjannik i patentovlasnik O.V. Gusel'nikov (UA), opubl. 10.06.2011. 8. *Kondrashov C.I.* Metod postroenija universal'nyh preobrazovatelej fizicheskikh velichin s chastotnym predstavleniem izmeritel'noj informacii / *C.I. Kondrashov, O.V. Gusel'nikov* // Ukrainskij metrologicheskij zhurnal. – 2011. – № 2. – S. 55-58. 9. *Kondrashov S.I.* Avtogenerornij peretvorjuvach fizichnih velichin / *S.I. Kondrashov, O.V. Gusel'nikov* // Metrologija ta vimirjuval'na tehnika (metrologija 2010): 7 Mizhnar. naukovotehn. konf, 12-14 zhovt. 2010 r.: tez. dopov. / NNC "In-t Metrolog ii". – Harkiv., 2010. – T. 2. – S. 337-340. 10. *Shpak Ju.A.* Programmirovanie na jazyke C dlja AVR i PIC mikrokontrollerov / *Ju.A. Shpak.* – K.: "MK- Press", 2006. – 400 s.

Надійшла (received) 14.11.2014

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ"
Горчунов Б.М.

Kondrashov Sergey, Dr.Sci.Tech, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057)-707-00-00, e-mail: Palagin@khpi.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0002-5191-8562

Gusel'nikov Oleksii, master, graduate student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (097)-737-26-06, e-mail: alex-gv88@rambler.ru
ORCID ID: 0000-0003-4789-7671

УДК 62-83:621.77

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р. техн. наук, проф., зав. отд. ИТПМ НАН
Украины, Харьков,

Т.Б. НИКИТИНА, д-р. техн. наук, проф., зав. каф. ХНАДУ,
Харьков,

В.В. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, доц., директор УНППИ УИПА,
Харьков,

В.В. ХОМЕНКО, асп. УИПА, Харьков

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СТОХАСТИЧЕСКОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМАССОВЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Разработан метод многокритериального синтеза стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации, что позволяет существенно сократить время решения задачи и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. Приведены результаты сравнений динамических характеристик электромеханических систем с синтезированными регуляторами. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: многомассовая электромеханическая система, стохастическое робастное управление, многокритериальный синтез, стохастическая мультиагентная оптимизация.

Постановка проблемы и анализ литературы. Системы автоматического управления, способные обеспечивать высокую точность при наличии интенсивных задающих и возмущающих воздействий, а также при изменении структуры и параметров объекта управления в ходе функционирования необходимы при создании новых поколений техники и новых технологий. К таким системам управления обычно предъявляются весьма разнообразные и часто противоречивые требования при их работе в различных режимах и при различных внешних воздействиях: ступенчатых, линейно-изменяющихся, гармонических, случайных и т.д. [1].

Системы робастного управления [2 – 4] являются одним из интенсивно развивающихся направлений современной теории систем управления и имеют существенно меньшую чувствительность к изменению структуры, параметров объекта управления и внешних воздействий. Синтез робастных систем затрудняется, прежде всего, формулированием такого критерия качества робастного управления,

чтобы синтезированная система удовлетворяла предъявляемым техническим требованиям [5 – 7]. В работах [8 – 9] разработан метод многокритериального синтеза регуляторов, позволяющий удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. При этом выбор матриц, с помощью которых формируется вектор цели робастного управления осуществляется путем решения задачи нелинейного программирования. Для решения этой задачи с ограничениями использован метод последовательного квадратичного программирования (Sequential quadratic programming – SQP method). Так как целевая функция является многоэкстремальной, то используется процедура мультистарта для задания начальных точек решения задачи многокритериальной оптимизации из области рассматриваемого пространства с помощью алгоритмов поиска локальных критериев. Такой подход позволяет найти глобальный экстремум, однако требует многократного вычисления целевой функции и значительных затрат машинного времени. В последнее время для решения многоэкстремальных задач математического программирования широкое распространение получили бионические алгоритмы [10 – 11], позволяющие надежно находить глобальный оптимум многоэкстремальных овражных целевых функций и целевых функций с участками типа "плато" и существенно уменьшить количество вычислений целевой функции, и значительно сократить затраты машинного времени.

Целью статьи является разработка метода решения задачи многокритериального синтеза стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе таких систем в различных режимах и сократить время определения параметров стохастических робастных регуляторов многомассовых электромеханических систем.

Формулировка задачи стохастического робастного управления.

Представим вектор внешних воздействий в виде двух векторов: вектор ω_k включает внешние сигнальные воздействия на объект управления в виде заданий, возмущений и помех измерений, а вектор η_k включает внешние воздействия, которые приводят к изменению состояния системы за счет параметрических и структурных изменений модели объекта управления. Запишем для дискретного объекта управления с вектором состояния x_k разностное уравнение состояния, вектор цели z_k и вектор

измеряемого выхода y_k в стандартной форме, принятой в теории робастного управления [9]:

$$x_{k+1} = Ax_k + B_0\omega_k + B_2u_k + B_1\eta_k, \quad (1)$$

$$z_k = C_1x_k + D_{12}u_k, \quad (2)$$

$$y_k = C_2x_k + D_{21}\omega_k. \quad (3)$$

Таким образом, входными векторами этого объекта робастного управления являются вектор управления u_k и векторы внешних сигнальных ω_k и параметрических η_k возмущений.

Будем искать регулятор такой системы в виде дискретной динамической системы, заданной следующим разностным уравнением

$$\xi_{k+1} = \hat{A}\xi_k + \hat{B}y_k, \quad (4)$$

$$u_k = \hat{C}\xi_k. \quad (5)$$

Входом этой динамической системы (4) – (5) является вектор измеряемых переменных y_k , а ее выходом является вектор управления u_k исходной системы (1).

При синтезе робастного управления будем считать вектор внешних параметрических возмущений η_k независимым, а задачей синтеза робастного управления является минимизация принятой нормы вектора цели $\bar{z}(t)$ (2) по вектору управления u_k , и максимизация этой же нормы вектора цели $\bar{z}(t)$ по вектору параметрических возмущений η_k . При таком подходе с помощью робастного управления фактически минимизируется чувствительность системы к параметрическим возмущениям.

В настоящее время одним из интенсивно развивающихся подходов к синтезу стохастических робастных систем управления является синтез регуляторов, минимизирующих анизотропийную норму вектора цели управления [5 – 7]. Решение задачи синтеза стохастического робастного управления (4) – (5), с помощью которого минимизируется средняя анизотропия системы, сводится к вычислению четырех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и уравнения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала [2 – 4]. Однако при проектировании реальных систем управления не предъявляются требования к величине анизотропийной нормы вектора цели, да и сам вектор цели робастного управления обычно не задан. Основные

трудности практического применения современных методов управления связаны не столько с разработкой новых методов управления, сколько с неформальным выбором вектора цели робастного управления. Введем вектор искомым параметров X , компонентами которого являются матрицы C_1 и D_{12} , в виде

$$X = \{C_1, D_{12}\}, \quad (6)$$

с помощью которых формируется вектор цели робастного управления (2) исходной системы (1).

Требования, предъявляемые к проектируемым системам управления. К проектируемым многомассовым системам управления предъявляются разнообразные требования при их работе в различных режимах [1]. Как правило, накладываются определенные ограничения на качество переходных процессов – задается время первого согласования, время регулирования, перерегулирование и т.д. Обычно также задается максимальная дисперсия ошибки слежения либо стабилизации при отработке случайных задающих воздействий, либо компенсация случайных возмущающих воздействий, и при этом, естественно, должны выполняться ограничения на переменные состояния и управления. Еще одним требованием, предъявляемым к системам управления, является ограничение ошибок отработки задающих, либо компенсации возмущающих воздействий в виде гармонических сигналов. При этом может быть задан входной сигнал одной частоты, либо несколько характерных рабочих частот, а может быть задан диапазон рабочих частот, в котором необходимо выполнить определенные условия [9].

Для таких систем в большинстве практических случаев с помощью типовых ПИД регуляторов не удастся выполнить технические требования, предъявляемые к системе, что обуславливает применение более сложных регуляторов и современных методов их синтеза и, в частности, робастного управления.

Формирование нелинейной схемы компромисса при многокритериальном синтезе многомассовых систем. Для решения этой задачи многокритериальной оптимизации используется простейшая нелинейная схема компромиссов [1], при которой исходная многокритериальная задача сводится к однокритериальной. Такая нелинейная схема компромиссов соответствует методу штрафных функций с внутренней точкой. При этом предполагается, что исходная точка является допустимой. При синтезе многомассовых электромеханических систем обычно бывает ситуация, когда по ряду локальных критериев исходная точка является недопустимой. В

частности, это касается заданных значений времени первого согласования, перерегулирования, точности обработки и компенсации случайных внешних воздействий и многих других локальных критериев качества. Более того, некоторые локальные критерии в результате многокритериального синтеза вообще не могут быть выполнены. Однако при этом ряд критериев, таких как величины управляющих воздействий и переменных состояния являются допустимыми. Поэтому, в рассматриваемой схеме компромиссов используется комбинация метода штрафных функций с внутренней точкой для локальных критериев, являющихся допустимыми и метод штрафных функций с внешней точкой для локальных критериев, являющихся недопустимыми.

Тогда исходная многокритериальная задача оптимизации вектора искоемых параметров (6) с помощью такой нелинейной схемы компромиссов сводится к однокритериальной задаче нелинейного программирования

$$f(x^*) \leq f(x), \quad (7)$$

при ограничениях

$$D = \{ \forall x \in R^n \mid \overline{g_i(x)} \leq 0, \quad i = \overline{1, l}; \quad \overline{h_j(x)} = 0, \quad j = \overline{1, m} \}. \quad (8)$$

Алгоритм решения многоэкстремальной задачи нелинейного программирования на основе стохастической мультиагентной оптимизации. При решении задач многокритериального синтеза стохастических робастных регуляторов многомассовых электромеханических систем было установлено [9], что целевая функция исходной задачи нелинейного программирования (7), полученная в результате сворачивания локальных критериев и ограничений с помощью такой нелинейной схемы компромиссов [1], является многоэкстремальной и для ее вычисления требуется значительное время. В целевой функции (7) имеются многомерные овраги и области, в окрестности которых значение целевой функции меняется очень медленно, вследствие чего применение классических методов оптимизации является малоэффективным. В первую очередь это связано с тем, что использование градиентов целевой функции и ограничений не только требует проведения дополнительных вычислений целевой функции, увеличение количества которых нежелательно, но может также привести к явлению "блуждания" по дну оврага или медленному продвижению к глобальному оптимуму при нахождении в окрестности участка типа "плато". Кроме того, высока вероятность попадания в область притяжения одного из локальных экстремумов с невозможностью выхода из него на следующих шагах оптимизационного процесса.

Применение бионических алгоритмов для решения многоэкстремальных задач математического программирования показало их высокую эффективность нахождения глобального оптимума таких целевых функций. Среди большого разнообразия бионических алгоритмов наиболее перспективными являются стохастические мультиагентные методы, к которым относится оптимизация роем частиц [10 – 11], в котором частицы роя перемещаются в многомерном пространстве поиска.

При этом вероятность генерации новой связи равна

$$p = 1 - \left(1 - \frac{1}{s}\right)^K, \quad (9)$$

а вероятность наличия у частицы n информаторов равна

$$p(n) = C_{s-1}^{n-1} \left(\frac{K}{s}\right)^{n-1} \left(1 - \frac{K}{s}\right)^{s-n}. \quad (10)$$

Алгоритм движения частиц описывается следующей рекуррентной зависимостью

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= \chi[v_i(t) + \varphi_{i1}(t)(p_i(t) - x_i(t)) + \varphi_{i2}(t)(g_i(t) - x_i(t))], \\ x_i(t+1) &= x_i(t) + v_i(t+1). \end{aligned}$$

Здесь x_i и v_i – соответственно положение и скорость i -ой частицы, χ – шаг по скорости движения. Функции φ_{i1} и φ_{i2} характеризуют соответственно притяжение i -ой частицы к локальному оптимуму p_i , определяемому i -ой частицей и к глобальному оптимуму g_i , определяемому всеми частицами роя. Таким образом, функции φ_{i1} и φ_{i2} характеризуют отталкивание и притяжение частиц роя. При своем движении частицы пытаются улучшить найденное ими ранее решение и обмениваются информацией со своими соседями, что позволяет находить глобальный оптимум за меньшее количество итераций. Преимуществом этих методов перед классическими градиентными методами оптимизации является также то, что в них не требуется вычисления производных целевой функции, они практически нечувствительны к близости начального приближения к искомому решению, и позволяют легче учитывать разнообразные ограничения при нахождении глобального оптимума.

Результаты моделирования на ЭВМ. В качестве примера рассмотрим динамические характеристики многомассовой электромеханической следящей системы [8] с синтезированными

стохастическими робастными регуляторами. Одной из основных характеристик такой следящей системы является ошибка слежения либо стабилизации при отработке случайных задающих воздействий, либо компенсации случайных возмущающих воздействий. На рис. 1 показана реализация случайного процесса изменения угла поворота объекта управления $\varphi(t)$ при случайном изменении момента внешнего сопротивления, действующего на объект управления при его установке на подвижном основании, движущемся с заданной скоростью по неровной поверхности с нормированными характеристиками неровностей. Другими важнейшими характеристиками такой следящей системы являются показатели качества переходных процессов в различных режимах работы.

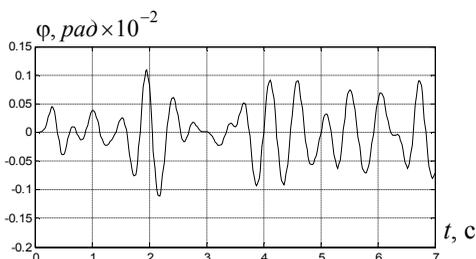


Рис. 1. Реализация случайного процесса изменения угла поворота объекта управления при случайном изменении момента внешнего сопротивления

На рис. 2 показан переходный процесс угла поворота объекта управления $\varphi(t)$ при отработке системой заданного рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$ между фактическим и заданным углом поворота объекта управления.

Процессы, показанные на рис. 1 и рис. 2, построены для одного набора параметров объекта управления из заданных в техническом задании диапазонов изменения параметров объекта управления. Результаты сравнений полученных динамических характеристик рассмотренной многомассовой электромеханической следящей системы показали, что применение синтезированного стохастического робастного управления позволило уменьшить ошибку компенсации случайного внешнего возмущения в 1,3 – 1,5 раза, сократить время переходных процессов в 1,5 – 2 раза в зависимости от принятого набора параметров объекта управления и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с существующей системой с типовыми регуляторами.

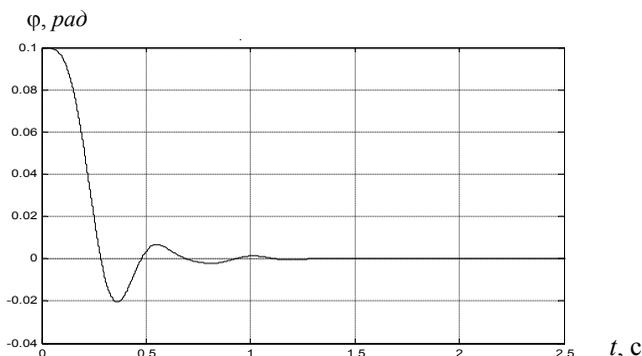


Рис. 2. Переходный процесс угла поворота объекта управления при отработке системой рассогласования между фактическим и заданным углом поворота объекта управления

Выводы. На основе стохастической мультиагентной оптимизации роум частиц разработан метод решения сформулированной многоэкстремальной задачи нелинейного программирования с ограничениями, к которой с помощью нелинейной схемы компромиссов сводится синтез стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах работы, и существенно сократить время решения задачи. Показано, что применение синтезированных стохастических робастных регуляторов позволило уменьшить ошибку компенсации случайного внешнего возмущения, сократить время регулирования и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

Список литературы: 1. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем / А.Н. Воронин. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с. 2. Diamond P. Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems / P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – P. 28-42. 3. Vladimirov I.G. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ -optimization problem / I.G. Vladimirov, A.R. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA), 1996. – P. 427-432. 4. Semyonov A.V. Stochastic approach to H_∞ -optimization / A.V. Semyonov, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – P 2249-2250. 5. Батищев Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с. 6. Штойер Р. Многокритериальная

оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Под ред. А.В. Лотова. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с. 7. *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматгиздат, 2004. – 176 с. 8. *Кузнецов Б.И.* Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с. 9. *Никитина Т.Б.* Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами / Т.Б. Никитина. – Харьков: ХАДУ, 2013. – 432 с. 10. *Clerc. M.* Particle Swarm Optimization / M. Clerc. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. 11. *Gazi V.* Swarm Stability and Optimization / V. Gazi, K.M. Passino. – Springer, 2011. – 318 p.

Bibliography (transliterated): 1. *Voronin A.N.* Многокритериальный синтез динамических систем / A.N. Voronin. – К.: Naukova dumka, 1992. – 160 с. 2. *Diamond P.* Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems / P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – P. 28-42. 3. *Vladimirov I.G.* State-space solution to anisotropy-based stochastic H_{∞} -optimization problem / I.G. Vladimirov, A.R. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA). – 1996. – P. 427-432. 4. *Semyonov A.V.* Stochastic approach to H_{∞} – optimization / A.V. Semyonov, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – P. 2249-2250. 5. *Batishhev D.I.* Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / D.I. Batishhev, D.E. Shaposhnikov. – Nizhny Novgorod: IPF RAN, 1994. – 92 с. 6. *Shtojer R.* Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Под ред. А.В. Лотова. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с. 7. *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматгиздат, 2004. – 176 с. 8. *Kuznetsov B.I.* Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями / B.I. Kuznetsov, T.B. Nikitina, V.V. Kolomiets. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с. 9. *Nikitina T.B.* Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами / T.B. Nikitina. – Харьков: ХАДУ, 2013. – 432 с. 10. *Clerc. M.* Particle Swarm Optimization / M. Clerc. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. 11. *Gazi V.* Swarm Stability and Optimization / V. Gazi, K.M. Passino. – Springer, 2011. – 318 p.

Поступила (received) 25.02.14.

Статью представил д-р техн. наук, проф., заслуженный изобретатель Украины, зав. кафедрой "Системы информации" НТУ "ХПИ" Серков А.А.

Kuznetsov Borys, , Dr.Sci.Tech, Professor
State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism"
of the National Academy of Sciences of Ukraine
Str. Industrialnaya, 19, Kharkov, Ukraine, 61106
Tel.: (050)-576-69-00, e-mail: bikuznetsov@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-1100-095X

Nikitina Tatyana, , Dr.Sci.Tech, Professor
Kharkov National Automobile and Highway University
Str. Petrovskogo, 25, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (050)-576-69-00, e-mail: bikuznetsov@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-0185-3078

Kolomiets Valery, Cand.Tech.Sci.
Training and Research Institute of Professional Education
of the Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy
Str. Universitetskaya, 16, Kharkov, Ukraine, 61003
Tel.: (050)-576-69-00, e-mail: pr.etfuipa@yandex.ru
ORCID ID 0000-0002-9073-5793

Khomenko Viktor, master
Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy
Str. Universitetskaya, 16, Kharkov, Ukraine, 61003
Tel.: (095)712-88-18, e-mail: vitman_@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-9826-1123

УДК 621.314: 621.391

О.В. ЛАВРИНЕНКО, стаж. преп., НТУ "ХПИ"

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВС

Рассмотрена математическая модель, описывающая процесс газораспределения в двигателе внутреннего сгорания. Экспериментально проверены новые информативные параметры, характеризующие техническое состояние газораспределительного механизма (ГРМ) двигателя. Построены обучающие совокупности и разработаны решающие правила, позволяющие с большей точностью выявлять дефекты ГРМ. Ил.: 7. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, газораспределительный механизм, информативные параметры.

Постановка проблемы. Обеспечение приемлемых технико-экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) тесно связано с поддержанием на должном уровне технического состояния его основных систем. Одна из основных систем – система газораспределения, параметры которой в процессе эксплуатации изменяются. В связи с этим возникает необходимость непрерывного контроля технического состояния в процессе эксплуатации по соответствующим информативным параметрам и диагностическим признакам, которые следует выбрать с учетом экспериментальных данных.

Анализ литературы показывает, что в настоящее время ведутся интенсивные исследования, направленные на создание новых систем диагностирования ДВС [1]. В ряде работ предложены пути решения задач диагностики новейшими алгоритмами теории информации. Данные методики основаны на поисковых алгоритмах идентификации с адаптивной моделью [2], искусственных нейронных сетях [3, 4], кластерном анализе [5], нечеткой логике [6, 7]. Глубина диагностирования при этом существенно зависит от выбора математической модели диагностического сигнала. Например, в работе [8] в качестве таковой был использован линейный периодический случайный процесс (ЛПСР), низшие моменты которого (дисперсия и корреляционная функция) используются в качестве диагностических признаков, и позволяют обнаружить неисправный клапан.

По своей физической природе ДВС является объектом циклического действия и выпрямленный вибросигнал, возникающий при работе впускных и выпускных клапанов системы газораспределения, содержит

три составляющие: постоянную (среднее значение), переменную (отклонение выпрямленного вибросигнала от среднего значения, что может быть охарактеризовано дисперсией) и импульсную составляющую, имеющую место при ударах клапана о седло. Поскольку указанный вибросигнал подвержен влиянию множества случайных факторов (подача топлива, воздухоснабжение, изменение нагрузки и т.д.), его можно рассматривать как случайный процесс $\{\xi(t), t \in (-\infty, \infty)\}$, к которому в качестве математической модели в полной мере подходит ЛПСР [9, 10].

Определения и основные характеристики ЛПСР. Согласно [10] случайный процесс $\{\xi(t), t \in (-\infty, \infty)\}$ называется периодическим в широком смысле, если существует такое $T > 0$, для которого одномерная и двумерная функции распределения удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} F(x, t) = F(x, t + T), \\ F(x_1, x_2, t_1, t_2) = F(x_1, x_2, t_1 + T, t_2 + T), \\ t_1, t_2 \in (-\infty, \infty). \end{cases} \quad (1)$$

ЛПСР имеет моменты высшего порядка (включая и коэффициенты асимметрии и эксцесса), которые можно использовать в качестве диагностических признаков для уточнения технического состояния двигателя.

Цель статьи – на базе математической модели ЛПСР, описывающей процесс газораспределения в двигателе, экспериментально проверить новые информативные параметры, характеризующие техническое состояние ДВС. На основании предложенных параметров построить обучающие совокупности (образы) и разработать решающие правила, которые позволяют выявить дефекты в двигателе.

С целью получения вибросигнала работы механизма газораспределения проведена серия экспериментальных работ на *V*-образном четырехцилиндровом двигателе, в ходе которых упомянутый сигнал снимался с датчика детонации GT305, установленного на крышке блока клапанов. Для определения типа распределения вибросигнала (рис. 1, 2), реализации были обработаны с использованием гистограммного анализа и последующим сглаживанием полученных гистограмм по методу наименьших квадратов [10]. Отметим, что виброграммы на рис. 1, 2 были записаны на цифровой осциллограф Tektronix TBS1000B в установившемся режиме работы ДВС, причем для

синхронизации использовался сигнал отметчика верхней мертвой точки первого цилиндра (этот сигнал на графиках не показан).

На рис. 1 приведена выпрямленная и очищенная от помех на уровне 0,02 В виброграмма работы газораспределительного механизма (ГРМ) без дефектов, работающего в номинальном режиме; гистограмма и сглаживающая кривая (рис. 3), построены по методу наименьших квадратов. Общий объем выборки данных n составляет 2250 точек, что соответствует шести оборотам вала.

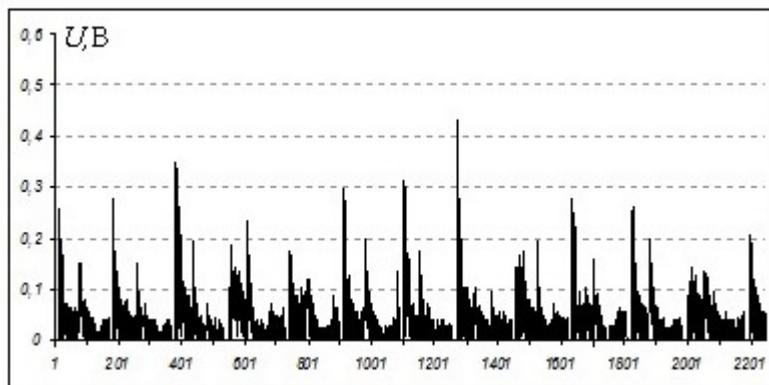


Рис. 1. Виброграмма работы ГРМ без дефектов

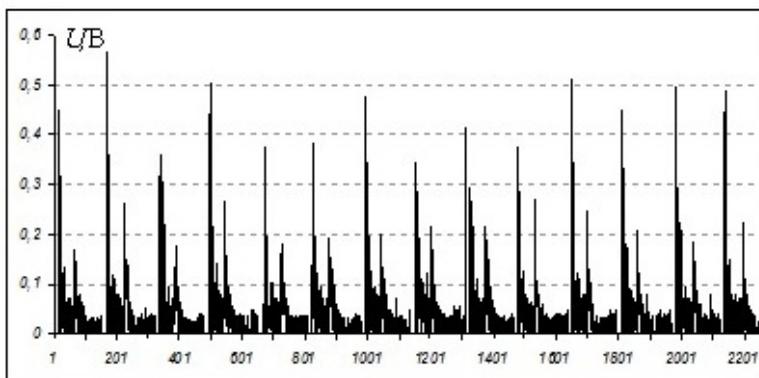


Рис. 2. Виброграмма работы ГРМ при увеличении зазора между клапаном и седлом

На рис. 2 приведена выпрямленная и очищенная от помех на уровне 0,02 В виброграмма работы ГРМ с дефектом (увеличение зазора между клапаном и седлом до 0,25 – 0,3 мм), работающего в номинальном режиме; гистограмма и сглаживающая кривая построены по методу наименьших квадратов (рис. 4). Общий объем выборки данных n составляет 2250 точек.

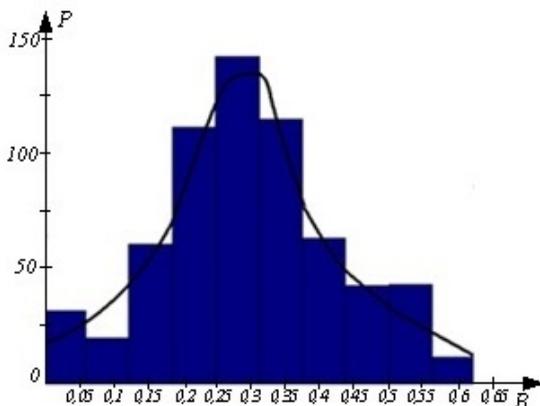


Рис. 3. Гистограмма и сглаживающая кривая работы ГРМ без дефектов

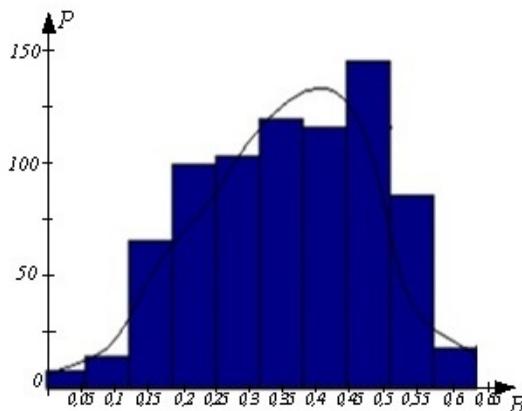


Рис. 4. Гистограмма и сглаживающая кривая работы ГРМ при увеличении зазора между клапаном и седлом

На рис. 5, 6 приведены гистограммы для двигателя внутреннего сгорания того же типа с дефектами в газораспределительном механизме. Рис. 5 соответствует случаю уменьшения зазора между клапаном и седлом до до 0,01мм), а рис. 6 – износу толкателя клапана.

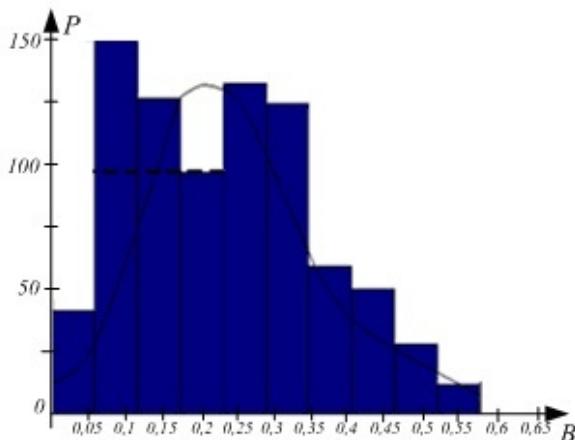


Рис. 5. Гистограмма и сглаживающая кривая работы ГРМ при уменьшении зазора между клапаном и седлом

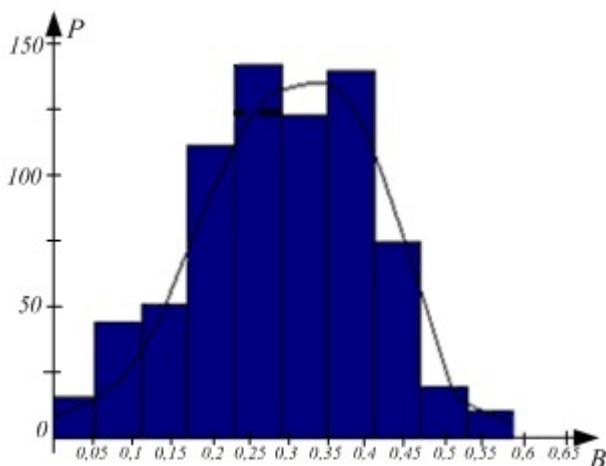


Рис. 6. Гистограмма и сглаживающая кривая работы ГРМ при износе толкателя клапана

Для приведенных кривых найдены асимметрия и эксцесс [10], которые были приняты в качестве диагностических признаков.

$$k = \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{(n-1)^3 \cdot (G_x)^3}} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^3, \quad (2)$$

$$j = \frac{n}{(n-1)^2 \cdot (G_x)^4} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^4 - 3. \quad (3)$$

где n – число измерений; x_i – i -я измеренная величина; m_x – математическое ожидание измеренной величины; G_x – среднеквадратическое отклонение измеренной величины.

Именно эти параметры были выбраны в качестве координат диагностического пространства, в котором по количественным оценкам k и j были построены обучающие совокупности. После обработки 500 гистограмм со сглаживающими кривыми были сформированы обучающие совокупности, соответствующие различным техническим состояниям газораспределительного механизма. Это иллюстрируется на рис. 7.

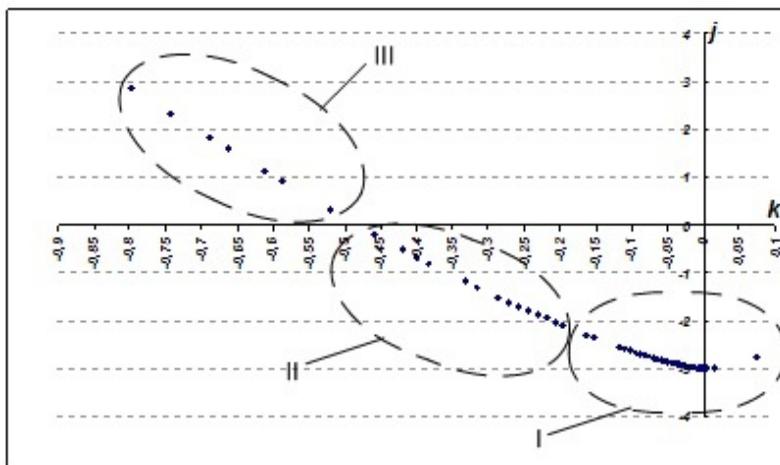


Рис. 7. Диагностическое пространство работы ГРМ

В частности, область I соответствует двигателю без дефектов в газораспределительном механизме; области II – двигателю с дефектами ГРМ в связи с увеличенным зазором в сопряжении; область III – соответствует двигателю с дефектами ГРМ в связи с наименьшими зазорами в сопряжении.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования показали:

1. В качестве диагностических признаков технического состояния ГРМ двигателя внутреннего сгорания эффективно можно использовать коэффициенты асимметрии и эксцесса. В качестве диагностического пространства для формирования обучающих совокупностей предложено использовать плоскость, осями координат в которой являются коэффициенты асимметрии и эксцесса.

2. В выбранном диагностическом пространстве предложен способ построения образов, соответствующих следующим техническим состояниям узлов ГРМ:

- условно исправны, зазор в сопряжении в пределах нормы, область I (рис. 7);
- зазор в сопряжении равен 0,25–0,3 мм, область II (рис. 7);
- зазор в сопряжении $\leq 0,01$ мм, область III (рис. 7).

Предложенный метод позволяет применить обобщенный диагностический подход к явлениям, которые описываются ЛПСП, в дальнейшем предполагается использовать его для диагностики энергоустановок.

Список литературы: 1. Современные информационно-измерительные системы вибродиагностики ДВС / *А.Н. Борисенко, П.С. Обод, О.В. Лавриненко* // Вестник НТУ "ХПИ". – 2010. – № 39. – С. 132-137. 2. *Коньков А.Ю.* Диагностирование технического состояния дизеля в эксплуатации на основе идентификации быстропротекающих рабочих процессов: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра. техн. наук: спец. 05.04.02 / *Коньков А.Ю.* – Хабаровск, 2010. – 35 с. 3. *Sangha M.S.* Neural network fault classification of transient data in an automotive engine / *M.S. Sangha, J.B. Gomm, D.Yu. J.* // Modell., Identif. Contr. 2008. – № 3 (2). – P. 148-155. 4. *Marko K.A.* Neural network application to comprehensive engine diagnostics // *K.A. Marko, B. Bryant, N. Soderborg* // In IEEE International Conference of System, Man and Cybernetics, Chicago, IL, 1992. – P. 1016-1022. 5. *Ле Ван Дием* Модели и алгоритмы технического диагностирования судовых дизельных установок в процессе эксплуатации: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами" / *Ле Ван Дием*. – Санкт-Петербург, 2006. – 24 с. 6. *Macian V.* Fuzzy logic-based expert system for diesel engine oil analysis diagnosis / *V. Macian, B. Tormos, A. Sala, J. Ramirez.* // Insight–Non–dest. Test. Cond. Monitor. – 2006. – № 48 (8). – P. 462-469. 7. *Кузнецов А.В.* Разработка системы диагностики ДВС на основе нечеткой логики: дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.06 / *Кузнецов А.В.* – М.: 2007. – 147 с. 8. *Марченко Б.Г.* Теория диагностики энергоагрегатов по девиации вращающихся узлов и ее практическая реализация на дизель-электрических генераторах. Часть 4. Экспериментальная проверка методики диагностики цилиндропоршневой группы дизель-электрического генератора / *Б.Г. Марченко, М.В. Мыслович* // Техн. электродинамика. – 1999. – № 4. – С. 40-45 9. *Драган Я.П.* Структура и представление моделей стохастических сигналов / *Я.П. Драган*. – К.: Наукова думка, 1980. – 384 с. 10. *Бендат Дж.* Измерение и анализ случайных процессов / *Дж. Бендат, А. Пирсон*. – М.: Мир, 1974. – 463 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sovremennye informacionno-izmeritel'nye sistemy vibrodiagnostiki DVS / *A.N. Borisenko, P.S. Obod, O.V. Lavrinenko* // Vestnik NTU "HPI". – 2010. – № 39. – S. 132-137. 2. *Kon'kov A.Ju.* Diagnostirovanie tehniceskogo sostojanija dizelja v jekspluataciji na osnove identifikacii bystroprotekajushihh rabochih processov: avtoref. dis. na soiskanie uch. stepeni d-ra. tehn. nauk: spec. 05.04.02 / *Kon'kov A.Ju.*. – Habarovsk, 2010. – 35 s. 3. *Sangha M.S.* Neural network fault classification of transient data in an automotive engine // *M.S. Sangha, J.B. Gomm, D.Yu. J.* // Modell., Identif. Contr. 2008. – № 3 (2). –

P. 148-155. **4. Marko K.A.** Neural network application to comprehensive engine diagnostics // *K.A. Marko, B. Bryant, N. Soderborg* // In IEEE International Conference of System, Man and Cybernetics, Chicago, IL, 1992. – P. 1016-1022. **5. Le Van Diem** Modeli i algoritmy tehničeskogo diagnostirovanija sudovyh dizel'nyh ustanovok v processe jekspluataciji: avtoref. dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.13.06 "Avtomatizacija i upravlenie tehničeskimi processami i proizvodstvami" / *Le Van Diem*. – Sankt-Peterburg, 2006. – 24 s. **6. Macian V.** Fuzzy logic-based expert system for diesel engine oil analysis diagnosis / *V. Macian, B. Tormos, A. Sala, J. Ramirez* // *Insight-Non-dest. Test. Cond. Monitor.* – 2006. – № 48 (8). – P. 462-469. **7. Kuznecov A.V.** Razrabotka sistemy diagnostiki DVS na osnove nechetkoj logiki: dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.13.06 / *A.V. Kuznecov*. – M.: 2007. – 147 s. **8. Marchenko B.G.** Teorija diagnostiki jenergoagregatov po deviacii vrashhajushihhsja uzlov i ee praktičeskaja realizacija na dizel'-jelektričeskikh generatorah. Čast' 4. Jeksperimental'naja proverka metodiki diagnostiki cilindroporshnevoj grupy dizel'-jelektričeskogo generatora / *B.G. Marchenko, M.V. Myslovich* // *Tehn. jelektrodinamika*. – 1999. – № 4. – S. 40-45 **9. Dragan Ja.P.** Struktura i predstavlenie modelej stohastičeskikh signalov / *Ja.P. Dragan*. – K.: Naukova dumka, 1980. – 384 s. **10. Bendat Dzh.** Izmerenie i analiz sluchajnyh processov / *Dzh. Bendat, A. Pirson*. – M.: Mir, 1974. – 463 s.

Поступила (received) 25.12.2014

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Борисенко А.Н.

Lavrinenko Olga
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-69-61, e-mail: lavrinenko_olya@mail.ru
ORCID ID: 0000-0001-5274-3955

УДК 007:159.955:519.768:621.372.852: 621.372.413

Д.Б. МАМЕДОВ, асп., НТУ "ХПИ",
А.Г. ЮЩЕНКО, канд. физ.-мат. наук, проф., НТУ "ХПИ"

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЧ-ФИЛЬТРА С КВАЗИ- H^{10n} МОДАМИ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ

Представлена электродинамическая модель конструкции СВЧ-фильтра на основе волноводно-диэлектрических резонаторов, частично заполняющих прямоугольный волновод по ширине. Модель построена на основе решения задачи рассеяния методами обобщенной матрицы и частичных областей. Модель позволяет повысить точность интеллектуальной САПР конструирования многосвязных фильтров, отвечающих новому поколению радиотелекоммуникационных систем миллиметрового диапазона, соответствующих стандартам ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c и IEEE 802.11ad. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: СВЧ-фильтр, резонатор, обобщенная матрица рассеяния, интеллектуальная САПР, стандарты: ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad.

Постановка проблемы и анализ литературы. Недавняя стандартизация диапазонов 3 – 5 миллиметровых волн позволяет ожидать бурного роста развития высококачественных радиотелекоммуникационных сетей этого диапазона [1 – 3]. Поэтому возникает необходимость в разработке соответствующей высококачественной элементной базы, включая полосовые фильтры.

Конструкции СВЧ фильтров на основе частично заполненного волновода лейкосапфировыми или кварцевыми диэлектрическими резонаторами, помещенными в область запредельного волновода (рис. 1), отличаются высокими параметрами качества, такими, как редкий спектр паразитных колебаний и высокий уровень передаваемой мощности [4 – 6]. Частичное заполнение в H -плоскости волновода позволяет реализовать колебания квази- H_{10n} , имеющие редкий спектр паразитных мод: до удвоенной рабочей частоты и выше [7].

В настоящее время разработаны оригинальные интеллектуальные САПР конструирования полосовых фильтров на основе частично заполненных ВДР [8 – 10]. Эти логико-математические системы проектирования содержат базу знаний, которая анализирует прошедший через структуру СВЧ-сигнал и по его форме принимает решения об изменении геометрии фильтра до тех пор, пока не сформируется требуемая амплитудно-частотная характеристика. Расчет же прошедшего

сигнала осуществляется с помощью электродинамической модели, построенной с помощью метода частичных областей (МЧО), который в численной реализации позволяет учесть большое число волн в регулярном волноводе и один тип – в частично заполненном диэлектриком. При переходе в миллиметровый диапазон волн возникает необходимость в снижении погрешности расчетов, чего можно добиться использованием хорошо зарекомендовавшего себя метода обобщенной матрицы рассеяния (ОМР). В дальнейшем нами предполагается также разработка САПР для фильтров на основе резонаторов различных классов, которые также удобно рассчитывать, используя отдельные матрицы прохождения резонаторов с частичным заполнением и по ширине и по высоте волноводов, имеющие различные базисы нормальных волн.

Целью исследования является разработка электродинамической модели СВЧ фильтра с квази- H_{10n} модами на основе обобщенной матрицы рассеяния и метода частичных областей.

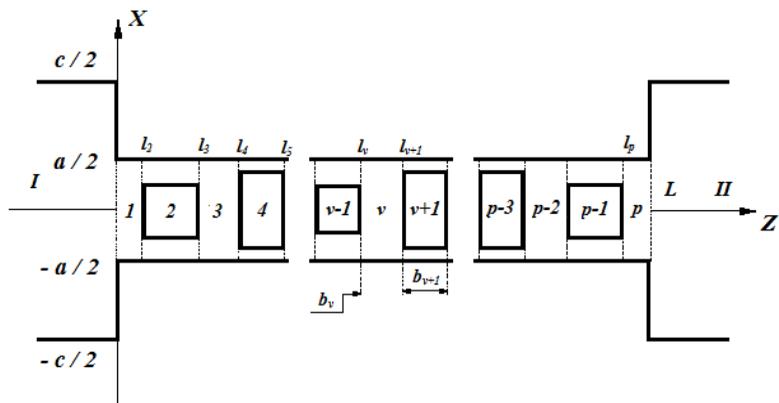


Рис. 1. Геометрия задачи

- 1 – регулярный волновод; 1 – запердельный волновод;
- 2 – частично заполненный диэлектриком

Решение задачи рассеяния. Согласно МЧО, разложения электромагнитного поля единственной отличной от нуля компоненты электрического поля в каждой частичной удовлетворяют волновому уравнению и граничным условиям на идеальном проводнике (рис. 1). Диссипативными потерями в диэлектрике на данном этапе моделирования пренебрегаем, поскольку для фильтров используются

монокристаллы кварца и лейкосапфира, имеющие низкие значения тангенса угла диэлектрических потерь.

Решение задачи рассеяния сводится к определению связи между амплитудами прошедших и падающих волн A_m^{M+1} , B_m^{M+1} и A_m^1 , B_m^1 . Для этого необходимо рассчитать набег фаз различных типов волн на участке однородного полого волновода. Матрица передачи в данном случае диагональная и содержит аналитически вычисляемые экспоненты. Вторая матрица отвечает дифракции волны на участке частично заполненного диэлектриком волновода. Необходимое количество постоянных распространения Γ_n вычисляется из дисперсионного уравнения [11].

Пользуясь условиями непрерывности тангенциальных составляющих электромагнитного поля на границах частичных областей и используя метод проекционного сшивания, получаем следующие бесконечные СЛАУ:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} (C_n^i + D_n^i e^{-j\Gamma_n d_i}) I_{mn} = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^i e^{-j\Gamma_n l_i} + B_n^i) \delta_{mn}, \\ \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n (C_n^i - D_n^i e^{-j\Gamma_n d_i}) I_{mn} = \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n (A_n^i e^{-j\Gamma_n l_i} - B_n^i) \delta_{mn}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^{i+1} + B_n^{i+1} e^{-j\Gamma_n l_{i+1}}) \delta_{mn} = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n^i e^{-j\Gamma_n d_i} + D_n^i) I_{mn}, \\ \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n (A_n^{i+1} - B_n^{i+1} e^{-j\Gamma_n l_{i+1}}) \delta_{mn} = \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n (C_n^i e^{-j\Gamma_n d_i} - D_n^i) I_{mn}. \end{cases}$$

где A_n^i , B_n^i , C_n^i , D_n^i – амплитуды падающих и отраженных волн; Γ_n – постоянная распространения n -ой гармоники; $\delta_{mn} = \begin{cases} 1, & m = n, \\ 0, & m \neq n, \end{cases}$

$I_{mn} = \frac{2}{a} \int_{-a/2}^{a/2} -X'_n(x) \sin\left(\frac{m\pi}{a}(x + a/2)\right) dx$, d_i – длина участка запредельного волновода без диэлектрика; l_i – длина участка запредельного волновода с диэлектриком.

Вводя новые переменные $X_n = C_n + D_n$, $Y_n = C_n - D_n$, $I_n^p = A_n^i e^{-j\gamma_n l_i} + B_n^{i+1} e^{-j\gamma_n l_{i+1}}$, $I_n^r = A_n^i e^{-j\gamma_n l_i} - B_n^{i+1} e^{-j\gamma_n l_{i+1}}$, $G_n^p = A_n^{i+1} + B_n^i$, $G_n^r = A_n^{i+1} - B_n^i$ и постоянные величины $p_n = (1 + e^{-j\Gamma_n d_i})$, $g_n = (1 - e^{-j\Gamma_n d_i})$, в итоге получаем:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} X_n p_n I_{mn} = I_m^p + G_m^p, \\ \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n Y_n p_n I_{mn} = \gamma_m I_m^r + \gamma_m G_m^r, \\ \sum_{n=1}^{\infty} Y_n g_n I_{mn} = I_m^r - G_m^r, \\ \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n X_n g_n I_{mn} = \gamma_m I_m^p - \gamma_m G_m^p. \end{cases}$$

Выражая G_m^p и G_m^r из первой пары уравнений и подставляя во вторую, приходим к системе уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} (\gamma_m p_n + \Gamma_n g_n) I_{mn} X_n &= 2\gamma_m I_m^p, \\ \sum_{n=1}^{\infty} (\Gamma_n p_n + \gamma_m g_n) I_{mn} Y_n &= 2\gamma_m I_m^r, \end{aligned}$$

из решения которой находим связь X_n и Y_n от переменных I_m^p и I_m^r , что выражается матричными соотношениями: $\vec{X} = \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} \vec{I}^p$ и $\vec{Y} = \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C} \vec{I}^r$, где матрицы \widehat{S}_X и \widehat{S}_Y определяются соотношениями: $(\widehat{S}_X)_{nm} = (\gamma_m p_n + \Gamma_n g_n) I_{mn}$ и $(\widehat{S}_Y)_{nm} = (\gamma_m g_n + \Gamma_n p_n) I_{mn}$, а матрица свободных элементов является диагональной $(\widehat{C})_{mm'} = \gamma_m \delta_{mm'}$.

По найденным векторам \vec{X} и \vec{Y} находятся вектора \vec{G}^p и \vec{G}^r по формулам:

$$\vec{G}^p = \widehat{A}_X \vec{X} - \vec{I}^p = (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{E}) \vec{I}^p \quad \text{и} \quad \vec{G}^r = \vec{I}^r - \widehat{A}_Y \vec{Y} = (\widehat{E} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C}) \vec{I}^r.$$

Здесь $(\widehat{A}_X)_{mn} = I_{mn} p_n$ и $(\widehat{A}_Y)_{mn} = I_{mn} g_n$, а \widehat{E} – диагональная единичная матрица.

Данные соотношения позволяют определить коэффициенты отражения и прохождения, т.е. полную матрицу рассеяния структуры. Для вычисления матрицы передачи, необходимы дополнительные преобразования:

$$\begin{aligned} 2\vec{A}^{i+1} &= \vec{G}^p + \vec{G}^r = (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C}) \overrightarrow{AE}^i + (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} + \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C} - 2\widehat{E}) \overrightarrow{BE}^{i+1}, \\ 2\vec{B}^i &= \vec{G}^p - \vec{G}^r = (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} + \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C} - 2\widehat{E}) \overrightarrow{AE}^i + (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C}) \overrightarrow{BE}^{i+1} \end{aligned}$$

Выразив:

$$\overrightarrow{BE}^{i+1} = 2(\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C})^{-1} \vec{B}^i - (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C})^{-1} (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} + \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C} - 2\widehat{E}) \overrightarrow{AE}^i,$$

найдем

$$\begin{aligned} \vec{A}^{i+1} &= \\ &= \frac{(\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C})^{-1} (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} + \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C} - 2\widehat{E}) (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C})^{-1} (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} + \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C} - 2\widehat{E}) \overrightarrow{AE}^i +}{2} \\ &\quad + (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} + \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C} - 2\widehat{E}) (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C})^{-1} \vec{B}^i. \end{aligned}$$

Тогда матрица передачи участка волновода с диэлектрической вставкой имеет вид

$$\widehat{T}_i = \begin{pmatrix} \frac{\widehat{Z} - \widehat{K} \widehat{Z}^{-1} \widehat{K}}{2} & \widehat{K} \widehat{Z}^{-1} \\ -\widehat{Z}^{-1} \widehat{K} & 2\widehat{Z}^{-1} \end{pmatrix},$$

где $\widehat{Z} = (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} - \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C})$, $\widehat{K} = (\widehat{A}_X \widehat{S}_X^{-1} \widehat{C} + \widehat{A}_Y \widehat{S}_Y^{-1} \widehat{C} - 2\widehat{E})$.

Связь амплитуд на входе узкого волновода и его выходе определяются формулой

$$\begin{pmatrix} \vec{A}^1 \\ \overrightarrow{BE}^1 \end{pmatrix} = \widehat{L}_1 \widehat{T}_1 \widehat{L}_2 \widehat{T}_2 \dots \widehat{L}_M \widehat{T}_M \widehat{L}_{M+1} \begin{pmatrix} \overrightarrow{AE}^{M+1} \\ \vec{B}^{M+1} \end{pmatrix},$$

где $\widehat{L}_i = \begin{pmatrix} \widehat{L}_{Ai} & \widehat{0} \\ \widehat{0} & \widehat{L}_{Bi} \end{pmatrix}$ матрица участка запредельного полого волновода длиной l_i , $i = 1, 2, 3, \dots, M + 1$, а матрицы $(\widehat{L}_{Ai})_{mm'} = e^{-j\gamma_m l_i} \delta_{mm'}$ и $(\widehat{L}_{Bi})_{mm'} = e^{j\gamma_m l_i} \delta_{mm'}$ – диагональные квадратные матрицы.

Формула определяет матрицу передачи запредельного волновода, объединив ее с матрицами передачи скачков на входе и выходе, определим полную матрицу передачи всей структуры в целом, а затем и коэффициенты отражения и прохождения необходимых волн широкого волновода. На основе полученной матрицы передачи произведены расчеты АЧХ однозвенного фильтра, которые верифицировались с подтвержденными экспериментально приближенными зависимостями [6 – 10], как видим, они совпадают с графической степенью точности (рис. 2).

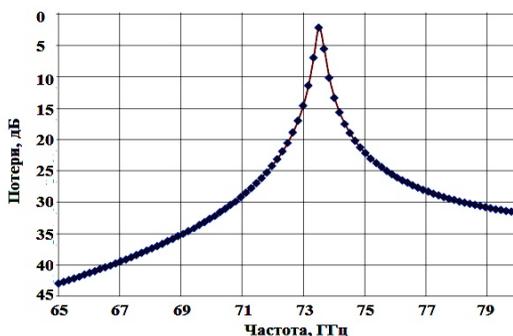


Рис. 2. Сравнительные амплитудно-частотные характеристики, сплошная линия – известный расчет; ♦♦♦♦ – расчет с помощью матрицы передачи

Выводы. На основе методов частичных областей и обобщенной матрицы рассеяния построена электродинамическая модель конструкции СВЧ-фильтра с волноводно-диэлектрическим резонатором, частично заполняющим прямоугольный волновод по ширине. Данная модель позволяет учесть счетное число мод. Расчетные зависимости хорошо согласуются с известными, что свидетельствует о корректности приведенных математических выражений и численного алгоритма.

Список литературы: 1. Xiao Shao-Qiu Millimeter wave technology in wireless PAN, LAN, and MAN / Xiao Shao-Qiu et al. CRC Press, 2008. – 448 с. 2. IEEE Std 802.15.3c-2009. Wireless

Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension. – IEEE, 12 October 2009. **3.** IEEE Std 802.15.3 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE, 29 September 2003. **4.** Коробкин В.А. Высокодобротный волноводно-диэлектрический резонатор / В.А. Коробкин, В.Я. Двадненко, В.Н. Великоцкий, С.В. Екимов. – В кн.: Проектирование радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах. Тезисы докл. и сообщений Всесоюзн. научно-технич. конф. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1983. – С. 64. **5.** Пат. Российской Федерации № 2014674 / А.Г. Ющенко и др. – Оpubл. Б.И., 1994. – № 11. **6.** Yushchenko A.G. Intellectual CAD for Three-Tier Wide Band WDR Filters / A.G. Yushchenko, D.B. Mamedov, D.M. Zaytsev – Int. on-line jour. Wireless Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 3. – № 1. **7.** Yushchenko A.G. Comparative Characteristics of Bandpass Filters Based on WDR and Microstrip Resonators / A.G. Yushchenko, D.B. Mamedov. – IEEE. – 2012. – № 2. – С. 7-10. **8.** Yushchenko A.G. Ultra-wideband five-tier LM-mode filters optimized with knowledge-based CAD system / A.G. Yushchenko, D.B. Mamedov. – Вестник НТУ "ХПИ". – 2013. – № 27. – С. 169-179. **9.** Бергер М.Н. Прямоугольные волноводы с диэлектриком / М.Н. Бергер, Б.Ю. Каплевич – М.: Сов.радио, 1973. – 256 с. **10.** Каплевич Б.Ю. Волноводные диэлектрические фильтры / Б.Ю. Каплевич. – М.: Связь, 1980. – 136 с. **11.** Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 160 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Xiao Shao-Qiu Millimeter wave technology in wireless PAN, LAN, and MAN / Xiao Shao-Qiu et al. CRC Press, 2008. – 448 s. **2.** IEEE Std 802.15.3c-2009. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension. – IEEE, 12 October 2009. **3.** IEEE Std 802.15.3 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE, 29 September 2003. **4.** Korobkin V.A. Vysokodobrotnyj volnovodno-dielektricheskiy rezonator / V.A. Korobkin, V.A. Dvadnenko, V.N. Velikockij, S.B. Ekimov. – V kn.: Proektirovanie radioelektronnyh ustrojstv na dijelektricheskih volnovodah i rezonatorah. Tezisy dokl. i soobshhenij Vsesojuzn. nauchno-tehnich. konf. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo un-ta, 1983. – S. 64. **5.** Pat. Rossijskoj federacii № 2014674 / A.G. Jushhenko i dr. – Opubl. B.I., 1994. – № 11. **6.** Yushchenko A.G. Intellectual CAD for Three-Tier Wide Band WDR Filters / A.G. Yushchenko, D.B. Mamedov, D.M. Zaytsev. – Int. on-line jour. Wireless Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 3. – № 1. **7.** Yushchenko A.G. Comparative Characteristics of Bandpass Filters Based on WDR and Microstrip Resonators / A.G. Yushchenko, D.B. Mamedov. – IEEE. – 2012. – № 2. – S. 7-10. **8.** Yushchenko A.G. Ultra-wideband five-tier LM-mode filters optimized with knowledge-based CAD system / A.G. Yushchenko, D.B. Mamedov. – Vestnik NTU "HPI". – 2013. – № 27. – S. 169-179. **9.** Berger M.N. Prjamougol'nye volnovody s dijelektrikom / M.N. Berger, B.Ju. Kapilevich. – M.: Sov.radio, 1973. – 256 s. **10.** Kapilevich B.Ju. Volnovodnye dijelektricheskie fil'try / B.Ju. Kapilevich. – M.: Svjaz', 1980. – 136 s. **11.** Nikol'skij V.V. Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln / V.V. Nikol'skij, T.I. Nikol'skaja. – M.: Nauka, 1989. – 160 s.

Поступила (received) 07.04.2014

Статью представил д-р физ-мат. наук, проф. НТУ "ХПИ" Яковенко И.В.

Dovlet Mamedov, Post Graduate Student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (097)-612-21-23, e-mail: m.davlet@hotmail.com
ORCID ID: 0000-0002-8461-7192

Alexander G. Yushchenko, Cand.Sci.Tech, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057)-707-66-18, e-mail: agyu@kpi.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0002-0078-3450

УДК 621.3

В.И. НОСКОВ, д-р техн. наук, профессор, НТУ "ХПИ",
Н.В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
Г.В. ГЕЙКО, ст. преп., НТУ "ХПИ"

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ БОКСОВАНИЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА

Предлагается модель для проведения исследования системы обнаружения и защиты от боксования тягового асинхронного привода дизель-поезда. Выполнена разработка структурной схемы модели, описана работа системы обнаружения и защиты от боксования. Приводятся результаты имитационного моделирования, подтверждающие правильность разработанной модели. Ил.: 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: боксование, тяговый асинхронный привод, имитационное моделирование, система обнаружения и защиты от боксования.

Постановка проблемы и анализ литературы. Как известно, потери энергии, расходуемой на тягу поездов, при работе на предельных условиях сцепления колеса с рельсом, составляют 10 – 30%. Для обеспечения высоких тяговых свойств локомотива, исключения потерь энергии и повышенного износа бандажей колёсных пар при боксовании, необходимо в процессе движения постоянно контролировать и иметь возможность регулировать сцепление колеса с рельсом. Эта проблема актуальна для локомотивов с электроприводами, использующими как тяговые электродвигатели постоянного тока, так и асинхронные тяговые двигатели [1, 2].

В настоящее время, в связи с резким подорожанием энергоносителей, требования к противобоксовочным системам изменились. Вместо ограничения скорости скольжения колеса относительно рельса (после его выявления) теперь требуется поддержание такой его величины, при которой реализуется максимально возможная по условиям сцепления сила тяги. Это представляет собой достаточно сложную задачу, т.к. на этот процесс существенно влияет целый ряд внешних факторов, таких как температура и погодные условия, состояние рельсов и др. Существующие системы управления включают в себя устройства обнаружения боксования и подавления его развития, с этой целью используются различные средства, которые повышают коэффициент сцепления: механическая и химическая очистка рельсов, очистка рельсов источниками высокой энергии, подсыпка песка,

кратковременное снижение силы тяги, приложение на короткое время тормозной силы [3, 4].

Для обнаружения боксования существует ряд способов, основанных на измерении: разности скоростей вращения колесных пар, разности токов (напряжений) тяговых двигателей, механических колебаний (вибраций) тяговых осей моторно-колесного блока. Однако, необходимо отметить, что процесс боксования требует дальнейшего изучения и в настоящее время нет такого метода, который бы не имел недостатков [5, 6]. Например, повышение чувствительности устройств обнаружения боксования приводит к ложным срабатываниям, а понижение чувствительности приводит к неспособности распознать начавшийся процесс боксования. Поэтому разработка модели, позволяющей проводить исследования тягового электропривода с целью построения наиболее приемлемой системы обнаружения и подавления боксования, является актуальной задачей [8].

Целью статьи является разработка модели системы обнаружения и защиты от боксования на тяговом асинхронном электроприводе.

На рис. 1 приведена структурная схема разработанной модели для исследования боксования.

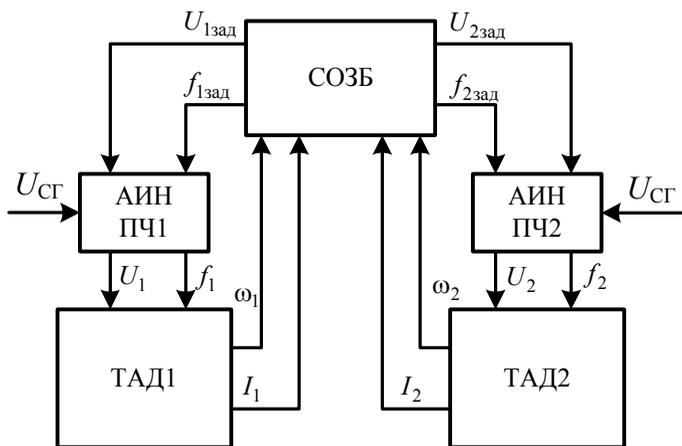


Рис. 1. Структурная схема разработанной модели для исследования боксования

Здесь приведены следующие обозначения: СОЗБ – система обнаружения и защиты от боксования; АИН ПЧ – автономный инвертор

напряжения – преобразователь частоты; ТАД – тяговый асинхронный двигатель; U_i, f_i ($i = \overline{1,2}$) – соответственно напряжение и частота питания i -го двигателя; ω_i, I_i ($i = \overline{1,2}$) – соответственно частота вращения ротора и ток, протекающий в обмотках статора i -го двигателя, $U_{\text{СГ}}$ – напряжение на выходе синхронного генератора.

В качестве модели ТАД использовалась известная математическая модель тягового асинхронного привода с учетом общеизвестных допущений, представленная в неподвижной системе координат $(\alpha, \beta, 0)$ и выраженная через токи следующим образом [9]:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\alpha} - \gamma i_{s\alpha} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\alpha} + p\beta\omega\Psi_{r\beta}; \quad (1)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\beta} - \gamma i_{s\beta} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\beta} + p\beta\omega\Psi_{r\alpha}; \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{\Psi_{r\alpha}}{T_r} - p\omega\Psi_{r\beta}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} - p\omega\Psi_{r\alpha}; \quad (4)$$

$$M = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_r} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}); \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M^* - M_c), \quad (6)$$

где $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ – соответственно проекции тока статора на оси α и β ; t – время; $\sigma = 1 - k_s k_r = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ – полный коэффициент рассеивания; L_m, L_s, L_r – соответственно взаимная индуктивность, индуктивность статора и ротора; $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$ – соответственно проекции напряжения статора на оси α и β ; $\gamma = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}$; R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора; $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постоянная времени ротора; p – число пар полюсов; $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ – соответственно проекции потокосцеплений ротора на оси α и β ; ω – частота вращения ротора; J – приведенный момент инерции двигателя; M – электромагнитный момент

одного двигателя; M^* – суммарный момент двух двигателей (одна головка дизель-поезда); M_c – момент сопротивления движению.

В блоке СОБЗ (рис. 1) для обнаружения боксования выполняются следующие операции: вычисляются разницы частот вращения тяговых двигателей (колесных пар), а также потребляемых токов каждым из двигателей; кроме этого, рассчитываются значения производных частот вращения и потребляемых токов. При обнаружении боксования система удерживает напряжение питания ТАД на уровне, которой соответствовал моменту обнаружения боксования.

На рис. 2 приведены зависимости частот вращения небоксующей колесной пары (ω_1) и боксующих колесных пар с учетом воздействия (ω_2) и без учета воздействия (ω_3) системы защиты от боксования. В момент времени $t = 5$ с была смоделирована ситуация потери сцепления второй колесной пары (ω_2). Система защиты отреагировала соответствующим ограничением роста частоты и амплитуды питающего напряжения ТАД боксующей колесной пары (U_2). Как видно из рис. 2, частоты вращения первой и второй колесных пар практически не отличаются, что свидетельствует о правильности работы системы защиты от боксования.

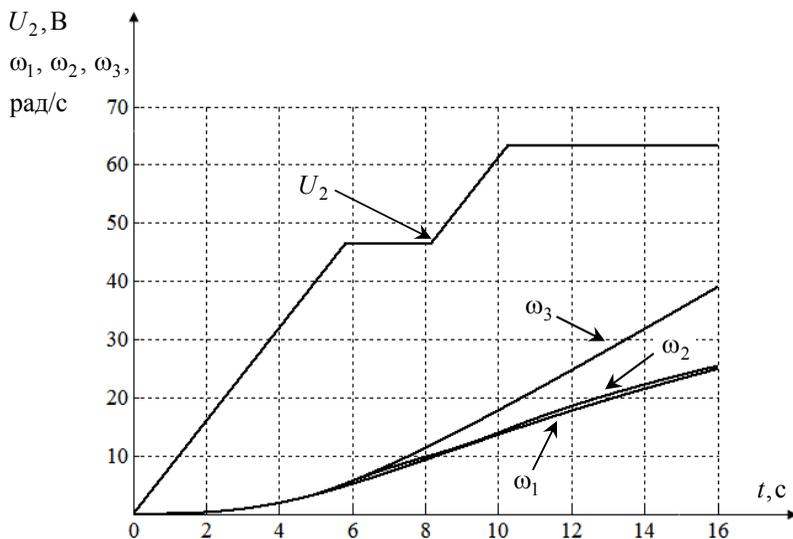


Рис. 2. Результат моделирования процесса боксования

Выводы. Разработана математическая модель, которая обладает универсальностью и позволяет проводить исследования асинхронного тягового электропривода при различных видах боксования колесных пар. Данная модель была использована при создании системы управления асинхронным тяговым приводом дизель-поезда ДЭЛ-02.

Список литературы: 1. *Воробьев А.А.* Исследование напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса / *А.А. Воробьев, П.Г. Сорокин* // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск: БГИТА. – 2004. – С. 8-18. 2. *Федяева Г.А.* Управление тяговым электроприводом на пределе по сцеплению колёс с рельсами и подавление фрикционных автоколебаний / *Г.А. Федяева, С.Ю. Матюшков, Г.В. Роговцев, А.Н. Тарасов* // Вісник СНУ ім. В. Дая. – 2011. – № 4 (158). – С. 31-35. 3. *Фролов А.В.* Повышение тяговых свойств тепловозов / *А.В. Фролов* // Известия ПГУПС. Исторические аспекты науки и техники. – 2011. – № 1. – С. 391-402. 4. *Самме Г.В.* Новые результаты в теории сцепления локомотива / *Г.В. Самме* // Транспорт Российской Федерации. Подвижной состав. – 2010. – № 3 (28). – С. 14-16. 5. *Polach O.* Influence of Locomotive Tractive Effort on the Forces Between Wheel and Rail / *O. Polach* // Vehicle System Dynamics Supplement. – 2001. – Vol. 35. – P. 7-22. 6. *Pichlik P.* Overview of Slip Control Methods Used in Locomotives / *P. Pichlik, J. Zdenek* // Transactions on Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 3. – № 2. – P. 38-43. 7. *Артемченко А.Н.* Система автоматического выравнивания нагрузки тягового электропривода карьерного электровоза / *А.Н. Артемченко* // Електромеханічні системи та автоматизація. Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – 2010. – Вип. 4 (63). – С. 56-58. 8. *Ляпушкин Н.Н.* Моделирование процесса сцепления колеса локомотива с рельсом / *Н.Н. Ляпушкин, А.Н. Савоськин, А.А. Чучин* // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 6 (31). – С. 50-53. 9. *Сандлер А.С.* Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / *А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов.* – М.: Энергия. – 1974. – 328 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Vorob'ev A.A.* Issledovanie naprjzhenного sostojanija pjatna kontakta kolesa i rel'sa / *A.A. Vorob'ev, P.G. Sorokin* // Noveye materialy i tehnologii v mashinostroenii. – Brjansk: BGITA. – 2004. – S. 8-18. 2. *Fedjaeva G.A.* Upravlenie t'jagovym jelektroprivodom na predele po scepneniju koljos s rel'sami i podavlenie frikcionnyh avtokolebanij / *G.A. Fedjaeva, S.Ju. Matjushkov, G.V. Rogovcev, A.N. Tarasov* // Visnik SNU im. V. Dalja. – 2011. – № 4 (158). – S. 31-35. 3. *Frolov A.V.* Povyshenie t'jagovyh svojstv teplovozov / *A.V. Frolov* // Izvestija PGUPS. Istoricheskie aspekty nauki i tehniki. – 2011. – № 1. – S. 391-402. 4. *Samme G.V.* Noveye rezul'taty v teorii scepnenija lokomotiva / *G.V. Samme* // Transport Rossijskoj federacii. Podvizhnoj sostav. – 2010. – № 3 (28). – S. 14-16. 5. *Polach O.* Influence of Locomotive Tractive Effort on the Forces Between Wheel and Rail / *O. Polach* // Vehicle System Dynamics Supplement. – 2001. – Vol. 35. – S. 7-22. 6. *Pichlik P.* Overview of Slip Control Methods Used in Locomotives / *P. Pichlik, J. Zdenek* // Transactions on Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 3. – № 2. – S. 38-43. 7. *Artemenko A.N.* Sistema atomaticheskogo vyravnivanija nagruzki t'jagovogo jelektroprivoda kar'ernogo jelektrovoza / *A.N. Artemenko* // Elektromehanichni sistemi ta avtomatizacija. Visnik KDU im. M. Ostrogradskogo. – 2010. – Vip. 4 (63). – S. 56-58. 8. *Ljapushkin N.N.* Modelirovanie processa scepnenija kolesa lokomotiva s rel'som / *N.N. Ljapushkin, A.N. Savos'kin, A.A. Chuchin* // Transport Rossijskoj federacii. – 2010. – № 6 (31). – S. 50-53. 9. *Sandler A.S.* Avtomaticheskoe chastotnoe upravlenie asinhronnymi dvigateljami / *A.S. Sandler, R.S. Sarbatov.* – М.: Jenergija. – 1974. – 328 s.

Поступила (received) 19.12.2014

*Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ"
Дмитриенко В.Д.*

Noskov Valentin, Dr.Sci.Tech, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (067) 421-44-66, e-mail: val1942@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-7879-0706

Mezentsev Nikolay, Cand.Sci.Tech, Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel. (098) 859-88-98, e-mail: besitzer@i.ua
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

Gejko Gennadij, Senior Lecturer
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel. (098) 929-85-28, e-mail: e2901@rambler.ru
ORCID ID: 0000-0001-6958-8306

УДК 519.873

А.І. СІДЛЯРЕНКО, асп., Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У ДОРОЖНЬОМУ ПОКРИТТІ ТА ПРИДОРОЖНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

Подолання проблеми якості дорожнього покриття можливе за умов системного впровадження засобів та методів моніторингу та контролю його стану. Запропоновано математичну модель задачі оптимізації комплексу методів неруйнівного контролю для виявлення дефектів (пошкоджень) у дорожньому покритті та придорожній інфраструктурі. Лл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: комплекс методів неруйнівного контролю, дорожнє покриття, придорожня інфраструктура, оптимізація.

Постановка проблеми та аналіз літератури. Транспорт, транспортні артерії та придорожня інфраструктура в розвинених країнах світу, як відомо, відноситься до так званої критичної інфраструктури держави [1, 2]. Проблемами забезпечення нормального функціонування транспортної критичної інфраструктури є безпека на транспорті, безпека руху на магістральних дорогах та мінімізація дорожньо-транспортних пригод (ДТП), забезпечення якості дорожнього полотна та стабільної пропускної спроможності доріг, інформатизація транспортних коридорів та мереж автомобільних доріг різного призначення. Однією з пріоритетних задач державної цільової програми розвитку автомобільного транспорту визначається будівництво придорожньої інфраструктури, підвищення якості автомобільних доріг та забезпечення безпеки руху [3]. Підвищення рівня безпеки за рахунок подолання проблеми якості дорожнього покриття можливе за умов системного впровадження засобів та методів моніторингу та контролю його стану, своєчасного ремонту автодорожнього покриття та споруд придорожньої інфраструктури, інформаційного супроводження процесів підтримки та прийняття раціональних управлінських рішень [4 – 6].

Роботи науковців в основному направлені на дослідження проблеми неруйнівного контролю одним методом або однією групою методів [4, 7 – 10]. Наприклад в [7] пропонується використовувати для неруйнівного контролю модуль пружності, товщини та якості ущільнення асфальтобетонного шару, метод спектрального аналізу поверхневих

хвиль. В якості інформативної характеристики за цим методом використовують параметри розповсюдження поверхневої хвилі Релея, що генерується під дією тестового імпульсного навантаження.

В роботі [9] розглянуто динамічні моделі коливання дорожнього одягу. Досліджено можливість оцінки динамічного модуля конструкції дороги у формі необмеженої смуги на пружній основі. Представлена діагностична таблиця, що встановлює зв'язок модуля конструкції і пружних переміщень під дією рухомого автотранспорту.

Отже, можна зробити висновок, що використання окремих методів неруйнівного контролю (МНК) дає певні результати виявлення окремих пошкоджень, із своїми перевагами та недоліками [5, 11], які можуть не відповідати дійсному стану об'єкта дослідження через не повне відображення наявних пошкоджень. Разом з тим, наприклад, застосування методів візуального контролю для дорожнього покриття дає можливість оперативно виявити поверхневі пошкодження, але не дозволяє визначити руйнування чи деформацію нижніх шарів дорожнього одягу, що може стати причиною необ'єктивного аналізу ділянки дороги, а результати усунення таких пошкоджень швидко будуть знівельовані та повернуть ділянку до попереднього стану або погіршать.

Одночасне застосування різних за своєю природою МНК, як показує практика їх використання при дослідженні складних систем, дає можливість значно прискорити та підвищити ймовірність виявлення дефектів, отримати повну та об'єктивну інформацію про експлуатаційний стан і ступінь відповідності фактичного стану об'єкта контролю, його параметрів і характеристик вимогам безпеки руху. МНК дозволяють досліджувати стан елементів дорожньої інфраструктури, не виводячи їх з експлуатації, а накопичені статистичні дані по виявлених пошкодженнях використані при усуненні пошкоджень та можливих помилок при повторному проведенні контролю [5, 11, 12].

Питання інформатизації використання МНК в дорожньому господарстві набуває особливої актуальності завдяки Державній науково-технічній програмі "Ресурс" № 1331 [13] та визначеним Наказом Мінрегіонбуду України порядком проведення технічного обстеження будівельних конструкцій та інженерних мереж [14].

В роботі пропонується комплексувати різнотипні МНК, наприклад такі як ґрунтопроникаючий радар, метод ультразвукових хвиль, ударного імпульсу, метод відриву зі сколюванням та ін., для визначення оптимального комплексу МНК.

Мета статті – розробити математичну оптимізаційну модель комплексування різнотипних МНК для виявлення комбінацій пошкоджень у дорожніх покриттях та придорожній інфраструктурі.

Постановка задачі формування комплексу різнотипних МНК.

Нехай $H = \{h_i, i \in I = \{1, 2, \dots, i^*\}\}$ – скінчена множина типів пошкоджень (дефектів), які можливі на ділянках дорожнього покриття та елементах дорожньої інфраструктури (міст, шляхопровід, тунель тощо), де I – множина індексів типів пошкоджень. Пошкодження $h_i \in H$ характеризуються різними показниками такими, як, наприклад, геометричні показники (глибина та довжина тріщини, рівність дорожнього одягу), важкість усунення, можливість скоєння ДТП та ін. [5].

Для діагностики пошкоджень $h_i \in H$ використовуються різні МНК або їх типи (способи реалізації МНК), які характеризуються різними ймовірностями виявлення пошкоджень та витрат ресурсів. Наприклад, якість проведення візуального контролю залежить від рівня підготовки спеціалістів, які можуть оцінити ступінь пошкоженості верхнього шару дорожнього покриття, нерівності дорожнього покриття та елементів конструкцій штучних споруд, якість асфальтобетону та ін. Такий МНК можна вважати найоперативнішим та найдешевшим порівняно з іншими, які потребують тривалих лабораторних досліджень та коштовної спецтехніки. Ще одним типом буде моніторинг стану дорожнього покриття та елементів дорожньої інфраструктури за допомогою космічних систем, але він також потребує додаткового технічного оснащення та навчання персоналу.

Позначимо $M_j = \{m_{jk}\}$ – множину МНК j -го типу, де $j \in J$ – множина індексів типів МНК, $k \in K_j \subseteq K$ – множина індексів модифікацій (способів реалізації) типів МНК. На рис. 1. зображена спрощена схема взаємозв'язку різнотипних МНК для виявлення деякого пошкодження $h_i \in H$.

Позначимо $p(m_{jk})$ – апіорне значення ймовірності виявлення пошкодження методом m_{jk} . Значення ймовірностей $p(m_{jk})$ виявлення різних типів пошкоджень задаються в технічній документації приладів, визначаються на основі експериментальних досліджень, або відомі з аналогічних досліджень. Множина R_i альтернативних технологій

виявлення пошкодження $h_i \in H$, $i \in I$ комплексом МНК задається наступним чином:

$$R_i = \{r_i^1 = \{j_1^1, \dots, j_{s_1}^1\}, \dots, r_i^{r_i} = \{j_1^{r_i}, \dots, j_{s_{r_i}}^{r_i}\}\},$$

$$j_1^1, \dots, j_{s_1}^1, \dots, j_1^{r_i}, \dots, j_{s_{r_i}}^{r_i} \in J_i,$$

де елементами множини R_i є сполучення індексів $j_1, \dots, j_s \in J_i \subseteq J$ множин M_{j_1}, \dots, M_{j_s} різнотипних МНК, які задають фіксовану технологію виявлення пошкоджень. Таким чином, сполучення $r_i = \{j_1, \dots, j_s\} \in R_i$ – це фіксована технологія виявлення пошкодження $h_i \in H$, в якій задіяні певні типи МНК, і яка враховує як специфіку ділянки, яка досліджується, так і прилади, які застосовуються для проведення неруйнівного контролю та можливості їх спільного використання.

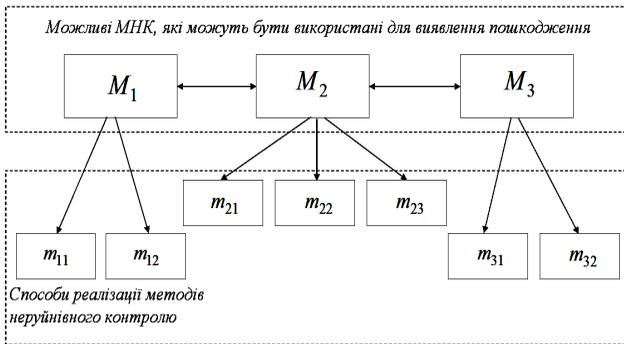


Рис. 1. Схема способу побудови комплексу МНК

Кожна технологія $r_i \in R_i$ представляється можливими варіантами типів МНК (комплексом МНК) $v_{r_i} = (m_{j_1 k}^i, \dots, m_{j_s k}^i) \equiv (m_{jk})_{j \in r_i}$, який застосовується для виявлення пошкодження $h_i \in H$.

Множина $V_{r_i} = \prod_{j \in r_i} M_j$ – множина можливих варіантів v_{r_i} реалізації технології $r_i \in R_i$; $V_i = \bigcup_{r_i \in R_i} V_{r_i}$ – множина всіх альтернативних

комплексів МНК для виявлення пошкодження $h_i \in H$; $V = \prod_{i \in I} V_i$ – множина альтернативних комплексів МНК $v = (v_{r_1}, \dots, v_{r_i}, \dots, v_{r_*}) \equiv (v_{r_i})_{i \in I}$, $v_{r_i} \in V_i, i \in I$, $v \in V = \prod_{i \in I} V_i$ для виявлення всіх пошкоджень $h_i \in H$.

Імовірність невиникнення аварійної ситуації в об'єктах контролю після виявлення і усунення пошкодження $h_i \in H$ визначається так [15]

$$P_i(p(v_{r_i})) = 1 - p(v_{r_i}), \quad (1)$$

де $p(v_{r_i}) = 1 - \prod_{j \in J_i} (1 - p(m_{jk}))$ – імовірність виявлення пошкодження $h_i \in H$ при застосуванні комплекту v_{r_i} для технології r_i .

Якщо розглядати задачу виявлення одночасно всіх пошкоджень з множини пошкоджень H і припустити, що $h_i \in H$ відомі та для їх виявлення використовуються різні комплекти $v_{r_i} \in V_i$, то (1) виглядатиме

$$P_H(v) = \prod_{i \in I} p(v_{r_i}). \quad (2)$$

Значення $P_H(v)$ є нижньою оцінкою імовірності виявлення множини пошкоджень H і може використовуватись як критерій при виборі МНК для одночасного виявлення всіх пошкоджень $h_i \in H$.

Нехай на реалізацію методів неруйнівного контролю (закупку приладів, розробку методології, навчання людей тощо) виділено кошти у розмірі C_0 , тоді задача формування комплексу МНК матиме вигляд:

$$P_H(v) = \prod_{i \in I} p(v_{r_i}) \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$C(v) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ji}(v_{r_i}) \leq C_0, \quad (4)$$

$$v \equiv (v_{r_i})_{i \in I}, v_{r_i} = (m_{j_1 k}^i, \dots, m_{j_s k}^i) \in V_i, k \in K_j \subseteq K, v \in V = \prod_{i \in I} V_i, \quad (5)$$

де c_{ji} – обсяг фінансування, що необхідний для реалізації варіанту v_{r_i} .

Задача (3) – (5) є задачею дискретного програмування з багатьма обмеженнями, для розв'язання якої можуть використовуватись алгоритми послідовного аналізу варіантів та наближені методи [16]. Результатом розв'язку задачі є комплекс різнотипних МНК

$v^* = (v_{r_1}^*, \dots, v_{r_i}^*, \dots, v_{r_s}^*)$, де $v_{r_i}^* = (m_{j_1 i}, \dots, m_{j_s i})$, значення ресурсів $C(v^*)$ та значення ймовірності $P_H(v^*)$.

Наприклад, розглянемо мостову конструкцію. Об'єктами, до яких будуть застосовані МНК будуть асфальтобетон, залізобетонні конструкції, місця сварки, інші складові. Для виявлення множини пошкоджень H в мостовій конструкції можемо використовувати радіохвильові МНК ($M_1 = \{m_{1k}\}$, $k \in K_1$), акустичні МНК ($M_2 = \{m_{2k}\}$, $k \in K_2$), методи радіоскопії ($M_3 = \{m_{3k}\}$, $k \in K_3$), методи візуального контролю ($M_4 = \{m_{4k}\}$, $k \in K_4$). Тоді у результаті розв'язку цієї задачі кожний комплект $v_{r_i}^*$ матиме вигляд $v_{r_i}^* = (m_{1k_1}, m_{2k_2}, m_{3k_3}, m_{4k_4})$, де $k_1 \in K_1 \subseteq K$, $k_2 \in K_2 \subseteq K$, $k_3 \in K_3 \subseteq K$, $k_4 \in K_4 \subseteq K$ – вибрані k -ті модифікації відповідних МНК для виявлення i -го дефекту.

Способи удосконалення моделі можуть бути отримані шляхом додаткової оцінки критичності дефектів та критичності частин конструкції, на якій застосовуються МНК, або шляхом спрощення вибору комплексу МНК для окремих частин конструкції, що не потребують комплексного підходу.

Висновки. Розглянута постановка задачі неруйнівного контролю полягає в виборі МНК у випадку, коли необхідно виявити одночасно всю множину пошкоджень H . Оцінкою якості виявлення пошкоджень є показник $P_H(v)$, який сформований у критерії (2).

Інформація про пошкодження та їх розташування є вхідними даними для баз даних та систем прийняття рішень інформаційного супроводження даних об'єктів.

Список літератури: 1. *Uniting and strengthening America by providing appropriate tools required to intercept and obstruct terrorism (USA PATRIOT ACT, 2001)*. – Режим доступу: <http://frwebgate.access.gpo.gov/> (27.02.13). – Назва з екрану. 2. *European programme for critical infrastructure protection (COM/2006/786 final)*. – Режим доступу: <http://eur-lex.europa.eu/> (05.03.13). – Назва з екрану. 3. *Прейгер Д.К.* Реалізація потенціалу транспортної інфраструктури України в стратегії посткризового економічного розвитку / Д.К. Прейгер, О.В. Собкевич, О.Ю. Ємельянова. – К.: НІСД, 2011. – 37 с. 4. *Семеген М.М.* Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках / М.М. Семеген, З.П. Лютак // *Методи та приклади контролю якості*. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – № 21 – С. 43-47. 5. *Non-destructive measurement of pavement layer thickness. Final report*. – California Department of transportation, 2003. – 108 р. 6. *Бірюков Д.С.* Розвиток і впровадження інформаційно-аналітичного забезпечення в сфері керування автодорожнім господарством регіонів / Д.С. Бірюков, В.А. Заславський, А.І. Сідлярченко // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – Луганськ, 2012. – № 8 (179). – Ч.2. – С. 10-16. 7. *Кішко І.В.* Контроль якості влаштування

асфальтобетонних шарів дорожнього одягу неруйнівним методом / *I.V. Кіяшко, Д.М. Новаковський, О.Ю. Пархоменко* // Автошляховик України. – 2009. – № 5. – С. 32-34.

8. *Овчинников С.Л.* Об обратной задаче волновой диагностики дорожных покрытий / *С.Л. Овчинников, С.Ю. Романов* // Труды международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2009). – ЮУрГУ, Челябинск, 2009 – С. 624-630.

9. *Кычкин В.И.* Неразрушающий динамический метод контроля дорожных одежд / *В.И. Кычкин, В.С. Юшков* // Интернет-журнал "Науковедение". – М.: 2013. – № 1 (14). – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/sbornik14/34tvn113.pdf>.

10. *Макачев А.Ю.* Оценка технического состояния улично-дорожной сети городов адеструктивными методами / *А.Ю. Макачев, Н.А. Луишиков* // Научно-технический сборник "Коммунальное хозяйство городов". Серия "Технические науки". – Харьков, 2003. – Вып.49. – С. 334-337.

11. *Неразрушающий контроль и диагностика.* Справочник / *Под ред. В.В. Клюева.* – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.

12. *Заславский В.А.* Роль и место методов неразрушающего контроля для обеспечения надежности и долговечности сложных систем с высокой ценой отказа / *В.А. Заславский, И.Н. Каденко* // Неразрушающий контроль. – 1999. – № 1. – С. 15-22.

13. *Постанова Кабінету Міністрів України від 08.10.2004 р. №1331* "Про затвердження Державної науково-технічної програми "Ресурс". – Режим доступа: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0830-11> (04.02.13). – Назва з екрану.

14. *Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства від 24.06.2011 р. №91* "Про затвердження Порядку прийняття в експлуатацію індивідуальних (садибних) житлових будинків, садових, дачних будинків, господарських (присадибних) будівель і споруд, прибудов до них, громадських будинків I та II категорій складності, які збудовані без дозволу на виконання будівельних робіт, і проведення технічного обстеження їх будівельних конструкцій та інженерних мереж". – Режим доступа: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0830-11> (06.03.13). – Назва з екрану.

15. *Девис Д.* Вычислительные сети и сетевые протоколы / *Д. Девис, Д. Барбер, Ч. Прайс, С. Соломодинес.* – М.: Мир, 1982. – 562 с.

16. *Волкович В.Л.* Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / *В.Л. Волкович, А.Ф. Волошин, В.А. Заславский, И.А. Ушаков.* – К.: Наук. думка, 1993. – 312 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Uniting and strengthening America by providing appropriate tools required to intercept and obstruct terrorism (USA PATRIOT ACT, 2001). – Rezhim dostupu: <http://frwebgate.access.gpo.gov/> (27.02.13). – Nazva z ekranu. **2.** European programme for critical infrastructure protection (COM/2006/786 final). – Rezhim dostupu: <http://eur-lex.europa.eu/> (05.03.13). – Nazva z ekranu. **3.** *Prejger D.K.* Realizacija potencialu transportnoї infrastrukturi Ukraini v strategii postkrizovogo ekonomichnogo rozvitku / *D.K. Prejger, O.V. Sobkevich, O.Ju. Emel'janova.* – K.: NISD, 2011. – 37 s. **4.** *Semegen M.M.* Vznachennja napruzhenno-deformovanogo stanu truboprovodiv na remontnih diljankah / *M.M. Semegen, Z.P. Ljutak* // Metodi ta prikladi kontrolju jakost i. – Ivano-Frankivs'k: IFNTUNG, 2008. – № 21 – S. 43-47. **5.** Non-destructive measurement of pavement layer thickness. Final report. – California Department of transportation, 2003. – 108 p. **6.** *Birjukov D.S.* Rozvitok i vprovadzhennja informacijno-analitičnogo zabezpečennja v sferi keruvannja avtodorozhnim gospodarstvom regioniv / *D.S. Birjukov, V.A. Zaslavsk'ij, A.I. Sidljarenko* // Visnik Shidnoukrains'kogo nacional'no universitetu imeni Volodimira Dalja. – Lugans'k, 2012. – № 8 (179). – Ch.2. – S. 10-16. **7.** *Kijashko I.V.* Kontrol' jakosti vlashtuvannja asfal'tobetonnih шарiv dorozhn'ogo одjagu nerujnivnim metodom / *I.V. Kijashko, D.M. Novakovskij, O.Ju. Parhomenko* // Avtoshljahovik Ukraini. – 2009. – № 5. – S. 32-34. **8.** *Овчинников С.Л.* Об обратной задаче волновой диагностики дорожных покрытий / *С.Л. Овчинников, С.Ю. Романов* // Труды международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2009). – ЮУрГУ, Челябинск, 2009 – С. 624-630. **9.** *Кычкин В.И.* Неразрушающий динамический метод контроля дорожных одежд / *В.И. Кычкин, В.С. Юшков* // Интернет-журнал

"Naukovedenie". – М.: 2013. – № 1 (14). – Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/sbornik14/34tvn113.pdf>. **10.** Makachev A.Ju. Ocenka tehničkog sostojanija ulično-dorožnoj seti gorodov adestruktivnymi metodami / A.Ju. Makachev, N.A. Lushnikov // Nauchno-tehnički sbornik "Kommunal'noe hozjajstvo gorodov". Serija "Tehničke nauki". – Har'kov, 2003. – Vyp.49. – S. 334-337. **11.** Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika. Spravochnik / Pod red. V.V. Kljueva. – М.: Mashinostroenie, 1995. – 488 s. **12.** Zaslavskij V.A. Rol' i mesto metodov nerazrushajushhego kontrolja dlja obespečenija nadežnosti i dolgovečnosti složnyh sistem s vysokoj cenoj otkaza / V.A. Zaslavskij, I.N. Kadenko // Nerazrushajushhij kontrol'. – 1999. – № 1. – S. 15-22. **13.** Postanova Kabinetu Ministriv Ukraїni vid 08.10.2004 r. № 1331 "Pro zatverdžennja Deržhavnoї nauko-ve tečničnoї programi "Resurs". – Rezhim dostupu: <http://uzakon.com/document/fpart61/idx61712.htm> (04.02.13). – Nazva z ekranu. **14.** Nakaz Ministerstva regional'nogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunal'nogo gospodarstva vid 24.06.2011 r. № 91 "Pro zatverdžennja Porjadku prijnattja v ekspluataciju individual'nih (sadibnih) zhitlovih budinkiv, sadovih, dachnih budinkiv, gospodars'kih (prisadibnih) budivel' i sporud, pribudov do nih, gromads'kih budinkiv I ta II kategorij skladnosti, jaki zbudovani bez dozvolu na vikonannja budivel'nih robot, i provedennja tehničnogo obstežennja ih budivel'nih konstrukcij ta inženernih mrežh". – Rezhim dostupu: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0830-11> (06.03.13). – Nazva z ekranu. **15.** Devis D. Vychislitel'nye seti i setevye protokoly / D. Devis, D. Barber, Ch. Prais, S. Solomodines. – М.: Mir, 1982. – 562 s. **16.** Volkovich V.L. Modeli i metody optimizacii nadežnosti složnyh sistem / V.L. Volkovich, A.F. Voloshin, V.A. Zaslavskij, I.A. Ushakov. – К.: Nauk. dumka, 1993. – 312 s.

Статью представил д-р техн. наук, проф. кафедри математичної інформатики Київського національного університету ім. Тараса Шевченка Заславський В.А.

Надійшла (received) 25.03.2014

Sidliarenko Andrii, Lead Engineer
Taras Shevchenko national university of Kyiv
Str. Volodymyrska, 60, Kyiv, Ukraine, 01601
Tel.: (050) 380-59-87, e-mail: sidljarenko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-5130-7657

УДК 537. 56

О.В. СТРОКАНЬ, канд. техн. наук, доц., Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь,

О.В. ДУБІНІНА, магістр, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ РОЗПОДІЛЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВІД'ЄМНИХ АЕРОНІВ В ПРИМІЩЕННЯХ З НАХИЛЕНОЮ ПЛОЩИННОЮ

Розглянуто закономірність розповсюдження від'ємних аероіонів від штучних джерел аероіонізації на нахилений площині, на основі яких розроблено алгоритм аналізу розподілення концентрації від'ємних аеронів в приміщеннях з нахиленою площиною. Відповідно до розробленого алгоритму створено програмний засіб, який направлений на автоматизацію розрахунку та побудови сприятливих для людини ізоліній концентрації від'ємних аероіонів відповідно до заданих параметрів приміщення. Іл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: алгоритм, програмний засіб, від'ємні аероіони, нахилена площина, розподілена концентрація від'ємних аеронів.

Постановка проблеми та аналіз літератури. Проблема очищення повітря і насичення його корисними від'ємними іонами у приміщеннях стає дедалі актуальнішою. Джерелом від'ємних аероіонів служать штучні джерела аероіонного випромінювання – іонізатори [1, 2]. Постає питання забезпечення заданого, відповідно Санітарним епідеміологічним нормам [3], рівня концентрації аероіонів у приміщенні, яке володіє нахиленою площиною [4]. Відомий спосіб проектування розміщення одного джерела аероіонів, який засновується на геометричному методі моделювання [1, 2, 5, 6]. Даний спосіб є мало ефективним, так як виконується вручну. У зв'язку з цим постає необхідність у розробці програмного продукту, який дав би змогу автоматизувати процес проектування.

Дослідженням розподілення концентрації від'ємних аероіонів у виробничих приміщеннях присвячено багато робіт відомих вчених [1, 2, 4 – 10]. Дослідження залежності концентрації аероіонів від відстані до іонізатора були проведені такими вченими, як А.Л. Чіжевський, С.Л. Кунгуров та іншими. Питанням проектування розміщення аероіонізаторів у виробничих приміщеннях присвячена порівняно невелика кількість наукових робіт [1, 2, 6], але зі зростанням інтересу до процесу іонізації повітря виробничих і побутових приміщень кількість робіт у цьому напрямку з кожним роком збільшується. Наукові результати, отримані в роботах Чуракова А.Я. і Строкань О.В. [1, 2, 5],

© О.В. Строкань, О.В. Дубинина, 2014

послужили основою для вирішення задачі вибору місця установки двох і більше джерел аероіонного випромінювання у приміщеннях, в яких наявна нахилена площина.

Мета статті – пропонується на основі отриманих практичних результатів дослідження розподілення концентрації аероіонів на відстані розробити програмне забезпечення для автоматизації розрахунку та побудови сприятливих для людини ізоліній концентрації від'ємних аероіонів відповідно до заданих параметрів приміщення.

Закономірність розповсюдження від'ємних аероіонів на нахиленій площині від штучних джерел аероіонного випромінювання. До приміщень з розрахунковою нахиленою площиною відносяться приміщення, в яких підлога має деякий кут нахилу до горизонтальної площини (рис. 1): Σ_1 – горизонтальна площина; Σ'_1 – похила площина; α – кут нахилу площини, відносно якої ведуться розрахунки (похила площина); N – центр аероіонізатора; A' – точка, інцидентна заданій ізолінії концентрації від'ємних аероіонів.

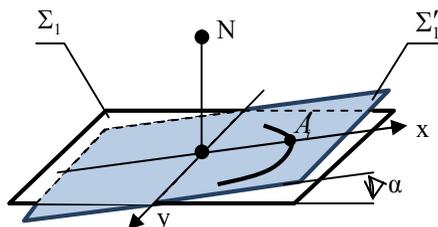


Рис. 1. Положення джерела аероіонного випромінювання і нахиленої площини

Враховуючи закон розподілення концентрації від'ємних аероіонів на горизонтальній площині від одного джерела аероіонного випромінювання [1, 2, 5] і кут нахилу α розрахункової площини, рівняння визначення величини концентрації аероіонів в точці, інцидентній заданій ізолінії концентрації аероіонів, має вигляд:

$$n' = \frac{1}{\alpha(r')^2 + b} 2^{-2x \operatorname{tg} \alpha}, \quad (1)$$

де n' – концентрація аероіонів в розрахунковій точці на нахиленій площині, іон/см³;

r' – відстань від джерела аероіонного випромінювання до розрахункової точки на нахиленій площині, м;

α – кут нахилу розрахункової площини відносно горизонтальної, $^{\circ}$;

x – координата проекції центру джерела аероіонного випромінювання на нахиленій площині, м;

a, b – постійні коефіцієнти.

Алгоритм автоматизації процесу проектування місця розташування джерел аероіонного випромінювання. З метою автоматизації розрахунків пропонується на базі математичних рівнянь розробити систему комп'ютерного аналізу розподілення концентрації від'ємних аероіонів від штучних джерел аероіонного випромінювання на нахиленій площині, яка дала би змогу видавати рекомендації щодо кількості джерел аероіонного випромінювання, які необхідно встановити у заданому приміщенні для досягнення нормованих показників аероіонного режиму. Рішення розглянутої проблеми передбачає розробку універсального методу визначення сумарної концентрації аероіонів від декількох джерел аероіонного випромінювання у розрахунковій точці на нахиленій площині. Також додатково до програмного продукту ставиться умова можливості виводу наочної картини розподілення зон аероіонного комфорту і дискомфорту.

Відповідно до встановлених вимог, алгоритм роботи автоматизації проектування розміщення джерел аероіонного випромінювання у приміщеннях з нахиленою площиною містить такі етапи. На першому етапі задаються параметри режиму аероіонізації (максимальне і мінімальне допустиме значення концентрації аероіонів), параметри робочого приміщення, а саме ширина, довжина, кут нахилу (у випадку горизонтальної площини кут нахилу дорівнює нулю) і параметри аероіонізатора (сила випромінювання, висота підвісу). Далі визначається значення концентрації аероіонів від одного джерела аероіонного випромінювання у найвіддаленішій від джерела точці. На наступному етапі відбувається порівняння поточних значень концентрації аероіонів в розрахунковій точці з нормованими показниками режиму аероіонізації. В залежності від отриманих результатів програма видає рекомендації про кількість джерел, які необхідно встановити у заданому приміщенні. Завершальним етапом є вивід на екран ізольованих концентрацій аероіонів, які відповідають граничним значенням концентрації від'ємних аероіонів.

Розробка програмного забезпечення. Враховуючи область дослідження, пропонується вирішити поставлену задачу за допомогою інтегрованого середовища розробки програмного забезпечення Delphi7 на мові програмування Delphi, яка відрізняється простотою, швидкістю і

ефективністю роботи. Delphi має один з найшвидших компіляторів, не потребує підключення додаткових бібліотек, надає зручний, легко розширюваний об'єктно-орієнтований інтерфейс до Windows.

Для зручності спочатку розроблено інтерфейс користувача, у якому розміщені необхідні компоненти, а саме: чотири комірки для вводу параметрів приміщення, рисунок для виводу ізоліній, комірка рекомендованої кількості джерел в залежності від площі приміщення та кнопку, при натисненні на яку буде отримано результат.

Результат роботи розробленого програмного забезпечення показаний на рис. 2. Як приклад, для розрахунку використані такі вхідні дані: ширина кімнати 6 м, довжина – 10 м, кут нахилу розрахункової площини 10^0 , висота підвісу джерела – 2 м. У правому вікні надається аероіонне розподілення у вигляді ізоліній концентрації аероіонів, яке відповідає вхідним параметрам. Відображені тільки ті ізолінії концентрації аероіонів, між якими знаходиться найсприятливіша робоча зона, згідно з санітарно-епідеміологічних норм [3].

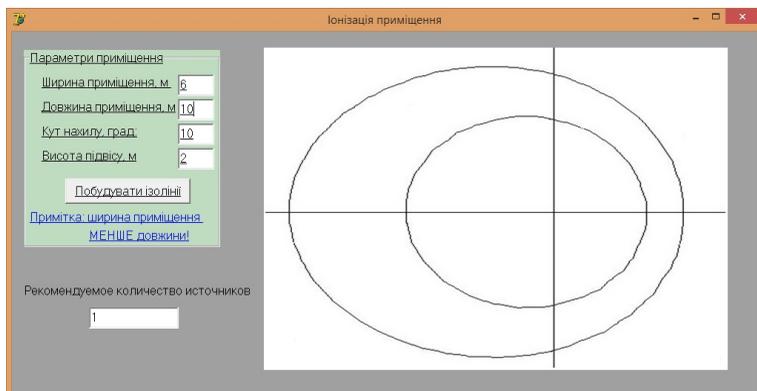


Рис. 2. Результат роботи програми у вигляді ізоліній концентрації від одного джерела

Якщо параметри приміщення не дозволяють встановити в ньому хоча б одне джерело, тобто відбувається перевищення значення концентрації аероіонів у розрахунковій точці вище допустимої норми, тоді програмний продукт видає відповідне повідомлення.

Подальшим кроком у розробці програмного забезпечення проектування розміщення джерел аероіонного випромінювання є розробка програмного модулю по визначенню координат місць

встановлення джерел при різноманітних геометричних формах приміщення.

Висновки. У результаті виконаної роботи був розроблений алгоритм проектування розміщення джерел аероіонного випромінювання у приміщеннях з нахилоною площиною, який дає змогу автоматизувати даний процес. На основі запропонованого алгоритму розроблене програмне забезпечення, яке дає змогу побудувати ізолінії концентрації від'ємних аероіонів відповідно до вхідних параметрів. Автоматизація процесу проектування дозволить значно підвищити ефективність проектування систем аероіонізації побутових і виробничих приміщень в цілому.

Список літератури: 1. *Строкань О.В.* Дослідження просторового розподілення аероіонів в робочій зоні дихання людини / *О.В. Строкань* // Наукові нотатки. Випуск 22 "Сучасні проблеми геометричного моделювання". – Частина 2. – Луцьк, 2008. – С. 338-343. 2. *Строкань О.В.* Побудова ізоліній від двох джерел аероіонів / *О.В. Строкань* // Праці ТДАТУ. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь, 2008. – Т. 37. – № 4. – С. 142-146. 3. Санитарно-гигиенические нормы допустимых уровней ионизации воздуха производственных и общественных помещений: СанПин № 2152-80. – [Введен в действие от 1980. 12.06]. – М.: Минюст РФ, 1980. – 7 с. 4. *Чураков А.Я.* Визначення ізоліній концентрації аероіонів на похилій площині / *А.Я. Чураков, О.В. Строкань, О.І. Морозова* // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь, 2011. – Т. 50. – С. 85-89. 5. *Чураков А.Я.* Проектування розташування джерел аероіонів в робочому просторі / *А.Я. Чураков, О.В. Івженко, О.В. Строкань* // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь, 2008. – Т. 38. – С. 86-88. 6. *Строкань О.В.* Геометричне моделювання процесу розподілення негативних аероіонів у закритому просторі: дисс.... канд. техн.наук: 05.01.01 / *Строкань Оксана Вікторівна.* – Мелітополь, 2010. – 172 с. 7. *Строкань О.В.* Оптимізація розміщення джерел аероіонного випромінювання / *О.В. Строкань* // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Т. 50. – С. 142-145. 8. *Krueger A.P.* Biological impact of small air ions / *A.P. Krueger // Reed // Science.* – 1976. – № 16. – P. 1209-1213. 9. *Loeb L.B.* Basic processes of gaseous electronics / *L.B. Loeb // Berkeley Ser., Los Angeles: Univ. Calif. Press.* – 1980. – P. 1020-1028. 10. *Misaki M.* Studies on the atmospheric ion spectrum. I: Procedures of experiments and data analysis / *M. Misaki // Pap. Meteorol. and Geophys.* – 1991. – № 3. – P. 247-260.

Bibliography (transliterated): 1. *Strokan O.V.* Doslidzhennya prostorovogo rozpodilennya aeroioniv v robochij zoni dihannya lyudin / *O.V. Strokan* // Naukovi notatki. Vipusk 22 "Suchasni problemi geometric modelyuvannya". – Part 2. – Lutsk, 2008. – S. 338-343. 2. *Strokan O.V.* Pobudova izolinij od dvoch jere aeroioniv / *O.V. Strokan* // Pratsi TDATU. Prikladnaja geometriya ta inzhenerna grafika. – Melitopol, 2008. – T. 37. – № 4. – S. 142-146. 3. Sanitarно-gigienichni norms dopustimih urovnij ionizacij vozduha proizvodstvennih i obshestvennih pomeshenij: SanPin № 2152-80. – [Vveden v dejstvje ot 1980. 12.06]. – M.: Minjust RF, 1980. – 7 s. 4. *Churakov A.J.* Vznachennya izolinij konsentratsii aeroioniv na pohilij ploschini / *A.Y. Churakov, O.V. Strokan, O.I. Morozova* // Prikladnaja geometriya ta inzhenerna grafika. – Melitopol, 2011. – T. 50. – S. 85-89. 5. *Churakov A.J.* Proektuvannya roztashuvannya Jerel aero ioniv v robochem prostori / *A.Y. Churakov, O.V. Ivzhenko, O.V. Strokan* // Prikladnaja geometriya ta inzhenerna grafika. – Melitopol, 2008. – T. 38. – S. 86-88. 6. *Strokan O.V.* Geometric modelyuvannya processes rozpodilennya negativny aeroioniv v zakritomu prostori: diss kand. Technical Sciences: 05.01.01

/ *Strokan Oksana Viktorivna.* – Melitopol, 2010. – 172 s. **7. Strokan O.V.** Optimizatsiya rozmischennya Jerel aeroionnogo viprominyuvannya / *O.V. Strokan* // Pratsi Tavriyskogo sovereign agrotehnologichnogo universitetu. – Melitopol: TDATU, 2011. – T. 50. – S. 142-145. **8. Krueger A.P.** Biological impact of small air ions / *A.P. Krueger* // *Reed – Science.* – 1976. – № 16. – S. 1209-1213. **9. Loeb L.B.** Basic processes of gaseous electronics / *L.B. Loeb* // Berkeley Ser., Los Angeles: Univ. Calif. Press. – 1980. – S. 1020-1028. **10. Misaki M.** Studies on the atmospheric ion spectrum. I: Procedures of experiments and data analysis / *M. Misaki* // *Pap. Meteorol. and Geophys.* – 1991. – № 3. – S. 247-260.

Надійшла (received) 10.11.2014

Статтю представив д-р техн. наук, проф. Мелітопольського державного педагогічного університету Найдіши А.В.

Strokan Oksana, Cand.Sci.Tech, Dotcent
Tavria State Agrotechnological Univercity
Str. B.Khmelnitckij, 18, Melitopol, Ukraine, 72318
Tel. (067)-58-159-47, e-mail: oksana.strokan@yandex.ua

Dubinina Helen, master
Tavria State Agrotechnological Univercity
Str. B.Khmelnitckij, 18, Melitopol, Ukraine, 72318
Tel. (098) 88 08 543, e-mail: alenushka_91@list.ru

УДК 001.89

С.Ф. ШЕВЧУК, канд. техн. наук, доц., ЧФ НТУ "ХПИ", Чернівці,

О.І. АРТЕМЕНКО, канд. техн. наук, доц., ПВНЗ "Буковинський університет", Чернівці,

Б.М. ГАЦЬ, канд. техн. наук, ст. викл., ПВНЗ "Буковинський університет", Чернівці

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МОДЕЛЮВАННЯ ТУРИСТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Запропонована структура інформаційних технологій для моделювання та аналізу процесів формування і розвитку окремих туристичних об'єктів, цілісних туристичних комплексів на регіональному та локальному рівнях. Розроблені інформаційні технології дають змогу проводити аналіз процесів започаткування та ведення туристичного бізнесу, використання природних та рекреаційних ресурсів відповідної території. Л.: 3. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: інформаційні технології, туристичні комплекси, туристичний бізнес, використання природних та рекреаційних ресурсів.

Вступ. Туризм є пріоритетною галуззю в Україні, про що свідчить схвалення Концепції Державної цільової програми розвитку туризму та курортів, метою якої є створення умов для збільшення потоку туристів, створення розвинутої туристичної інфраструктури шляхом раціонального використання туристичних ресурсів, що сприятиме збільшенню обсягу надходжень до бюджетів усіх рівнів від провадження туристичної діяльності.

Важливим інструментом підвищення ефективності туристично-рекреаційної галузі є впровадження сучасних інформаційних технологій (ІТ). Під інформаційною технологією зазвичай розуміють сукупність методів, процесів, програмно-технічних засобів, що об'єднуються в технологічний ланцюг для забезпечення збору, обробки, зберігання, передачі та відображення інформації [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Великі обсяги інформації, якими насичена туристична галузь зумовлюють необхідність використання ІТ для забезпечення якісного рівня управління. Такі ІТ для туризму можна поділити на класи, що представлені на рис. 1 [2].

На сьогодні інформаційне та програмне забезпечення туристичної галузі представлене, в основному, програмами для автоматизації обліку, діяльності туристичних фірм та готелів. Разом з тим відсутні комплексні

© С.Ф. Шевчук, О.І. Артеменко, Б.М. Гаць, 2014

інформаційні технології, спеціалізовані системи, програмні комплекси, призначені для вирішення задач прогнозування об'єктів туристичної інфраструктури та процесів туристичної галузі [3]. Вирішення такої задачі потребує створення комплексу інформаційних технологій, призначеного для моделювання та прогнозування просторового розвитку інфраструктури об'єктів туристичної галузі.



Рис. 1. Сфери застосування інформаційних технологій у туристичній галузі

Сучасні засоби аналізу територіального розміщення та моделювання просторового розвитку об'єктів базуються на використанні геоінформаційних технологій. Наприклад, в роботі [4] проводиться проектування системи моніторингу озер в урбанізованій місцевості. Також, в роботі [5] створюється система підтримки прийняття рішень на основі даних з геоінформаційної системи (ГІС). Створення та використання геоморфологічної цифрової бази даних описано в роботі [6]. Визначенню індексу, що характеризує ризик опустелювання земель присвячено роботу [7]. В ній ГІС використано як джерело даних, про склад і рельєф ґрунтів. В роботі [8] виконується імітаційне моделювання паводкових ситуацій в реальному часі: за допомогою World Wide Web виконується одержання та передача актуальних даних, далі іде їх обробка в ГІС та запуск імітаційної моделі. Результати моделювання представляються у вигляді карт, до яких також є доступ через WWW. Для прогнозування зміни рівня ґрунтових вод використовувались

функціональні можливості ГІС [9]. В роботі [10] ГІС є також джерелом даних для оцінки придатності земель. Результати дослідження рівня придатності території м. Мехіко візуалізуються за допомогою геоінформаційного картографування.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка комплексу ІТ, призначених для прогнозування та моделювання розвитку просторових характеристик туристичних об'єктів. Вирішення цієї задачі передбачає:

- автоматизацію створення моделей та методів прогнозування туристичних процесів;
- розробку моделей просторового розвитку для об'єктів туристичної інфраструктури;
- розробку ІТ моделювання туристичних комплексів.

Методи і засоби розробки інформаційних технологій моделювання туристичних комплексів. Всебічне охоплення потреб туристичної галузі вимагає розроблення ІТ на двох рівнях:

- локальному – для моделювання та аналізу процесів формування та розвитку окремих туристичних об'єктів;
- регіональному – для моделювання та аналізу процесів розвитку цілісних туристичних комплексів.

Розв'язання задачі прогнозування розвитку просторової форми інфраструктури об'єктів туристичної галузі полягає у використанні даних ГІС та побудові відповідних математичних моделей. Для цього вручну здійснюють вибірку даних або розробляють програмну надбудову над ГІС, що реалізує відбір та обробку даних. Проте таким чином практично неможливо вчасно, ефективно та комплексно розв'язати поставлену задачу. Для цього розроблено інформаційну технологію прогнозування розвитку інфраструктури (ІТПРІ) об'єктів туристичної галузі, яка інтегрує методи прогнозування просторових характеристик об'єктів туристичної інфраструктури, розширює аналітичні можливості для підготовки відповідних рішень, за рахунок проблемно-орієнтованої адаптації математичних моделюючих програмних пакетів з автоматизованим поданням геопросторових даних та їх опрацювання, що дозволяє забезпечити та реалізувати комплексний підхід у прийнятті відповідних рішень. ІТПРІ складається з наступних етапів:

1. Постановка задачі. Визначаються задачі та об'єкт прогнозування.
2. Відбір даних з ГІС, реалізований на основі розробленого алгоритму відбору та конвертації геопросторових даних.
3. Обробка даних.

4. Навчання гібридної нейромережі ANFIS, формування бази правил та систем нечіткого виводу.

5. Розрахунок просторового розподілу належності території до урбанізованої методом визначення ступеня належності території до урбанізованої.

6. Розрахунок по моделях на основі математичних фракталів та дифузії методом моделювання просторової форми інфраструктури туристичних містечок.

7. Графічне відображення результату моделювання [11].

Спільним вхідним параметром моделей на основі математичних фракталів та дифузії є матриця просторового розподілу належності території до урбанізованої. З ГІС при виборі об'єкту дослідження визначаються координати атракторів та обмеження. Додатково для кожної моделі визначаються значення емпіричних параметрів. Реалізація моделей фракталів відбувається за рахунок математичних фракталів, дифузії – на основі клітинних автоматів. Вихідним результатом є просторова форма інфраструктури об'єктів туристичної галузі.

Для аналізу перспектив розвитку туристичної інфраструктури регіону необхідно попередньо виявити наявність та оцінити якість рекреаційних ресурсів території. Основною характеристикою туристично-рекреаційного ресурсу, яка впливає на розвиток туристичної інфраструктури є його привабливість. Показник рекреаційної привабливості території представлено як лінгвістичну змінну $P = \text{"рекреаційна привабливість території"}$. Змінна визначається видами відпочинку та рекреації, які можна організувати та здійснити на даній території, яка залежать від кліматичних, географічних, історико-культурних умов та діяльності людини.

Загальний сезонний рівень рекреаційної привабливості територіальної одиниці – складається з привабливостей усіх елементарних ділянок, які належать даній території:

$$Pd_R(t) = L_R \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \begin{cases} P_{ij}(t), & G_{ij} \in R, \\ 0, & G_{ij} \notin R, \end{cases} \quad (1)$$

де L_R – чисельність населення R -ї адміністративно-територіальної одиниці (звичайна змінна); $P_{ij}(t)$ – показник рекреаційної привабливості території елементарної ділянки G_{ij} (звичайна змінна); R – територіальна одиниця (звичайна змінна); n – кількість елементарних ділянок, якою розбито досліджувану площу, по горизонталі (звичайна змінна); m –

відповідно, кількість елементарних ділянок по вертикалі (звичайна змінна).

Розроблена схема потоків даних, які використовуються інформаційною технологією моделювання просторового розвитку об'єктів туристичної інфраструктури для оцінювання рекреаційної привабливості території, наведена на рис. 2 [12].

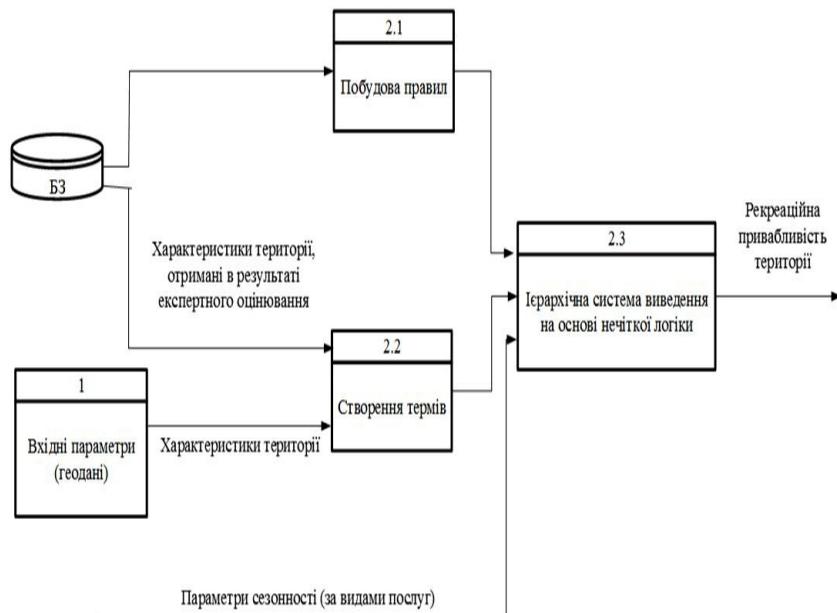


Рис. 2. Схема потоків даних задачі розрахунку рекреаційної привабливості

Рекреаційний потенціал території визначається максимальним рівнем туристичних послуг, які можна запропонувати на цій території. На рис. 3 показано схему потоків даних, що використовується розробленою інформаційною технологією моделювання просторового розвитку об'єктів туристичної інфраструктури для оцінювання рекреаційного потенціалу території.

Таким чином розроблена інформаційна технологія моделювання просторового розвитку туристичних комплексів, яка інтегрує розроблені методи оцінювання рекреаційної привабливості та рекреаційного потенціалу території, прогнозування розвитку інфраструктури об'єктів туристичної галузі.

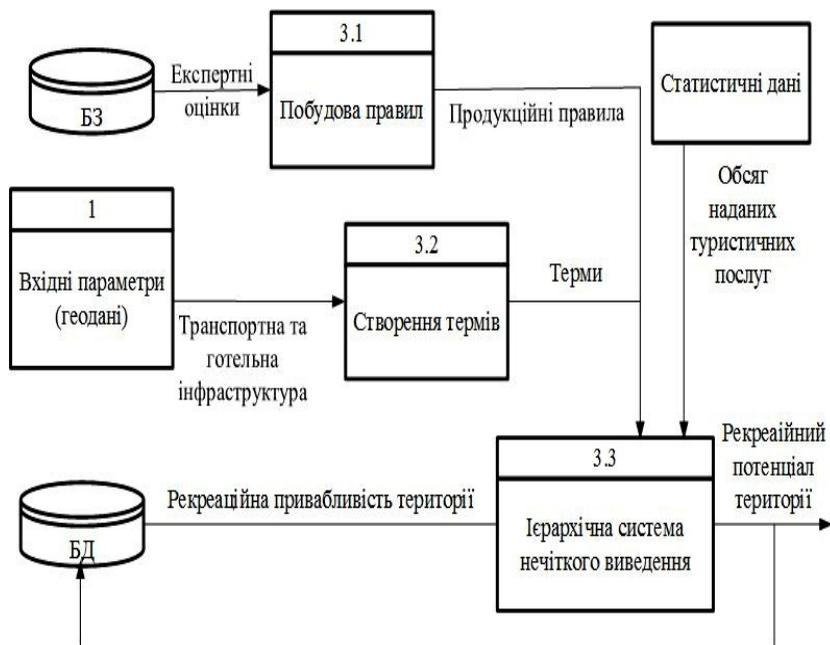


Рис. 3. Схема потоків даних задачі визначення рекреаційного потенціалу території

Висновки. Інформаційні технології моделювання туристичних комплексів дають можливість проводити аналіз процесів започаткування та ведення туристичного бізнесу, використання природних та рекреаційних ресурсів досліджуваної території, забезпечують можливість формування варіантів науково-обґрунтованих стратегій розвитку туристичної інфраструктури на регіональному рівні, розширюють науково-методичну базу дослідження туристичного ринку. Впровадження розроблених ІТ сприятиме розв'язанню задач розрахунку привабливості території для розвитку об'єктів інфраструктури, прогнозування динаміки розвитку просторової форми інфраструктури туристичних містечок, передбачення майбутніх сценаріїв розвитку регіону, які потрібні для потенційних інвесторів, органів державного управління з метою вироблення рекомендацій щодо розвитку туристичної галузі регіону в цілому.

Список літератури: 1. ГОСТ 34.003-90 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения / Государственный стандарт СССР, 1991. – 127 с. 2. Шаховська Н.Б. Організація побудови просторів даних туристичної сфери / Н.Б. Шаховська, Д.І. Угрин // Искусственный интеллект. – 2009. – № 2. – С. 82-90. 3. Вижлюк Я.І. Огляд сучасного стану інформаційного забезпечення функціонування туристичної галузі / Я.І. Вижлюк, Б.М. Гаць // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Інформаційні системи та мережі. – 2011. – № 715 – С. 59-68. 4. Yong Liu. An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe / Liu Yong, Lv Xiaojian, Qin Xiaosheng, Guo Huaicheng, Yu Yajuan, Wang Jinfeng, Mao Guozhu // Landscape and urban planning. – 2007. – № 82. – P. 233-246. 5. Soheil Boroushaki. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision making / Boroushaki Soheil, Malczewski Jacek // Computers and Geosciences. – 2010. – № 36. – P. 302-312. 6. Gustavsson Marcus Structure and contents of a new geomorphological GIS database linked to a geomorphological map. With an example from Liden, central Sweden / Marcus Gustavsson, C. Arie Seijmonsbergen, Else Kolstrup // Geomorphology. – 2008. – № 95 – P. 335-349. 7. Santini Monia A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index / Monia Santini, Gabriele Caccamo, Alberto Laurenti, Sergio Noce, Riccardo Valentini // Applied Geography. – 2010. – № 30. – P. 394-415. 8. Al-Sabhan W. A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW / W. Al-Sabhan, M. Mulligan, G.A. Blackburn // Computers, Environment and Urban Systems. – 2003. – № 27. – P. 9-32. 9. Dixon B. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis / B. Dixon // Journal of Hydrology. – 2005. – № 309. – P. 17-38. 10. Malczewski J. Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: Gis-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis / J. Malczewski // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2006. – № 8. – P. 270-277. 11. Вижлюк Я.І. Використання моделі клітинної урбанізації для прогнозування форми туристичних поселень / Я.І. Вижлюк, Б.М. Гаць // Відбір і обробка інформації. – 2011. – № 35 (111). – С. 122-127. 12. Артеменко О.І. Математичне моделювання рекреаційної привабливості території з використанням ієрархічної системи нечіткої логіки / О.І. Артеменко // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: Збірник науково-технічних праць.– Львів, 2011. – Вип. 21.05. – С. 345-351.

Bibliography (transliterated): 1. GOST 34.003-90 Informacionnye tehnologii. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Avtomatizirovannye sistemy. Termini i opredelenija / Gosudarstvennyj standart SSSR, 1991. – 127 s. 2. Shahov'ska N.B. Organizacija pobudovi prostoriv danih turistichnoï sferi / N.B. Shahov'ska, D.I. Ugrin // Iskustvennyj intellekt. – 2009. – № 2. – S. 82-90. 3. Vyljuk Ja.I. Ogljad suchasnogo stanu informacijnogo zabezpechnnja funkcionuvannja turistichnoï galuzi / Ja.I. Vyljuk, B.M. Gac' // Visnik Nacional'nogo unïversitetu "L'vïvs'ka politehnika". Informacijni sistemi ta merezhi. – 2011. – № 715 – S. 59-68. 4. Yong Liu. An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe / Liu Yong, Lv Xiaojian, Qin Xiaosheng, Guo Huaicheng, Yu Yajuan, Wang Jinfeng, Mao Guozhu // Landscape and urban planning. – 2007. – № 82. – P. 233-246. 5. Soheil Boroushaki. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision making / Boroushaki Soheil, Malczewski Jacek // Computers and Geosciences. – 2010. – № 36. – P. 302-312. 6. Gustavsson Marcus Structure and contents of a new geomorphological GIS database linked to a geomorphological map. With an example from Liden, central Sweden / Marcus Gustavsson, C. Arie Seijmonsbergen, Else Kolstrup // Geomorphology. – 2008. – № 95 – P. 335-349. 7. Santini Monia A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index / Monia Santini, Gabriele Caccamo, Alberto Laurenti, Sergio Noce, Riccardo Valentin. // Applied Geography. – 2010. – № 30. – P. 394-415. 8. Al-Sabhan W. A real-time hydrological

model for flood prediction using GIS and the WWW / *W. Al-Sabhan, M. Mulligan, G.A. Blackburn* // Computers, Environment and Urban Systems. – 2003. – № 27. – P. 9-32. **9.** *Dixon B.* Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis / *B. Dixon* // Journal of Hydrology. – 2005. – № 309. – P. 17-38. **10.** *Malczewski J.* Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: Gis-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis / *J. Malczewski* // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2006. – № 8. – P. 270-277. **11.** *Vikljuk Ja.I.* Viktoristannja modeli klitinnoï urbanizacii dlja prognozuvannja formi turistichnih poselen' / *Ja.I. Vikljuk, B.M. Gac'* // Vidbir i obrobka informacii. – 2011. – № 35 (111). – P. 122-127. **12.** *Artemenko O.I.* Matematichne modeljuvannja rekreacijnï privablivosti teritorii z vikoristannjam ierarhichnoï sistemi nechitkoï logiki / *O.I. Artemenko* // Naukovij visnik Nacional'nogo lisotehnichnogo universitetu Ukraïni: Zbirnik naukovovo-tehnichnih prac'. – L'viv, 2011. – Vip. 21.05. – P. 345-351.

Надійшла (received) 28.09.2014

Статтю представив д-р техн. наук, доц., в.о. зав. кафедри комп'ютерних наук Буковинського державного Фінансово-юридичного університету Стеценко І.В.

Shevchuk Sergej, Cand.Sci.Tech
Chernovic'kij filial NTU "Kharkiv Polytechnic Institute"
Tel.: (050) 274-11-21, e-mail: sheva14081975@rambler.ru
ORCID ID: 0000-0002-7506-0732

Artemenko Ol'ga, Cand.Sci.Tech
Privatnij vishnij navchal'nij zaklad "Bukovins'kij un iversitet"
Str. Darvina, 2a, Chernivci, Ukraine, 58000
Tel.: (098) 554-88-09, e-mail: o_hapon@yahoo.com, olga.hapon@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4057-1217

Gac' Bogdan, Cand.Sci.Tech
Privatnij vishnij navchal'nij zaklad "Bukovins'kij un iversitet"
Str. Darvina, 2a, Chernivci, Ukraine, 58000
Tel.: (050) 618-59-63, e-mail: gatsbn@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-8104-4827

РЕФЕРАТИ

РЕФЕРАТЫ

ABSTRACTS

УДК 629.7.615.3

Моделювання та кінематичний аналіз кривошипно-шатунного механізму / Ащепкова Н.С. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 4 – 12.

Розглянуто задачу кінематичного аналізу важільного механізму. Визначено особливості кінематики кривошипно-шатунного механізму. Розроблено програмне забезпечення для пакета прикладних програм Mathcad. Використання цього пакета дозволяє провести кінематичний аналіз і моделювання руху кривошипно-шатунного механізму з навантаженням або в режимі холостого ходу. Лл.: 6. Табл. 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: важільний механізм, кривошипно-шатунний механізм, кінематичний аналіз, режим холостого ходу.

УДК 629.7.615.3

Моделирование и кинематический анализ кривошипно-шатунного механизма / Ащепкова Н.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 4 – 12.

Рассмотрена задача кинематического анализа рычажного механизма. Определены особенности кинематики кривошипно-шатунного механизма. Разработано программное обеспечение для пакета прикладных программ Mathcad. Использование этого пакета позволяет провести кинематический анализ и моделирование движения кривошипно-шатунного механизма с нагрузкой или в режиме холостого хода. Ил.: 6. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: рычажный механизм, кривошипно-шатунный механизм, кинематический анализ, режим холостого хода.

UDC 629.7.615.3

Modelling and kinematics analysis of crank-type-piston-rod mechanism / Ashhepkova N.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – № 62 (1104). – P. 4 – 12.

The problem of kinematic analysis of linkage. The features of the kinematics of the crank mechanism. The software for the application package Mathcad. Using this package allows for kinematic analysis and simulation of the motion of the crank mechanism with the load or idle. Figs.: 6. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: analysis of linkage, crank-type-piston-rod mechanism, kinematics analysis, load or idle.

УДК 621.165

Чисельний аналіз аеропружньої поведінки лопаткового вінця осової турбомашини / Гнесін В.І., Колодяжна Л.В., Жандковскі Р., Колісник О.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 13 – 21.

Представлено чисельний аналіз аеропружньої поведінки коливного лопаткового вінця осової турбомашини в тривимірному трансзвуковому потоці ідеального газу, які основані на рішенні зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки та пружних коливань лопаток. Проведений чисельний аналіз зв'язаних коливань лопаток підтвердив аеродемпфірування при взаємодії перших шести власних форм. Іл.: 7. Табл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: аеропружна поведінка, лопатковий вінець, ідеальний газ, коливання лопаток.

УДК 621.165

Численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца осевой турбомашини / Гнесин В.И., Колодяжная Л.В., Жандковски Р., Колесник А.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 13 – 21.

Представлен численный анализ аэроупругого поведения колеблющегося лопаточного венца осевой турбомашини в трехмерном трансзвуковом потоке идеального газа, основанный на решении связанной задачи нестационарной аэродинамики и упругих колебаний лопаток. Проведенный численный анализ связанных колебаний лопаток подтвердил аэродемпфирование при взаимодействии первых шести собственных форм. Ил.: 7. Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: аэроупругое поведение, лопаточный венец, идеальный газ, колебания лопаток.

UDC 621.165

Numerical analysis of blade row aeroelastic behaviour of axial turbomachine / Gnesin V.I., Kolodyazhnaya L.V., Rzadkowski R., Kolisnyk O.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – № 62 (1104). – P. 13 – 21.

There presented numerical analysis for the aeroelastic behaviour of the oscillations blade row in axial turbomachine in 3D ideal gas flow with coupled problem of a aerodynamics and elastic blades oscillations. The numerical analysis of the associated blade oscillation aerodempfirovanie confirmed the interaction of the first six eigenmodes. Figs.: 7. Tabl.: 1. Refs.: 8 titles.

Keywords: aeroelastic behaviour, blade row, ideal gas, blade oscillations.

УДК 681.5

Автоматизация процессов перетворения нелинейных моделей к эквивалентным линейным в форме Бруновского / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 22 – 37.

Розроблені програмні засоби для автоматизації перетворення нелинійних моделей об'єктів к еквівалентним лінійним моделям. З їх допомогою виконано синтез лінійної математичної моделі руху дизель-поїзда у формі Бруновського, яка враховує паралельну роботу трьох тягових асинхронних двигунів. Отримана модель може використовуватися для пошуку оптимальних керувань, а також для вивчення процесів буксування та паралельної роботи двигунів. Іл.: 2. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: форма Бруновського, лінійна математична модель руху дизель-поїзда, паралельна робота двигунів.

УДК 681.5

Автоматизация процессов преобразования нелинейных моделей к эквивалентным линейным в форме Бруновского / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний А.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 22 – 37.

Разработаны программные средства для автоматизации преобразований нелинейных моделей объектов к эквивалентным линейным моделям. С их помощью выполнен синтез линейной математической модели движения дизель-поезда в форме Бруновского, которая учитывает параллельную работу трёх тяговых асинхронных двигателей. Полученная модель может использоваться для поиска оптимальных управлений, а также для исследования процессов буксования и параллельной работы двигателей. Ил.: 2. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: форма Бруновского, линейная математическая модель движения дизель-поезда, параллельная работа двигателей.

UDC 681.5

Automation processes of transformation of non-linear models to equivalent linear form Brunovsky / Dmitrienko V.D., Zakovorotnyi A.Y. / Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – № 62 (1104). – P. 22 – 37.

Software tools to automate transformations of nonlinear models of objects to equivalent linear model. With their help, made the synthesis of linear mathematical model of the motion of diesel trains in the form Brunovsky, which allows for the parallel operation of three traction induction motors. The resulting model can be used to find the optimal controls, as well as for study of slipping and parallel operation of motors. Figs.: 2. Refs.: 13 titles.

Keywords: form Brunovsky, linear mathematical model of diesel-train movement, parallel operation of motors.

УДК 004.383.8: 681.322

Нейронна мережа АРТ, що розпізнає об'єкти, які змінюються
/ Дмитрієнко В.Д., Леонов С.Ю. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 38 – 48.

На основі нейронної мережі адаптивної резонансної теорії (АРТ), здатної визначати кілька рішень, розроблена архітектура та алгоритми функціонування стабільно-пластичної дискретної нейронної мережі АРТ, яка може розпізнавати об'єкти, що змінюються в дискретні моменти часу. Ил.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: нейронна мережа, що розпізнає об'єкти, які змінюються, адаптивна резонансна теорія (АРТ), стабільно-пластична дискретна нейронна мережа АРТ.

УДК 004.383.8: 681.322

Нейронная сеть АРТ, распознающая изменяющиеся объекты
/ Дмитриенко В.Д., Леонов С.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 38 – 48.

На основе нейронной сети адаптивной резонансной теории (АРТ), способной определять несколько решений, разработана архитектура и алгоритмы функционирования стабильно-пластичной дискретной нейронной сети АРТ, которая может распознавать объекты, изменяющиеся в дискретные моменты времени. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: нейронная сеть, распознающая изменяющиеся объекты, адаптивная резонансная теория (АРТ), стабильно-пластичная дискретная нейронная сеть АРТ.

UDC 004.383.8: 681.322

ART neural network that recognizes the changing facilities
/ Dmitrienko V.D., Leonov S.Yu. / Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – № 62 (1104). – P. 38 – 48.

Based on neural network adaptive resonance theory (ART) capable of identifying multiple solutions developed architecture and algorithms of stable plastic-discrete neural network ART that can recognize objects that vary in discrete time. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: neural network that recognizes the changing objects, adaptive resonance theory (ART), a stable plastic-discrete neural network ART.

УДК 616-71

Особливості виміру диференційного тиску при передній активній риноманометрії / Єрохін А.Л., Чмовж В.В., Нечипоренко А.С., Гарюк О.Г. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 49 – 57.

Розглянуто метод передньої активної риноманометрії. Досліджено особливості побудови схем виміру диференційного тиску пристроїв для об'єктивної оцінки носового дихання. Проведено розрахунок основної відносної похибки виміру диференційного тиску. Ил.: 5. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: передня активна риноманометрія, диференційний тиск, відносна похибка вимірювань.

УДК 616-71

Особенности измерения дифференциального давления при передней активной риноманометрии /Ерохин А.Л., Чмовж В.В., Нечипоренко А.С., Гарюк О.Г. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 49 – 57.

Рассмотрены вопросы диагностики функции носового дыхания с помощью метода передней активной риноманометрии. Проведен сравнительный анализ схем измерения дифференциального давления. Проведен расчёт относительной погрешности измерений, обусловленной потерями дифференциального давления. Ил.: 5. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: передняя активная риноманометрия, дифференциальное давление, относительная погрешность измерений.

UDC 616-71

Features of measuring the differential pressure at the active anterior rhinomanometry /Yerokhin A.L., Chmovzh V.V., Nechyporenko A.S., Garyuk O.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – №. 23. – P. 49 – 57.

The method of active anterior rhinomanometry was described. The influence of losses of differential pressure on calculation of the diagnostic parameter R_{150} was analyzed. The relative error of measurement of differential pressure was calculated. The biggest error is observed at R_{150} in the normal range and weak obstruction. Figs.: 5. Table.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: active anterior rhinomanometry, differential pressure, the relative error of measurement.

УДК 621.791.1

Математичне моделювання процесу дифузійного зварювання вісесиметричних біметалевих з'єднань / Карпович О.В., Карпович І.І. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 58 – 71.

У роботі наведена математична модель процесів, що відбуваються при дифузійному зварюванні деталей по охоплюваним поверхнім контакту, та її реалізація методом кінцевих елементів в програмному комплексі Abaqus. На основі математичної моделі запропоновано алгоритм визначення напружень в біметалічному з'єднанні на кожному етапі дифузійного зварювання. Ил.: 5. Табл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: математичне моделювання, дифузійне зварювання, метод кінцевих елементів, біметалічне з'єднання.

УДК 621.791.1

Математическое моделирование процесса диффузионной сварки осесимметричных биметаллических соединений / Карпович Е.В., Карпович И.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 58 – 71.

В работе приведена математическая модель процессов, происходящих при диффузионной сварке деталей по охватываемым поверхностям контакта, и ее реализация методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus. На основе математической модели предложен алгоритм определения напряжений в биметаллическом соединении на каждом этапе диффузионной сварки. Ил.: 5. Табл.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: математическое моделирование, диффузионная сварка, метод конечных элементов, биметаллическое соединение.

UDC 621.791.1

Mathematical modeling of the diffusion welding of axially symmetric bimetallic compounds / Karpovych E.V., Karpovych I.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – №. 62 (1104). – P. 58 – 71.

In work the mathematical model of the processes occurring during the diffusion welding of parts covered by the contact surfaces, and its implementation by finite element method in the software package Abaqus. Based on the mathematical model proposed algorithm for determining stresses in bimetallic compound at each stage of diffusion welding. Figs.: 5. Tabl.: 2. Refs.: 10 titles.

Keywords: mathematic modeling, diffusion welding, finite element method, bimetallic compound.

УДК 681.518+621.373

Підвищення точності автогенераторного вимірювача ваги тестовим методом / Кондрашов С.І., Гусельников О.В. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 72 – 76.

В статті розглянуто використання тестового методу підвищення точності автогенераторного вимірювача ваги. Наведені структурна схема та алгоритм роботи вимірювача ваги. Розглянуто алгоритм реалізації тестового методу. Іл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: тестовий метод, підвищення точності, автогенераторний вимірювач ваги.

УДК 681.518+621.373

Повышение точности автогенераторного измерителя веса тестовым методом / Кондрашов С.И., Гусельников А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 72 – 76.

В статье рассмотрено использование тестового метода повышения точности автогенераторного измерителя веса. Приведены структурная схема и алгоритм работы измерителя веса. Рассмотрен алгоритм реализации тестового метода. Ил.: 1, Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: тестовый метод, повышение точности, автогенераторный измеритель веса.

UDC 681.518+621.373

Increasing the accuracy of the autogenerating device for measuring weight by the test method / Kondrashov S.I., Gusel'nikov O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – №. 62 (1104). – P. 72 – 76.

The paper considers the use of a test method for increasing the accuracy of the autogenerating device for measuring weight. Block diagram and algorithm of measuring weight are given. The algorithm of realization of the test method are shown. Figs.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: test method for increasing the accuracy, autogenerating device for measuring weight.

УДК 621.3.01

Багатокритеріальний синтез стохастичного робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на основі стохастичної мультиагентної оптимізації / Кузнецов Б.І., Нікітіна Т.Б., Коломієць В.В., Хоменко В.В. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 77 – 86.

Розроблено метод багатокритеріального синтезу стохастичного робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на основі стохастичної мультиагентної оптимізації, що дозволяє задовольнити різноманітним вимогам, які пред'являються до роботи систем в різних режимах та істотно скоротити час вирішення задачі. Наведені результати порівнянь динамічних характеристик електромеханічних систем із синтезованими регуляторами. Іл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: багатомасова електромеханічна система, стохастичне робастне керування, багатокритеріальний синтез, стохастична мультиагентна оптимізація.

УДК 621.3.01

Многокритеріальний синтез стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации / Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 77 – 86.

Разработан метод многокритериального синтеза стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации, что позволяет существенно сократить время решения задачи и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. Приведены результаты сравнений динамических характеристик электромеханических систем с синтезированными регуляторами. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: многомассовая электромеханическая система, стохастическое робастное управление, многокритериальный синтез, стохастическая мультиагентная оптимизация.

UD K 621.3.01

Multiobjective synthesis of stochastic by multimass electromechanical systems based on stochastic multi-agent optimization / Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Khomenko V.V. // Herald of the National State University "KhPI" / Subject issue: Information science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – № 62 (1104). – P. 77 – 86.

Developed a method for solving the problem of multiobjective optimisation of stochastic robust control by multimass electromechanical systems, based on multi-agent stochastic particle swarm optimization, which can significantly reduce the time for solving the problem and meet the diverse requirements that apply to the work of multimass electromechanical systems in different modes. The results of comparisons of the dynamic characteristics of the electromechanical servo system synthesized with anisotropic regulators and types of regulators. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: multimass electromechanical system, robust control, multiobjective synthesis, stochastic multiagent optimization.

УДК 621.314:621.391

Визначення інформативних параметрів для системи діагностики газорозподільного механізму ДВС / Лавріненко О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 87 – 94.

Розглянуто математичну модель, що описує процес газорозподілу в двигуні внутрішнього згоряння. Експериментально перевірені нові інформативні параметри, що характеризують технічний стан газорозподільного механізму (ГРМ) двигуна. Побудовано навчальні сукупності і розроблені вирішальні правила, що дозволяють з більшою точністю виявляти дефекти ГРМ. Ил.: 7. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, газорозподільний механізм, інформативні параметри.

УДК 621.314:621.391

Определение информативных параметров для системы диагностики газораспределительного механизма ДВС / Лавриненко О.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 87 – 94.

Рассмотрена математическая модель, описывающая процесс газораспределения в двигателе внутреннего сгорания. Экспериментально проверены новые информативные параметры, характеризующие техническое состояние газораспределительного механизма (ГРМ) двигателя. Построены обучающие совокупности и разработаны решающие правила, позволяющие с большей точностью выявлять дефекты ГРМ. Ил.: 7. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, газораспределительный механизм, информативные параметры.

UDC 621.314:621.391

Determination of information parameters for system of diagnostics of the gas-distributing mechanism of ICE / Lavrinenko O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – №. 62 (1104). – P. 87 – 94.

A mathematical model describing the process timing in an internal combustion engine. Experimentally verified new informative parameters characterizing the technical condition of the timing engine. Built training together and developed decision rules to allow more accurately detect defects timing. Figs.: 7. Refs.: 10 titles.

Keywords: internal combustion engine, gas-distributing mechanism, information parameters.

УДК 007:159.955:519.768:621.372.852: 621.372.413

Електродинамічна модель НВЧ-фільтра з квазі- H^{10n} модами на основі узагальненої матриці розсіювання / Мамедов Д.Б., Ющенко О.Г. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 95 – 102.

Представлена електродинамічна модель конструкції НВЧ-фільтра на основі хвильоводно-діелектричних резонаторів, які частково заповнюють прямокутний хвилевід по ширині. Модель побудована на основі рішення задачі розсіювання методами узагальненої матриці і часткових областей. Модель дозволяє підвищити точність інтелектуальної САПР конструювання багатоланкових фільтрів, що відповідають новому поколінню радіотелекомунікаційних систем міліметрового діапазону, які відповідають стандартам ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c і IEEE 802.11ad. Ил.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: НВЧ-фільтр, резонатор, узагальнена матриця розсіювання, інтелектуальна САПР, стандарти ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c і IEEE 802ad.

УДК 007:159.955:519.768:621.372.852: 621.372.413

Электродинамическая модель СВЧ-фильтра с квази- H^{10n} модами на основе обобщенной матрицы рассеяния / Мамедов Д.Б., Ющенко А.Г. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 95 – 102 .

Представлена электродинамическая модель конструкции СВЧ-фильтра на основе волноводно-диелектрических резонаторов, частично заполняющих прямоугольный волновод по ширине. Модель построена на основе решения задачи рассеяния методами обобщенной матрицы и частичных областей. Модель позволяет повысить точность интеллектуальной САПР конструирования многозвенных фильтров, отвечающих новому поколению радиотелекоммуникационных систем миллиметрового диапазона соответствующих стандартам ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c и IEEE 802.11ad. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: СВЧ-фильтр, резонатор, обобщенная матрица рассеяния, интеллектуальная САПР, стандарты ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c и IEEE 802.11ad.

UDC 007:159.955:519.768:621.372.852: 621.372.413

Electrodynamic model of microwave filter with quasi- H^{10n} modes on the basis of the generalized scattering matrix / Mamedov D.B., Yushchenko A.G. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – №. 62 (1104). – P. 95 – 102.

The electrodynamic model of microwave filter design based on waveguide-dielectric resonators, partially filling a rectangular waveguide by width is presented. The model is based on the generalized scattering matrix and partial domains methods. The model allows to improve the accuracy of intellectual CAD of multitier filters designing, which corresponds to new generation of millimeter-wave radio systems standards like ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c and IEEE 802.11ad. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: microwave filter, resonator, generalized scattering matrix, intellectual CAD, electrodynamic model, standards ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c and IEEE 802.

УДК 621.3

Моделювання системи виявлення та захисту від боксування дизель-поїзда / Носков В.І., Мезенцев М.В., Гейко Г.В. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 103 – 108.

Пропонується модель для проведення дослідження системи виявлення та захисту від боксування тягового асинхронного приводу дизель-поїзда. Виконана розробка структурної схеми моделі, описана роботи системи виявлення та захисту від боксування. Наводяться результати імітаційного моделювання, які підтверджують правильність розробленої моделі. Ил.: 2. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: боксування, тяговий асинхронний привід, імітаційне моделювання, система виявлення та захисту від боксування.

УДК 621.3

Моделирование системы обнаружения и защиты от боксования дизель-поезда / Носков В.И., Мезенцев Н.В., Гейко Г.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 103 – 108.

Предлагается модель для проведения исследования системы обнаружения и защиты от боксования тягового асинхронного привода дизель-поезда. Выполнена разработка структурной схемы модели, описана работа системы обнаружения и защиты от боксования. Приводятся результаты имитационного моделирования, подтверждающие правильность разработанной модели. Ил.: 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: боксование, тяговий асинхронний привід, імітаційне моделювання, система обнаружения и защиты от боксования.

UDC 621.3

Simulation system of detection and protection against slipping diesel train / Noskov V.I., Mezentsev N.V., Gejko G.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – № 62 (1104). – P. 103 – 108.

Model for research of detection and protection against slipping traction asynchronous drive of diesel train is proposed. Development the block diagram of model is complete. The work of the system to detect and protect against slipping is described. The results of simulation, confirming the correctness the developed model, are given. Figs.: 2. Refs.: 9 titles.

Keywords: against slipping, asynchronous traction drive, simulation, system of detection and protection against slipping.

УДК 519.873

Модель оптимізації комплексу методів неруйнівного контролю для виявлення пошкоджень у дорожньому покритті та придорожній інфраструктурі / Сидляренко А.І. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 109 – 116.

Подолання проблеми якості дорожнього покриття можливе за умов системного впровадження засобів та методів моніторингу та контролю його стану. Запропоновано математичну модель задачі оптимізації комплексу методів неруйнівного контролю для виявлення дефектів (пошкоджень) у дорожньому покритті та придорожній інфраструктурі. Іл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: оптимізація, комплекс методів неруйнівного контролю, дорожнє покриття, придорожня інфраструктура.

УДК 519.873

Модель оптимизации комплекса методов неразрушающего контроля для обнаружения повреждений в дорожном покрытии и придорожной инфраструктуре / Сидляренко А.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 109 – 116.

Преодоление проблемы качества дорожного покрытия возможно при условии системного внедрения средств и методов мониторинга и контроля его состояния. Предложена математическая модель задачи оптимизации комплекса методов неразрушающего контроля для выявления дефектов (повреждений) в дорожном покрытии и придорожной инфраструктуре. Ил.: 1. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: оптимизация, комплекс методов неразрушающего контроля, дорожное покрытие, придорожная инфраструктура.

UDC 519.873

Model optimization of complex non-destructive testing methods for detecting damage in road coverage and roadside infrastructure / Sidliarenko A.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – №.62 (1104). – P. 109 – 116.

Overcoming the problems of quality of road surface conditions possible for the system implementation tools and methods for monitoring and control of their condition. The mathematical model of optimization problem of complex non-destructive testing methods for detecting defects (damage) of road coverage and roadside infrastructure. Figs.: 1. Refs.: 16 titles.

Keywords: optimization, nondestructive testing methods complex, road surface, roadside infrastructure.

УДК 537.5

Розробка програмного забезпечення для аналізу розподілення концентрації від'ємних аеронів в приміщеннях з нахиленою площиною / Строкань О.В., Дубініна О.В. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 117 – 122.

Розглянуто закономірність розповсюдження від'ємних аероіонів від штучних джерел аероіонізації на нахиленій площині, на основі яких розроблено алгоритм аналізу розподілення концентрації від'ємних аеронів в приміщеннях з нахиленою площиною. Відповідно до розробленого алгоритму створено програмний засіб, який направлений на автоматизацію розрахунку та побудови сприятливих для людини ізоліній концентрації від'ємних аероіонів відповідно до заданих параметрів приміщення. Іл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: алгоритм, програмний засіб, від'ємні аероіони, нахилена площина, розподілена концентрація від'ємних аеронів.

УДК 537.5

Разработка программного обеспечения для анализа распределения концентрации отрицательных аэронов в помещениях с наклоненной площадью / Строкань А.В., Дубинина О.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 117 – 122.

Рассмотрены закономерность распространения отрицательных аэроионов от искусственных источников аэроионизации на наклонной плоскости, на основе которых разработан алгоритм анализа распределения концентрации отрицательных аэронов в помещениях с наклоненной площадью. Согласно разработанному алгоритму создано программное средство, которое направлено на автоматизацию расчета и построения благоприятных для человека изолиний концентрации отрицательных аэроионов в соответствии с заданными параметрами помещения. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: алгоритм, программное средство, отрицательные аэроионы, наклоненная площадь, концентрация отрицательных аэронов.

UDC 537.5

Development software for the analysis the distribution of concentration negative aeron indoor inclined plane / Strokan O.V., Dubinina H.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – №. 62 (1104). – P. 117 – 122.

Considered distribution pattern of negative aeron from artificial sources aereoionization inclined to the plane on which the algorithm analyzing the concentration distribution of negative aeron indoor inclined plane. According to the algorithm created a software tool that aims at automating the calculation and construction of a man-contour concentration of negative aeron according to set parameters facilities. Figs.: 2. Refs.: 10 titles.

Keywords: algorithm, software, negative aeron, inclined plane, concentration of negative aeron.

УДК 001.89

Особливості розробки інформаційних технологій моделювання туристичних комплексів / Шевчук С.Ф., Артеменко О.І., Гаць Б.М. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 123 – 130.

Запропонована структура інформаційних технологій для моделювання та аналізу процесів формування і розвитку окремих туристичних об'єктів, цілісних туристичних комплексів на регіональному та локальному рівнях. Розроблені інформаційні технології дають змогу проводити аналіз процесів започаткування та ведення туристичного бізнесу, використання природних та рекреаційних ресурсів відповідної території. Ил.: 3. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: інформаційні технології, туристичні комплекси, туристичний бізнес, використання природних та рекреаційних ресурсів.

УДК 001.89

Особенности разработки информационных технологий моделирования туристических комплексов / Шевчук С.Ф., Артеменко О.И., Гаць Б.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 62 (1104). – С. 123 – 130.

Предложена структура информационных технологий для моделирования и анализа процессов формирования и развития отдельных туристических объектов, целостных туристических комплексов на региональном и локальном уровнях. Разработанные информационные технологии позволяют проводить анализ процессов создания и ведения туристического бизнеса, использования природных и рекреационных ресурсов соответствующей территории. Ил.: 3. Библиогор.: 12 назв.

Ключевые слова: информационные технологии, туристические комплексы, туристический бизнес, использование природных и рекреационных ресурсов.

UDC 001.89

Aspects of the development information technologies for simulation of tourist complexes / Shevchuk S.F., Artemenko O.I., Gats B.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2014. – №.62 (1104). – P. 123 – 130.

In this paper the structure of information technologies for simulation and analysis of formation and development for integrated tourist complexes at the regional and local areas was developed. Developed information technologies are useful in analysis of the processes in tourist business, effective usage of natural and recreational resources of the area, providing the possibilities of forming evidence-based strategies for the development of regional tourism infrastructure. Figs.: 3. Refs.: 12 titles.

Keywords: information technology, tourist complex, tourist business, effective usage of natural and recreational resources.

Зміст

<i>Размещение Вестника НТУ "ХПИ" серии "Информатика и моделирование" в международных наукометрических базах, репозиториях и поисковых системах</i>	3
<i>Ащепкова Н.С.</i> Моделирование и кинематический анализ кривошипно-шатунного механизма	4
<i>Гнесин В.И., Колодяжная Л.В., Жандковски Р., Колесник А.А.</i> Численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца осевой турбомшины	13
<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю.</i> Автоматизация процессов преобразования нелинейных моделей к эквивалентным линейным в форме Бруновского	22
<i>Дмитриенко В.Д., Леонов С.Ю.</i> Нейронная сеть АРТ, распознающая изменяющиеся объекты	38
<i>Ерохин А.Л., Чмовж В.В., Нечипоренко А.С., Гарюк О.Г.</i> Особенности измерения дифференциального давления при передней активной риноманометрии	49
<i>Карпович Е.В., Карпович И.И.</i> Математическое моделирование процесса диффузионной сварки осесимметричных биметаллических соединений	58
<i>Кондрашов С.І., Гусельніков О.В.</i> Підвищення точності автогенераторного вимірювача ваги тестовим методом	72
<i>Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В.</i> Многокритериальный синтез стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации	77
<i>Лавриненко О.В.</i> Определение информативных параметров для системы диагностики газораспределительного механизма ДВС	87
<i>Мамедов Д.Б., Ющенко А.Г.</i> Электродинамическая модель СВЧ-фильтра с квази- H^{10n} модами на основе обобщенной матрицы рассеяния	95
<i>Носков В.И., Мезенцев Н.В., Гейко Г.В.</i> Моделирование системы обнаружения и защиты от боксования дизель-поезда	103

Сідляренко А.І. Модель оптимізації комплексу методів неруйнівного контролю для виявлення пошкоджень у дорожньому покритті та приорожній інфраструктурі	109
Строкань О.В., Дубініна О.В. Розробка програмного забезпечення для аналізу розподілення концентрації від'ємних аеронів в приміщеннях з нахилоною площиною	117
Шевчук С.Ф., Артеменко О.І., Гаць Б.М. Особливості розробки інформаційних технологій моделювання туристичних комплексів ..	123
Реферати, рефераты, abstracts	131

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"Харківський політехнічний інститут"**

*Збірник наукових праць
Серія
Інформатика та моделювання
№ 62 (1104)*

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор к.т.н. Леонов С.Ю.
Відповідальний за випуск к.т.н. Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ".
Кафедра обчислювальної техніки та програмування,
тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Обл. вид. № 104 – 14

Підп. до друку 29.12.2014 р. Формат 60x84 1/16. Папір Сору Paper.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,2. Облік. вид. арк. 8,9.
Наклад 300 прим.
Ціна договірна

НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Видавничий центр НТУ "ХПІ"
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Отпечатано в типографії ООО «Цифра Принт»
на цифровом комплексі Хегох DocuTech 6135.
Свидетельство о Государственной регистрации А01 № 432705 от 3.08.2009 г.
Адрес : г. Харьков, ул. Данилевского, 30. Телефон : (057) 7861860.