

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 21 (1243) 2017

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2017

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – 178 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською, російською та англійською 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 наказом Міністерства освіти і науки України № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Серія "Інформатика та моделювання" Вісника НТУ "ХПІ" включена у 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., Є.І. СОКОЛ, чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф. (**голова**);

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

А.П. МАРЧЕНКО, 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. КЛЕПІКОВ, 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.;

П.Г. ПЕРЕРВА, д-р техн. наук, проф.; В.О. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;

М.І. РИШЕНКО, 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, д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії: А.Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.; Є.Г. Жиялков, д-р техн. наук, проф.; О.Ю. Заковоротний, д-р техн. наук, доц.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.; Г.А. Кучук, 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. (Белорусь); 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 № 5 від 02.06.2017 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2017

Розміщення Вісника НТУ "ХПІ"
серія "Інформатика та моделювання"

в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах

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

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

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

4. Electronic Libraries: Cyberleninka (Russia), Bielefeld Academic Search Engine (Germany), Open Journal Systems (Ukraine), Національна бібліотека ім. Вернадського (Ukraine), Науково-технічна бібліотека НТУ "ХПІ" (Ukraine), Text Archive (Russia).

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

6. University Libraries: **USA:** 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. **UK:** 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. **Canada:** University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University. **Australia:** Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. **Sweden:** IBRIS – Nationally bibliotheca system, Hogskolan Dalarna, Sodertorns hogskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. **Netherlands:** Quality Open Access Market, University of Leiden. **Mexico:** University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. **Other countries:** Universia (Spain), Babord+ (France), SLU (Sweden), Cerge EL (Czech Republic), BON (Portugal), AUT Library (New Zealand), Polska Bibliografia Naukowa (Poland), State National Technical Library (Ukraine), Scientific Library named by Govorov (Russia, St. Petersburg), Universiteits bibliotheek Gent (Belgium), E-Resources Subject Access (China).

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

Математические методы и модели

И.В. АНТОНОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
Н.А. ЧИКИНА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

ПРИМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИЦИКЛОВ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ В ПРЕДПРОГНОЗНОМ АНАЛИЗЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В работе представлены результаты применения графических тестов для предпрогнозного анализа временных рядов, характеризующих уровень заболеваемости аллергодерматозами рабочих предприятий химико-фармацевтической отрасли Украины. Метод основан на разложении фазовых портретов временных рядов на квазициклы, характеристики которых позволяют оценить риск ошибочного прогнозирования. Для усиления структурированности данных предлагается провести процедуру агрегирования временных рядов. Ил.: 5. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: графический тест; предпрогнозный анализ; аллергодерматозы; фазовый портрет; квазицикл; агрегирование временных рядов.

Постановка проблемы. Традиционно в аллергологии задача ранней диагностики заболевания связана с анализом факторов риска, количество которых за последние годы резко возросло. Наличие факторов риска и факторов предрасположенности к различным аллергическим заболеваниям, оценка уровня адаптационно-компенсаторных возможностей организма дало возможность с определенной степенью уверенности индивидуально прогнозировать риск развития профессионально обусловленных аллергодерматозов на предприятиях химико-фармацевтической отрасли [1, 2]. Актуальной в плане внедрения в Украине системы медицинского страхования остается задача прогнозирования уровня заболеваемости профессионально обусловленными патологиями.

Анализ литературы. Как правило, при анализе временных рядов (ВР) используются методы, дающие количественный прогноз. Для ВР, у которых гипотеза о существовании тренда не подтверждается, такие методы не продуктивны [3]. В работе [4] обосновываются причины малой информативности статистических показателей как следствие наличия фрактальных свойств во временном поведении рядов, эмпирическая функция распределения которых не согласуется с нормальным распределением. Поэтому для обнаружения общей тенденции поведения ВР предлагается на этапе предпрогнозного анализа использовать методы теории хаоса, которые дают возможность провести качественный анализ исследуемого ВР. По отношению к динамике социально-природных систем и процессов теория хаоса не только

объясняет бифуркационные явления (большие падения или большие выбросы), но и утверждает, что их невозможно предсказать, поскольку природа не есть ряд повторяющихся закономерностей, и характеризуется локальной случайностью и глобальным порядком. По этой причине многие аналитики обоснованно предположили, что распознать в хаотическом движении новые закономерности им поможет фрактальная природа ВР [5 – 8].

В настоящее время, судя по ряду публикаций, можно отметить намечающуюся тенденцию использования графических тестов в процессе моделирования социально-природных ВР методами нелинейной динамики. Наиболее популярным является графический тест хаоса, предложенный Гилмором [9]. Этот тест выявляет неустойчивые квазициклы, заключенные в странном аттракторе.

Поскольку ни одна математическая модель не в состоянии вместить всего многообразия реально существующих естественных связей, то для усиления структурированности данных предлагается провести процедуру агрегирования ВР. Его сущность состоит в соединении исходных однородных элементов ВР. В результате агрегирования происходит преобразование исходной модели ВР в модель с меньшим числом переменных, дающую приближенное по сравнению с исходным описание изучаемого процесса. Существуют различные способы агрегирования [10], различающиеся выбором показателя объектов агрегации, целью процедуры агрегирования и др.

Цель статьи. Пусть заданы скалярные эквидистантные временные ряды $X^1 = \{x^1(t_i)\}_{i=1}^N$ и $X^2 = \{x^2(t_i)\}_{i=1}^N$, измерения которых $x^1(t_i)$ и $x^2(t_i)$ в моменты наблюдений $t_i, i = \overline{1, N}$, характеризуют количество рабочих предприятия [1], у которых зафиксировано наличие (Группа риска 1) или отсутствие (Группа риска 2) в анамнезе профессионально обусловленных аллергодерматозов. Целью настоящих исследований является проведение предпрогнозного анализа исследуемых ВР X^1 и X^2 соответствующих групп риска на основе характеристик квазициклов их фазовых портретов (ФП).

Основной раздел. Следует сразу отметить, что есть некоторая разница в обозначениях, принятых в данном исследовании и в работе [1] авторов, состоящая в том, что Группа риска 2 (ГР2) в настоящем исследовании объединяет ГР2, ГР3 и группу ПЗ, введенные в [1].

На рис. 1 представлены эмпирические функции распределения рассматриваемых ВР. Визуальный анализ рисунков эмпирических функций распределения позволяет утверждать, что поведение рассматриваемых ВР не подчиняется нормальному закону.

Это означает, что применение статистического анализа ВР не будет отражать действительности. Чтобы этот факт принимался в расчет, необходима замена линейной парадигмы. Кроме того, эти ряды не обладают свойством стационарности. Во-вторых, частая смена знаков во временных рядах приращений $\Delta x_i^k = x_{i+1}^k - x_i^k, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, 2}$, дает основание утверждать, что трендовые компоненты [4], базирующиеся на скользящих средних, фактически не представляют ценной информации о дальнейшем поведении рассматриваемого ВР.

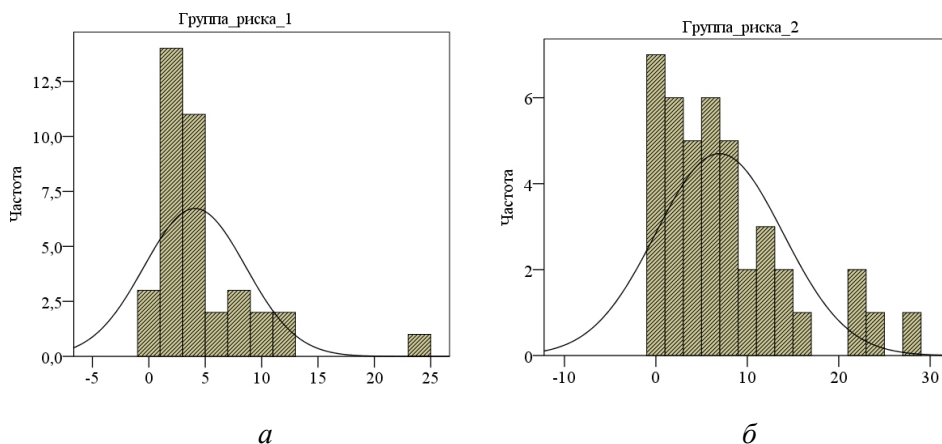


Рис. 1. Гистограммы частот временных рядов X^1 ГР1 (а) и X^2 ГР2 (б)

Таким образом, традиционные, базирующиеся на трендах и регрессии статистические методы предпрогнозного анализа данных ВР не являются адекватными этим рядам, в чем авторы уже убеждались при попытках построить для этих рядов прогнозные модели.

Инструментарий ФП является новым методом для прогнозирования ВР. Согласно установившимся представлениям, фазовое пространство означает совокупность мгновенных состояний рассматриваемой системы (экономической, технической, социальной, экологической и т.д.), снабженной определенной структурой в зависимости от рассматриваемых задач и поставленных целей. С математической точки зрения фазовое пространство – это множество с надлежащей структурой, элементы которого (фазовые точки) представляют (условно изображают) состояния системы.

На рис. 2 представлены ФП изучаемых ВР X^1 и X^2 . Для обнаружения неустойчивых квазициклов в рассматриваемых ВР применим подход, который называется "разложением фазового портрета на квазициклы". Разложение ФП на квазициклы базируется на визуализации графического представления фрагментов данного ФП.

Термин "квазицикл" в некотором смысле близок к определению понятия "цикл". Различие между этими двумя понятиями состоит в том, что начальная и конечная точки не обязательно должны совпадать. Конечная точка квазицикла определяется ее вхождением в окрестность начальной точки. При этом допускается самопересечение начального и конечного звеньев квазицикла, если это приводит к наилучшему сближению его начальной и конечной точек. Для каждого из представленных на рис. 2 ФП осуществлено разложение на квазициклы.

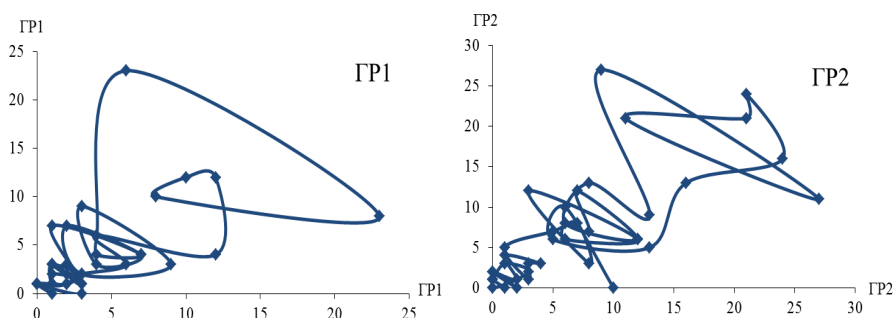


Рис. 2. Фазовые портреты временных рядов X^1 ГР1 и X^2 ГР2

На рис. 3 представлены типичные квазициклы, составляющие большинство в указанных разложениях.

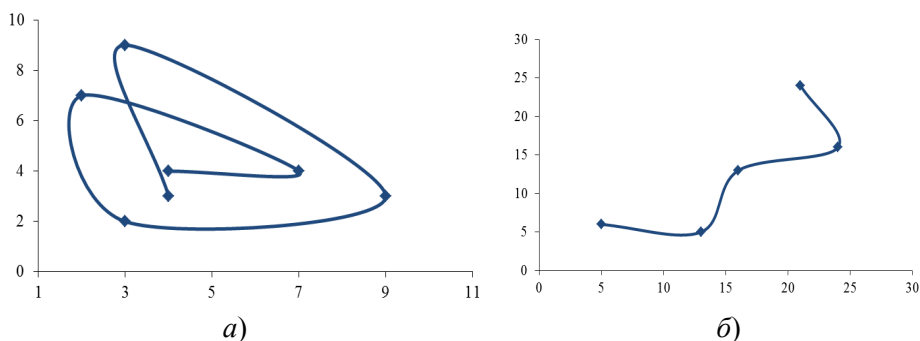


Рис. 3. Типичные квазициклы фазовых портретов временных рядов X^1 ГР1 и X^2 ГР2

Их характерной особенностью является то, что при их малой длине они содержат такие пары соседних звеньев, которые имеют противоположные направления вращения (а). Вторая особенность рассматриваемых ФП состоит в том, что они содержат такие достаточно продолжительные отрезки, в которых отсутствует цикличность (б). Эти две особенности подтверждают вывод о "плохих" предпрогнозных

характеристиках данных ВР. Таким образом, из анализа ФП ВР X^1 и X^2 вытекает необходимость применения к ним процедуры агрегирования с целью улучшения их предпрогнозных характеристик.

Применим к рядам X^1 и X^2 процедуру агрегирования с интервалом агрегирования $q=2$ и $q=3$. В результате проведения процедуры агрегирования из ВР X^1 получены ВР $\bar{X}_1^1$ и $\bar{X}_2^1$, а из ВР X^2 получены ВР $\bar{X}_1^2$ и $\bar{X}_2^2$. Для каждого из этих шести ВР были определены значения так называемых рисков статистических показателей: 1) коэффициент вариации V ; 2) коэффициент асимметрии A ; 3) коэффициент эксцесса E .

В табл. 1 приведены статистические показатели исходных ВР X^1 и X^2 и агрегированных ВР $\bar{X}_1^1, \bar{X}_2^1, \bar{X}_1^2$ и $\bar{X}_2^2$.

Таблица 1

Статистические показатели ВР X^1, X^2
и агрегированных ВР $\bar{X}_1^1, \bar{X}_2^1, \bar{X}_1^2$ и $\bar{X}_2^2$

	X^1	$\bar{X}_1^1$	$\bar{X}_2^1$	X^2	$\bar{X}_1^2$	$\bar{X}_2^2$
V	23	14,5	12	27	22	21,7
A	2,38	1,64	1,39	1,27	1,06	1,12
E	7,5	2,33	1,2	1,2	0,41	1,13

Анализ табл. 1 позволяет сделать вывод о том, что процедура агрегирования ВР X^1 не оказалась удачной ни в первом, ни во втором случае, поскольку произошла потеря информации, отразившаяся на значениях рисков статистических показателей рядов $\bar{X}_1^1$ и $\bar{X}_2^1$.

Однако удачной оказалась процедура агрегирования ВР X^2 с интервалом агрегирования $q=3$. Полученный при этом ВР $\bar{X}_2^2$ имеет практически те же значения размаха варьирования (V), асимметрии (A) и эксцесса (E). На рис. 4 приведен ФП $\bar{X}_2^2$ агрегированного ВР $\bar{X}^2$ ГР2.

В результате разложения агрегированного ряда $\bar{X}_2^2$ ГР2 получены квазициклы, приведенные на рис. 5.

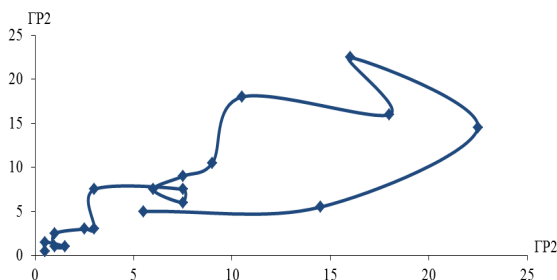


Рис. 4. Фазовый портрет агрегированного временного ряда $\overline{X}_2^2$ ГР2 ($q = 3$)

Все квазициклы помещены в габаритные прямоугольники. В каждом габаритном прямоугольнике точка пересечения его диагоналей представляет центр вращения соответствующего квазицикла.

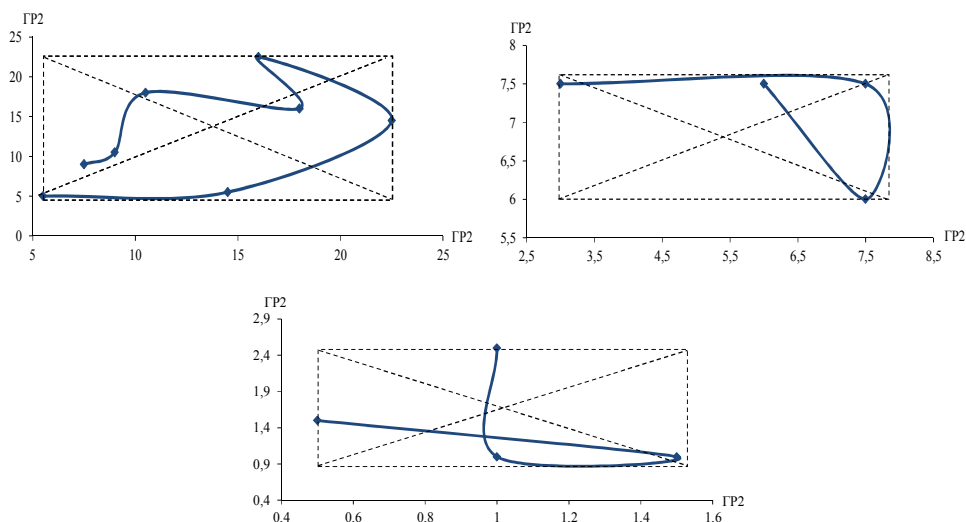


Рис. 5. Квазициклы разложения агрегированного ряда $\overline{X}_2^2$ ГР2

Рассматривая направление вращения звеньев квазициклов на рис. 5 (по часовой стрелке или против часовой стрелки), отметим, что все звенья имеют направление вращения по часовой стрелке.

Выводы. ВР $\overline{X}_2^2$ ГР2, полученный в результате процедуры агрегирования ВР X^2 с интервалом агрегирования $q = 3$, содержит четко выраженную циклическую компоненту, в составе которой квазициклы длиной 4, 4 и 8. Содержательную временную интерпретацию этих длин можно трактовать как наличие в динамике ВР X^2 двух- или четырехгодичных видов цикличности.

Все звеня квазициклов имеют направление вращения по часовой стрелке, что можно рассматривать в качестве косвенной оценки минимального риска ошибочного прогнозирования рассматриваемых ВР на основе базовых характеристик квазициклов их ФП.

Из сказанного следует, что имеются достаточные предпосылки для надежного прогнозирования ВР X^2 , агрегированного с интервалом $q=3$. Что касается ВР X^1 , то для него следует провести более детальный предпрогнозный анализ.

Список литературы: 1. Чикина Н.А. Изучение влияния внутренних факторов риска на развитие аллергодерматозов у рабочих химико-фармацевтических предприятий / Н.А. Чикина, И.В. Антонова // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2007. – № 19. – С. 195-200. 2. Антонова И.В. Применение методов фрактального анализа к исследованию временных рядов / И.В. Антонова, Н.А. Чикина // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 32 (1141). – С. 4-10. 3. Тебужева Ф.Б. Декомпозиция и прогнозирование временных рядов с долговременными корреляциями / Ф.Б. Тебужева, В.А. Перепелица, М.Ю. Кабиняков // Известия ЮФУ. Технические науки. – Ростов н/Д.: издательство ЮФУ. – 2013. – № 1 (138). – С. 111-120. 4. Перепелица В.А. Математические модели и методы оценки рисков экономических, социальных и аграрных процессов / В.А. Перепелица, Е.В. Попова. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 2002. – 208 с. 5. Кумратова А.М. Аналитический инструментарий векторной оценки рисков финансового рынка / А.М. Кумратова, Е.В. Попова, Д.Н. Савинская, Э.А. Гагай, В.А. Швеиц // Научный журнал КубГАУ. – Краснодар: издательство КубГАУ. – 2016. – № 122 (08). – С. 481-495. 6. Перепелица В.А. Использование методов нелинейной динамики для предпрогнозного анализа объемов стока горных рек / В.А. Перепелица, Е.В. Попова, А.М. Янгишиева, А.Д. Салпагаров // Экономический вестник научных центров ЧЭС. – 2005. – № 1. – С. 73-84. 7. Hong L. Decomposition and Forecast for Financial Time Series with High-frequency Based on Empirical Mode Decomposition / L. Hong // Energy Procedia. – 2011. – Vol. 5. – P. 1333-1340. 8. Vařilová Z. The application of non-destructive methods to assess the stability of the national nature monument of the Pravčická Brána Rock Arch, Czech Republic / Z. Vařilová, J. Zvelebil, F. Hubatka, V. Beneš, J. Frolka // AUC Geographica. – 2014. – №. 1. – P. 49-59. 9. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение / Г. Шустер. – М.: Мир, 1988. – 240 с. 10. Лопатников Л.И. Экономико-математический словарь / Л.И. Лопатников. – М.: Наука, 1987. – 510 с.

References:

1. Chikina, N.A., and Antonova, I.V. (2007), "Investigation of the influence of internal risk factors on the development of allergic dermatoses in workers of chemical-pharmaceutical enterprises", *Herald of NTU "KhPI", Series: Informatics and modeling*, Kharkov, NTU "KhPI", No 19, pp. 195-200.
2. Antonova, I.V., and Chikina, N.A. (2015), "Application of fractal analysis methods to the study of time series", *Herald of NTU "KhPI", Series: Informatics and modeling*, Kharkov, NTU "KhPI", No 32 (1141), pp. 4-10.
3. Tebueva, F.B., Perepelitsa, V.A., and Kabinyakov, M.Yu. (2013) "Decomposition and forecasting of times series with long-term correlations", *News of SFedU: Engineering sciences*, Rostov n / D., No 1 (138), pp. 111-120.

4. Perepelitsa, V.A. and Popova, E.V. (2002), *Mathematical models and methods of risk assessment of economic, social and agrarian processes*, Publishing house Growth, University, Rostov n / D ., 208 p.
5. Kumratova, A.M., Popova, E.V., Savinskaya, D.N., Gagay, E.A., and Shvets, V.A. (2016), "Analytical tools of vector risk assessment of the financial market", *Scientific Journal of KubSAU*, No. 122 (08), pp. 481-495.
6. Perepelitsa, V.A., Popova, E.V., Yangishiyev, A.M., and Salpagarov, A.D. (2005), "Use of methods of nonlinear dynamics for a prediscouted analysis of the volume of mountain rivers run off ", *The economic bulletin of BSEC scientific centers*, No 1, pp.73-84.
7. Hong, L. (2011), "Decomposition and Forecast for Financial Time Series with High-frequency Based on Empirical Mode Decomposition", *Energy Procedia*, Vol. 5, pp. 1333-1340.
8. Vařilová, Z., Zvelebil, J., Hubatka, F., Beneš, V., and Frolka, J. (2014), "The application of non-destructive methods to assess the stability of the national nature monument of the Pravčická Brána Rock Arch, Czech Republic", *AUC Geographica*, No 1 , pp. 49-59.
9. Schuster, G. (1988), *Deterministic chaos: Introduction*, Mir, Moscow, 240 p.
10. Lopatnikov, L.I. (1987), *Economic and mathematical dictionary*, Nauka, Moscow, 510 p.

Статью представил д-р техн. наук, профессор НТУ "ХПИ" Поворознюк А.И.

Поступила (received) 17.04.2017

Antonova Irina, Cand.Sci.Tech, Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-60-87, e-mail: antonova2601@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-1268-8223

Chikina Natalia, Cand.Sci.Tech, Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-66-93, e-mail: chikina_na@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-1746-1271

УДК 519.246.8

Застосування характеристик квазіциклів фазових портретів у передпрогнозному аналізі часових рядів / Антонова І.В., Чікіна Н.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 5 – 13.

В роботі представлені результати застосування графічних тестів для передпрогнозного аналізу часових рядів, що характеризують рівень захворюваності на алергодерматози у робочих підприємств хіміко-фармацевтичної галузі України. Метод заснований на розкладанні фазових портретів часових рядів на квазіцикли, характеристики яких дозволяють оцінити ризик помилкового прогнозування. Для посилення структурованості даних пропонується провести процедуру агрегування часових рядів. Ил.: 5. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: графічний тест; передпрогнозний аналіз; алергодерматози; фазовий портрет; квазіцикл; агрегування часових рядів.

УДК 519.246.8

Применение характеристик квазициклов фазовых портретов в передпрогнозном анализе временных рядов / Антонова И.В., Чикина Н.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 5 – 13.

В работе представлены результаты применения графических тестов для передпрогнозного анализа временных рядов, характеризующих уровень заболеваемости алергодерматозами рабочих предприятий химико-фармацевтической отрасли Украины. Метод основан на разложении фазовых портретов временных рядов на квазициклы, характеристики которых позволяют оценить риск ошибочного прогнозирования. Для усиления структурированности данных предлагается провести процедуру агрегирования временных рядов. Ил.: 5. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: графический тест; передпрогнозный анализ; алергодерматозы; фазовый портрет; квазицикл; агрегирование временных рядов.

UDC 519.246.8

Application of quasi-cycle characteristics of phase portraits in the prediction of time series analysis / Antonova I.V., Chikina N.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 5 – 13.

The paper presents the results of the use of graphical tests for the pre-forecast analysis of time series characterizing the allergodermatosis incidence of workers in the chemical and pharmaceutical industry in Ukraine. The method is based on the decomposition of phase portraits of time series into quasi-cycles, the characteristics of which allow estimating the risk of erroneous forecasting. To strengthen the structuredness of the data, it is proposed to carry out the procedure of aggregating time series. Figs.: 5. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: graphical test; pre-forecast analysis; allergodermatosis incidence; phase portrait; quasi-cycle; aggregation time series.

Doğan Sağlam, Master Std., Yıldız Technical University, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey,

Barış Sevim, Assoc. Prof. Dr., Yıldız Technical University, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey

THE EFFECTS OF LEAD RUBBER BEARING (LRB) SYSTEMS ON THE EARTHQUAKE RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDING

The base isolation systems set sight on mitigating the effects of forces triggered by an earthquake through neutralizing the interaction between building and ground by means of earthquake isolators. This study aims to determine the effects of base isolation systems on the earthquake response of a high-rise building. In the content of the study firstly the high-rise building is designed for different sized isolators under the framework of earthquake isolator technique, and then scrutinize the earthquake response of the same building by comparing its configurations equipped with different sized isolators and fixed support. The building has 122.5 m tall and 35 stories and $16 \times 20 \text{ m}^2$ habitable inner space, which is properly considered in line with vertical settlement movement widely seen in the world metropolises, is punctiliously designed and diffusively probed within the concept of fixed support. During the following stage, 2 different diameter size of 21 cm. tall lead rubber bearings are added to the structure, its unpredictable behaviors and forces transferred to the building under 1999 Kocaeli Earthquake highlighted from the study that LRB systems provide better structural response to building compared to fixed system, and then the critical parameters such as acceleration, lateral displacements, base and shear forces are compared with each other. Figs.: 9. Table 1. Refs.: 13 titles.

Keywords: base isolation; lead rubber bearing system; earthquake response; high-rise building.

Problem statement and literature analysis. The earthquake has been the most significant and hazardous disaster that is always kept in mind to avoid of its impacts when it comes to construct a building in the history of human being. There are a lot of factors and situations that may cause damage on the structures during an earthquake. In the low-rise structures with a lower natural period, there occurs a threat of resonance because of the adjacency of building period to base period, while in the high-rise buildings the rigidity of structure is critically affected by the increased bending moment and shearing force because of the nonlinear behavior of structure caused by the motions of lower and upper stories during the vibration of building [1].

Thanks to advanced construction technologies, there is a wide range of alternatives to absorb the energy of an earthquake nowadays. Today, it is possible to improve the seismic performance of a structure through absorbing some of the energy entering to architectonics by means of various components like base isolation systems added to the structure [2]. The

method of seismic isolation mitigates the interaction between building and ground, and separates the upper structure from the ground motions by placing certain equipment that are capable of displacement – vertically rigid but horizontally elastic – on the base of structure [3]. More often than not, the horizontal components of an earthquake are severer than its vertical components. To this respect, the seismic isolators used in the earthquake resistant design of structures are usually planned in a way to have a lower lateral stiffness but a higher vertical stiffness. Thus and so, an isolated structure behaves like a pendulum with a single degree of freedom on the horizontal direction.

With a meticulous design taking into account the relation of mass-rigidity-frequency in the single degree of freedom systems, it is possible to design a base-isolated structure with a certain mass in a way to have a natural frequency that is far enough from the dominant frequencies of ground motions [2].

Through the help of a seismic (base) isolation system, a structure is able to demonstrate both enough elasticity to make big displacements and a rigid motion at the upper structure, as it will be independent of the ground. Thanks to this characteristic added to structure by the isolators, the various effects such as story translations, story momentums, shear forces applied to structure, and bending moments are considerably limited. As the higher modes causing substantially cross-sectional effects in a fixed support structure would fail to go with the motion (structural behavior) because of base isolation, the structure will be less exposed to the cross-sectional effects caused by higher modes. In Fig. 1, the behavior of a structure with anisolated and fixed support base is schematically exhibited.

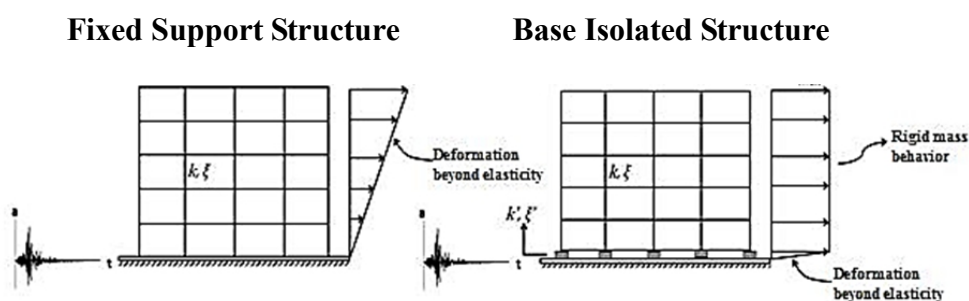


Fig. 1. The schematically exhibition of the behavior of a structure with fixed support and isolated base [4]

When fig. 1 is closely examined, it is seen that the internal forces in a structure with base isolation triggered by the effects of earthquake forces are likely to decrease in a businesslike manner.

The purpose of the article is to study the behavior of high-rise buildings during earthquakes, depending on the type of seismic isolation.

Numerical application. Description of High-Rise Building and Finite Element Modeling.

Within the scope of this study, a high-rise building with 122,5 meters tall and 35 story concrete construction with a base area of $16 \times 20 \text{ m}^2$ is selected. The plan view of the structure is shown in the fig. 2 *a*. As seen in fig. 2 *a*, *b*, the structure is designed to have four spacing in both directions. The concrete curtains are located at each of the four corners (5, A-B; 5, D-E; A, 4-5; E, 4-5; 1, A-B; 1, D-E; A, 1-2; E, and between the axes of 1 and 2) and around the elevator shaft (4, C-D; 3, C-D; D, 3-4), and then the finite element model of structure is set up by the help of an SAP2000 software (Fig. 2 *b*).

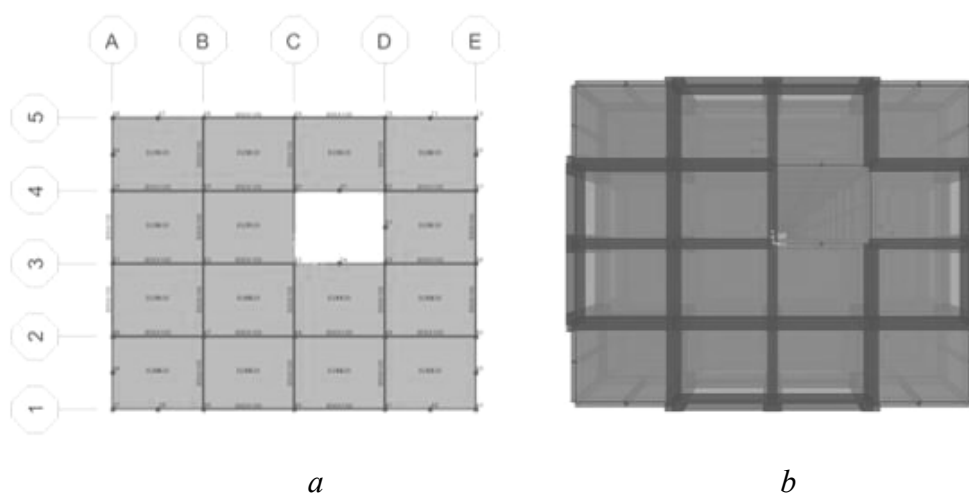


Fig. 2. *a* – Plan of selected concrete structure; *b* – Location of concrete curtains in finite element model

In this paper, it is targeted to determine the earthquake behavior of high-rise fixed support structures with seismic isolation. The blueprint of the model created for this purpose related with fixed support structure with seismic isolation is grounded on design spectrum (Fig. 3) – actually called as Uniform Building Code 1997 [5].

Accordingly, the columns with size of $80 \times 90 \text{ cm}^2$ and the beams with size of $50 \times 100 \text{ cm}^2$ are used, the floor height of 20 centimeters and the curtain width of 30 centimeters are selected, and C25-30 concrete as the material of construction and S420 steel as the reinforcement are preferred. There are 35 isolators placed between structure and ground as a result of design calculations of seismic isolated structure. According to the output of

calculations, the finite element models are formed through designing 2 different diameter size of 21 cm tall lead rubber bearings (74, and 90 centimeters).

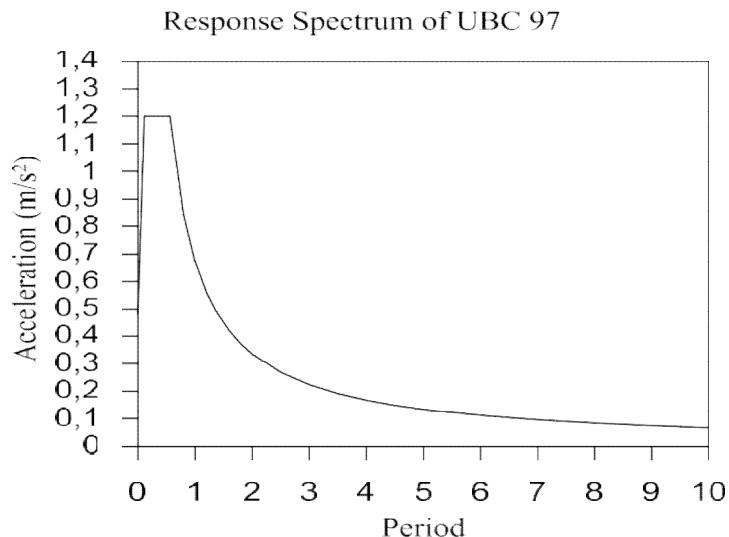


Fig. 3. Uniform Building Code 1997 earthquake design spectrum

In the design of isolators, the weights formed on structural bearings are obtained by the combination of 1,0 DL + 0,3 LL (1,0 Dead Load + 0,3 Live Load), and it is observed that the maximum of these values is 11871.29 kN, while the minimum of them is 4000.37 kN as seen in fig. 4. According to the findings of analysis, there are different sizes of support reactions formed at the base-column and base-curtain wall intersections. In compliance with the analysis, the structure effective period is realized as $T = 2.94$ s.

As the base layout is more limited and the interior constructional area should be used at maximum efficacy in the skyscraper style buildings like the structure in this study, there are far fewer number of columns standing on the ground. Thus, there will be pretty much vertical load on the base isolators to be placed. And, it will indispensably cause a compression pressure and a threat of torsion on the isolators. In order not to let that happen, it is mandatory to make designs by taking into account the isolator capacity, and vertical and horizontal loads during the calculation of structure, and consider the different types of base isolation systems instead of a single type of isolator in the case of design change is not an option.

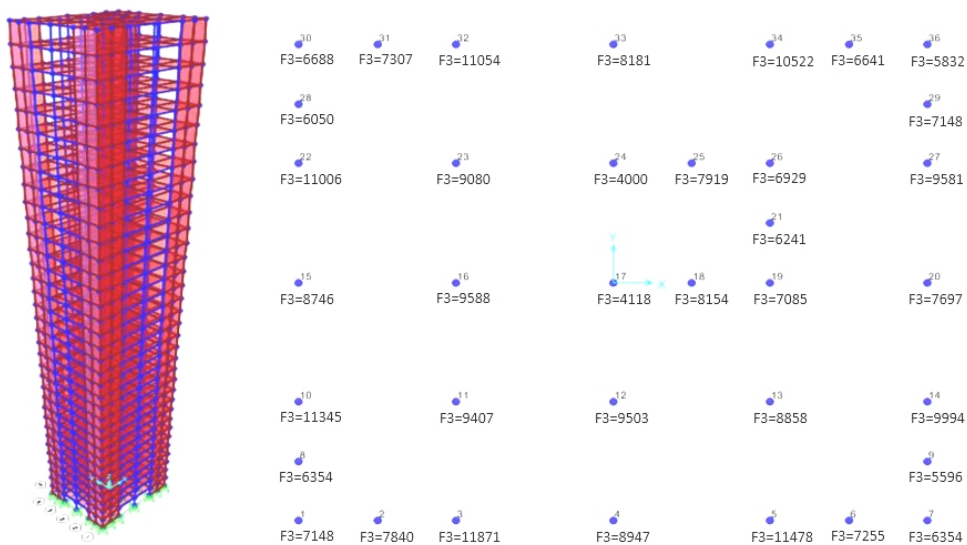


Fig. 4. The analysis findings at 0 (zero) elevation with respect to three-dimensional construction model and 1.0DL+0.3 LL combination of fixed support construction model

In the text and tables residing in the rest of study, the 21 cm tall isolator with 90 cm diameter will be denoted as KÇİ21.a, while the isolator with 74 cm diameter as KÇİ21.b (Fig. 5). In order to realistically evaluate the capacity and performance of the design and modeling conducted in this study, the information and tables subjected to experiment in the labs of California University, San Diego and delivered to the administration after the preparation of audit certificate within the concept of necessary items of IBC's [6] specification related with the structure's seismic isolation during the construction of Erzurum State Hospital are used [7].

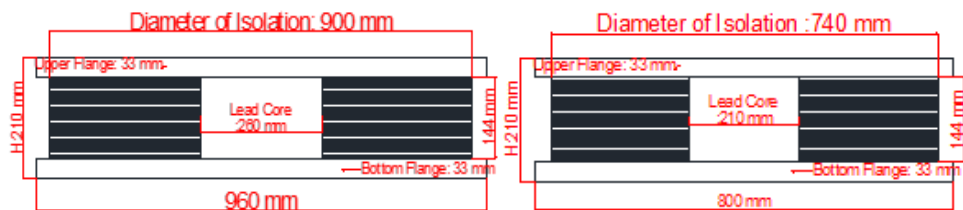


Fig. 5. The 21 centimeters long lead rubber bearing with diameters of 74 and 90 centimeters

The formulas and tables given in UBC 97 (Uniform Building Code, 1997) are used to determine the specifications of isolator. The earthquake zone is selected as No. 1 earthquake zone, and $A_0 = 0.40$ (UBC 97 $Z = 0.40$). $S_c -$

dense sand and soft rock – is selected as the soil profile type UBC 97. By considering the near fault effect, equations of $N_a = 1.2$ and $N_v = 1.2$ are assumed.

During the estimation of damping ratio, there is no need to use high damping rubber in the lead rubber bearing as enough dumping will be acquired due to the lead core at the heart of isolator. Therefore, the dumping ratio is taken as 20%, and the corresponding damping coefficients BD and BM are assigned the value of 1.5 [2].

The coefficients are assigned values as: lateral load coefficient, $RL = 2$, fixed in structure lateral load coefficient, $R = 8$, and the building significance coefficient, $I = 1$.

Earthquake Response of the High-Rise Building. In order to identify the earthquake behavior of the building, the spectrum obtained for 5% of damping ratio in the accelerogram produced from İzmit Meteorological Station about 1999 Kocaeli earthquake is applied to the structure in X and Y directions. The time histories of the acceleration record are given fig. 6 *a*, while the spectrum graph of record in fig. 6 *b*.

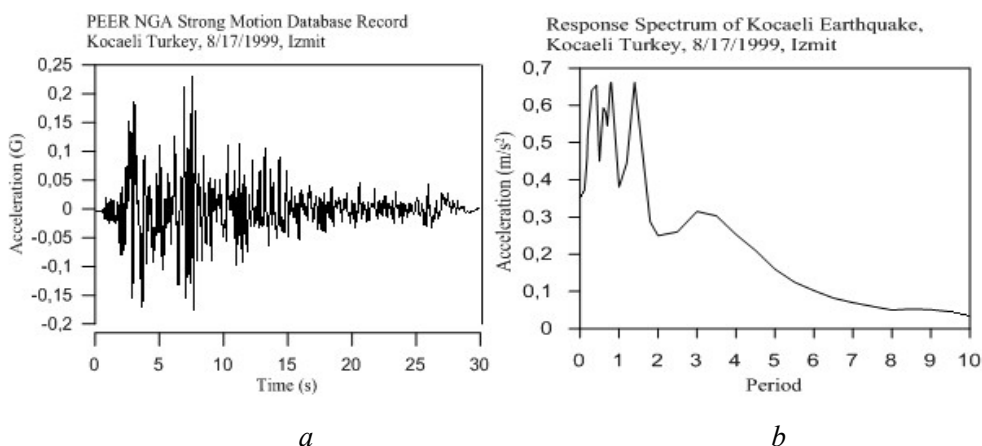


Fig. 6. *a* – Time histories of acceleration record; *b* – Response spectrum graph

According to the analysis results of fixed support structure subjected to vertical load, there is a difference of value up to 2 – 3 times between maximum and minimum normal force that are calculated at the level of structural bearing. In terms of structure cost and factualness of study, No. 1 and 2 nodal points (fig. 4) are assigned two isolator designs with the same height but different diameters with respect to the vertical load values of 7840 kN and 11871 kN respectively.

According to the modal analysis results of fixed support model, the structure effective period is calculated as $T = 2.94$ s. If a structure with that

period is subjected to a seismic isolation to pull up the structure period to the levels of 4.5 – 5 s, then it is assumed that the isolators designed in this way will have a higher degree of average excess strength than the isolators designed for 4 – 7 storied structures.

The fixed support structure model is attached 21 centimeters long isolators with diameters of 90 and 74 centimeters, and the forces of acceleration, displacement, and shear forces are obtained by iterating the analysis. Accordingly, the new value of period has changed as $T = 4.99$ s.

As a result, the following values are obtained: the maximum acceleration value of structure: 3,874 m/sn², the maximum displacement in the direction of U1: 1.23 meters, and U2: 1.352 meters, and the shearing forces F1, F2, F3: 2685 kN, 2510 kN, 66390 kN respectively.

In the Table 1, the analysis result and comparison of fixed support system and the systems with KÇİ21.a and b are shared.

Table 1

Comparison of the values of Acceleration, Displacement, and Shearing force belonging to fixed support and seismic isolated models of structure.

	ACCELERATION (m/sn ²)			DISPLACEMENT (m)			SHEARING FORCE (kN)		
	U1	U2	U3	U1	U2	U3	F1	F2	F3
Fixed Model	10,140	9,910	2,740	0,701	1,036	0,102	7799,58	8314,14	74286,04
h=21cm	3,066	3,874	0,498	1,230	1,352	0,096	2684,36	2510,88	66388,40
Iso.									
Reduction Percent	69,76%	60,91%	81,82%	-75,47%	-30,47%	5,45%	65,58%	69,80%	10,63%

As compared with the fixed support system, the maximum accelerations occurred in the directions of U1, U2, and U3 on the floors of structure for KÇİ21 decrease by 68%, 59%, and 81% respectively. And, it means that the felt magnitude and motion of an earthquake are mitigated by the absorption of energy to a great extent during an earthquake motion.

As can be seen in the Table 1, the maximum acceleration values acting on the structure decrease by 61% and 81%. When looked at the acceleration graph related to story height in the fig. 7, it is recognized that the higher acceleration differences among the stories are eliminated by the implementation of seismic isolation. In the fixed root model, the average acceleration acting on the structure has seriously faltered, and the amounts of increase and decrease in acceleration have been at pretty low level as the height scales up

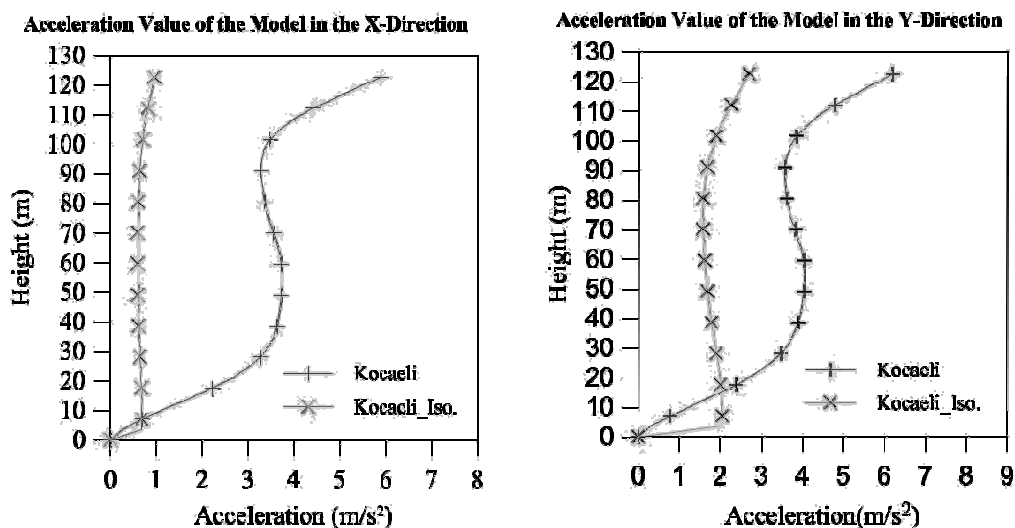


Fig. 7. Comparison of fixed support model with the acceleration values of KÇİ.21 isolator in X and Y directions

In the fig. 8, the displacement graph of fixed root and base isolated system dependent on the structure height is given. Accordingly, it is observed a rise in the amount of displacement in the structure by 75%, and 30% in the directions of U1 and U2 respectively. When it is probed with that point of view, it is concluded that the existing seismic isolator implementation designed has no positive impact on the displacement performance of structure. For a better performance, it might be tried to increase the height of isolator, or choose a rubber material that is capable of making a higher rate of shift unit displacement, or refer a design that the seismic isolation implementation is supported by dampener devices.

Here, the biggest question for KÇİ21 is whether the structure will meet the average maximum displacement of 50 centimeters at the isolator level. When the displacement ratio of %238 in Table 1 is taken as a reference, the isolator of KÇİ21 might exactly meet a displacement of 49.38 centimeters. However, that would be quite on the fringe. Although our structure design can meet the energy that the isolator fails to absorb, choosing an isolator with height in the range of 35 – 40 centimeters would both meet the translation at the isolator level and make sure to produce a more economical solution in order not to take the risk of breaking the isolator and adherence of isolator-base and isolator-column and decreasing the amount of horizontal displacement to make sure that the earthquake isolator exactly achieves its mission.

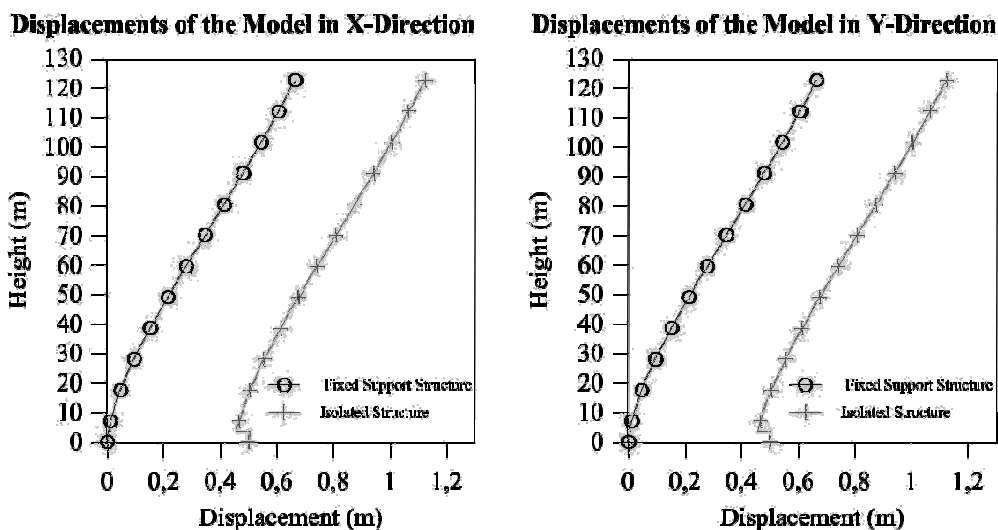


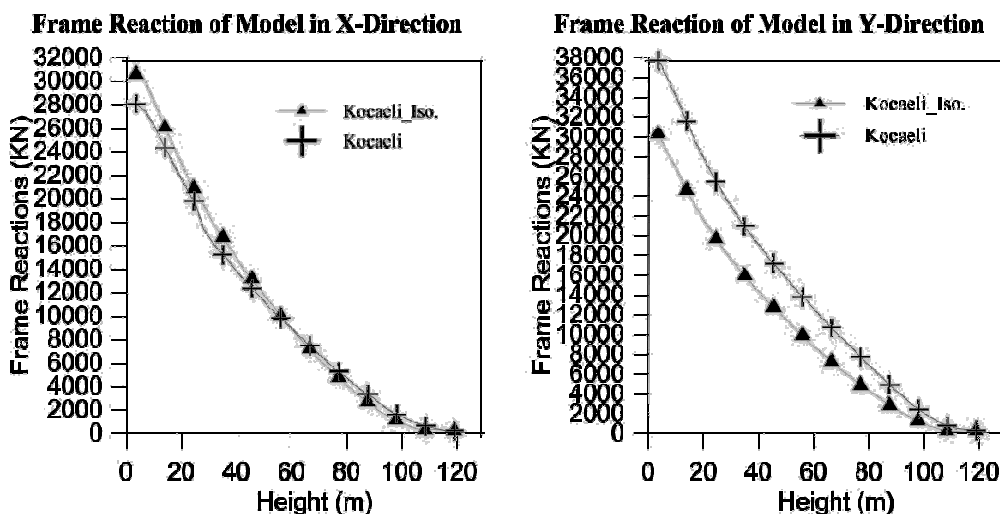
Fig. 8. Comparison of fixed support model with the displacement values of KÇİ.21 isolator in X and Y directions

The systems analyzed are sifted through, it is comprehended that the shearing forces that on the joints applied to the floors in the base isolated structures tend to exhibit lower values in the directions of F1, F2, F3 at the ratios of 65.58 %, 69.80 %, and 10.63 % respectively than that of fixed support structures. The reason is that the earthquake motion including different displacements between columns is largely absorbed through cutting the connection between structure and ground via seismic isolators.

In the fig. 9, the graph of frame reaction that fixed root and base isolated system dependent on the structure height is given. Accordingly, it is observed probably a same in the amount of frame reaction in X- Direction in the structure, when looked at the graph of frame reaction of model in Y- Direction related to story height in the fig. 9, it is recognized that the higher frame reaction differences among the stories are eliminated by the implementation of seismic isolation.

As can be seen in the comparison of fixed support model, the amount of displacement increases by 75% and 30% in the directions of U1 and U2 respectively. Actually, this is an expected behavior model for a high-rise structure that is enabled to move and separated from the base, which permanently interacts with the ground. When the model mentioned in the study is analyzed with respect to its compliance with seismic isolation, we face with a less number of spacing and a smaller footage of housing space than that of a 35-story structure, and we also face with greater displacements than that of fixed support structures when this case is coincided with releasing

the columns and curtain walls from the ground. Depending on the height and material specs, the isolator has a capability of damping the displacement motion. And, this means that the relative floor adding in the seismic isolated models is likely to realize less than the fixed support structure model.



Frame Reaction of Model in X-Direction Frame Reaction of Model in Y-Direction

Fig. 9. Comparison of fixed support model with the frames shearing forces that values of KÇİ.21 isolator in X and Y directions

The structure is never exposed to over internal forces, because 35 individual structural bearings on which the structure is seated are all independent from the ground. That is to say, the structure behaves in a nonlinear way when an earthquake motion is detected in a fixed root system. In other words, there occur different internal forces and displacements in different floors. In this case, a rigid structure tied to the ground is subjected to higher shearing force and torsional moment. When we separate our structure from the ground by means of isolators, then the great majority of those different displacements and the horizontal motions of earthquake are absorbed by isolators, and our upper structure tends to show a rigid behavior as a whole, and it is observed serious increments in the absorption capacity of structure. The high rate of decrease in the shearing force is likely to provide an extra endurance to our structure against the axial tensions stemmed from overturning moment.

Conclusions. In line with the primary objective of the study, it is aspired to investigate the functionality of seismic isolation implementation in

the structures with a period of 3 and above at the design of high-rise and fixed support structure. The following conclusions obtained from the study are summarized as:

1. The acceleration obtained due to earthquake on the x and y direction of the building are generally increased through the bottom to top for fixed system. However, accelerations are similar to each other from bottom to top of the isolated system. Also the maximum acceleration values are obtained on the isolated system as 3 – 4 times smaller than those of fixed system.

2. The displacements obtained for both fixed and isolated systems are increased from the bottom to top of the building in x and y directions. Also, relative displacements are similar for both fixed and isolated system. This mean that isolated system behaves as fixed system, because the height of the isolators (21 cm) are not suitable such a high rise building (122,5 m) when considered displacement changes.

3. The frame reaction obtained due to earthquake on the x direction of the building is probably same through the bottom to top for fixed and isolated system. However, for isolated system the frame reaction obtained due to earthquake on the y direction of the building is smaller than those fixed system. Also the frame reaction values are obtained on the isolated system is little bit smaller than those of fixed system.

4. Should we evaluate the study as a whole, the seismic isolators placed in the fixed support structure model seriously improve the performance of structure through decreasing floor shearing forces and floor accelerations. Thus, the cross-sections inside the structure will be exposed to pretty lower level of strains following a possible earthquake, the risk of torsion will be largely avoided, and the structure will display a more robust performance against axial tensions. Besides, the structure gaining freedom as a result of disengagement with ground has achieved a higher displacement as compared to the fixed support model. Among the reasons of this displacement performance is the structure geometry, working on a model with a pretty higher structure than that of recommended for a seismic isolation implementation, choosing an isolator with lower height, and few number of spacing in both of the directions.

References:

1. Christopher, Arnold (2006), "The Impact of Earthquake on Structures 4", *Designing for Earthquakes A Manual for Architects*, pp. 111-137.
2. Yücesoy, A. (2005), "The Earthquake Resistant Design with Isolators", *The Publications of Higher Education and Research Foundation*, Antakya, Turkey, 142 p.
3. Priestley M.J.N., Calvi, G.M., and Kowalsky M.J. (2007), "Displacement Based Seismic Design of Concrete Structures", *Proc. 3rd Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Girona, Spain*, Vol. 3, pp. 30-53.
4. TIS (Teknolojik İzolatör Sistemleri), (2016), <http://www.tis.com.tr>.
5. UBC 97 (1997), "Uniform Building Code 97", *International Code Council*, United State

of America, 1997, Vol. 2, 545 p.

6. IBC 2015 (2015), "2015 International Building Code", *International Code Council*, Vol. 3, 1332 p.

7. Erdik, M. (2007), "Earthquake Isolation in Buildings and Its Implementations in Our Country", *The Sixth Conference of National Earthquake Engineering, İstanbul, Turkey*, Vol. 6, pp. 186-205.

8. Dicleli, M. (2013), "Technical Developments about Seismic Isolation and Energy Absorber Systems, and Special Applications for Improving Seismic Performance", *The Symposium of Earthquake Isolation Methods and Implementations, Ankara, Turkey, February 28-March 1*, Vol. 28, pp. 20-23.

9. Şengel, H.S. Erol, H., and Yavuz, E. (2009), "The Seismic Isolation Technique and a Sample Implementation", *Eskişehir Osmangazi University Journal of Engineering & Architecture Faculty, Eskişehir, Turkey*, Vol. 22, Issue. 2, pp. 166-178.

10. Neufert, Ernst (2012), "Structure Design", *35th Translation from Print*, Vol. 1, Issue. 35, 608 p.

11. Özpalanlar C.G. (2004), "The Seismic Isolation and Energy Absorber Systems in The Design of Earthquake Resistant Structures", *Master's Thesis, İstanbul Technical University Department of Civil Engineering, İstanbul, Turkey*, pp. 163-175.

12. TBDY, (2016), "Turkey Structures Earthquake Code", Ankara, Turkey, Vol. 1, 379 p.

13. Hoşbaş, A.B. (2006), "The Modeling of a High-Rise Concrete Structure with Seismic Isolators, and The Comparison of Structure with The One Reinforced with Curtains", *Master's Thesis, İstanbul Technical University Department of Civil Engineering, İstanbul, Turkey*, pp. 112.

The article was introduced by Dr. Tech. Sciences, Professor, Vice - rector, NTU "KhPI" Veliyev Eldar.

Received 18.04.2017

Doç. Dr. Barış Sevim

Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü

İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2-026

34220 Davutpaşa Mahallesi, Davutpaşa Caddesi Pk: 34220, Çiftelavuzlar,

Esenler, İstanbul, Türkiye

Tel: +90 (212) 383 5191, e-mail: basevim@yildiz.edu.tr

İnş. Müh. Doğan Sağlam

Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü

İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2-026

34220 Davutpaşa Mahallesi, Davutpaşa Caddesi Pk: 34220, Çiftelavuzlar,

Esenler, İstanbul, Türkiye

Tel: +90 537 782 8780, +90 212 560 3436, e-mail: dogansaglam@yandex.com

ORCID ID: 0000-0003-0712-2695

УДК 699.841

Вплив систем освінцованих амортизаторів (COA) на поведінку висотної будівлі під час землетрусу / *Sağlam Doğan, Sevim Barış* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 14 – 27.

Система ізоляції бази призводить до зменшення впливу сил, викликаних землетрусом, за допомогою нейтралізації взаємодії між будівлею і землею за допомогою сейсмоамортизаторов. Мета цього дослідження – визначити вплив систем ізоляції бази на реакцію висотної будівлі під час землетрусу. Досліджуються висотна будівля з амортизаторами землетрусів різних розмірів, які призначені для ізоляції землетрусів, а потім ретельно вивчають реакцію на землетрус в цьому ж будинку, порівнюючи її при використанні ізоляторів різних розмірів і нерухомих опор. Будівля має 122,5 м в висоту і 35 поверхів, а також житловий простір розмірами 20×16 м², для якого виконані розрахунки вертикального руху, прийняті для висотних будівель мегаполісів. Ці розрахунки детально розроблені і поширені в рамках концепції нерухокої опори. Досліджуються діючі на будівлю сили землетрусу, яке мало місце в Коджаелі в 1999 році. У дослідженні підкріплюється, що система з освінцованими амортизаторами забезпечує кращу структурну реакцію з'єднання в порівнянні з нерухомими опорами. Порівнюються між собою такі критичні параметри як прискорення, бічний зсув, базисні і поперечні сили. Іл.: 9. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: ізоляція бази; система освінцованих амортизаторів; реакція на землетрус; висотна будівля.

УДК 699.841

Влияние систем освинцованных амортизаторов (COA) на поведение высотного здания при землетрясении / *Sağlam Doğan, Sevim Barış* // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 14 – 27.

Система ізоляції бази приводить до зменшенню впливу сил, вызваних землетрясением, посредством нейтрализации взаимодействия между зданием и землей с помощью сейсмоамортизаторов. Цель этого исследования – определить влияние систем изоляции базы на реакцию высотного здания при землетрясении. Исследуется высотное здание с амортизаторами землетрясений различных размеров, предназначенное для изоляции землетрясений, а затем тщательно изучают реакцию на землетрясение в этом же здании, сравнивая ее при использовании изоляторов различных размеров и неподвижных опор. Здание имеет 122,5 м в высоту и 35 этажей, а также жилое пространство размерами 16×20 м², для которого выполнены расчеты вертикального движения, принятые для высотных зданий мегаполисов. Эти расчеты детально разработаны и распространены в рамках концепции неподвижной опоры. На следующем этапе два различных по высоте амортизатора из освинцованной резины диаметром 21 см добавляются в структуру здания. Исследуются действующие на здание силы землетрясения, которое имело место в Коджаэли в 1999 году. В исследовании подчеркивается, что система с освинцованными

амортизаторами обеспечивает лучшую структурную реакцию строения по сравнению с неподвижными опорами. Сравниваются между собой такие критические параметры как ускорение, боковое смещение, базисные и поперечные силы. Ил.: 9. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: изоляция основания; система освинцованных амортизаторов; реакция на землетрясение; высотное здание.

UDC 699.841

The effects of lead rubber bearing (LRB) systems on the earthquake response of high-rise building / *Sağlam Doğan, Sevim Barış* // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 14 – 27.

The base isolation systems set sight on mitigating the effects of forces triggered by an earthquake through neutralizing the interaction between building and ground by means of earthquake isolators. This study aims to determine the effects of base isolation systems on the earthquake response of a high-rise building. In the content of the study firstly the high-rise building is designed for different sized isolators under the framework of earthquake isolator technique, and then scrutinize the earthquake response of the same building by comparing its configurations equipped with different sized isolators and fixed support. The building has 122.5 m tall and 35 stories and 16×20 m² habitable inner space, which is properly considered in line with vertical settlement movement widely seen in the world metropolises, is punctiliously designed and diffusively probed within the concept of fixed support. During the following stage, 2 different diameter size of 21 cm. tall lead rubber bearings are added to the structure, its unpredictable behaviors and forces transferred to the building under 1999 Kocaeli Earthquake highlighted from the study that LRB systems provide better structural response to building compared to fixed system, and then the critical parameters such as acceleration, lateral displacements, base and shear forces are compared with each other. Figs.: 9. Refs.: 13 titles.

Keywords: base isolation; lead rubber bearing system; earthquake response; high-rise building.

К.О. БАЗІЛЕВИЧ, канд. техн. наук, ас., НАУ "ХАІ", Харків,
М.С. МАЗОРЧУК, канд. техн. наук, доц., НАУ "ХАІ", Харків,
Ю.Л. ПАРФЕНЮК, магістр, НТУ "ХПІ", Харків

МОДЕЛЮВАННЯ ФІНАНСОВИХ ПОТОКІВ НЕДЕРЖАВНОГО ПЕНСІЙНОГО ФОНДУ ДЛЯ ГРУПИ УЧАСНИКІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ПЛАТОСПРОМОЖНОСТІ

Розглядається класичний підхід до моделювання фінансових потоків недержавного пенсійного фонду, проводиться аналіз недоліків такого підходу. Розроблено модель фінансових потоків недержавного пенсійного фонду для групи учасників з урахуванням їх платоспроможності. Наведено опис програмної реалізації розробленої моделі. Модель дозволяє підвищити точність моделювання завдяки аналізу контекстуальних характеристик страхувальників, які мають суттєвий вплив на їх платоспроможність. Лл.: 3. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: недержавний пенсійний фонд; платоспроможність; контекстуальні характеристики; фінансові потоки.

Постановка проблеми і аналіз літератури. Договори пенсійного страхування, що укладаються за рахунок коштів громадян або їх роботодавців, з одного боку, підвищують рівень життя пенсіонерів, а з іншого – знижують фінансове навантаження на державу [1]. Управління фінансовим станом фонду пенсійного страхування пов'язане з безліччю невизначеностей і ризиків: імовірність настання того чи іншого страхового випадку, кількість позовів, що надходять в страхову компанію за певний проміжок часу, тривалість життя і стан здоров'я конкретного страхувальника, процес інфляції і прибутковість інвестицій. Крім того, пенсійне страхування завжди є довгостроковим, а отже найбільш важкопрогнозованим видом особистого страхування.

Для аналізу і прогнозування впливу невизначених факторів у пенсійному страхуванні, а також для розрахунку страхових показників пропонується застосовувати математичне моделювання, а також відповідне програмне забезпечення з підтримкою хмарних технологій. Хмарні технології у пенсійному страхуванні ще не повністю реалізували свій потенціал в Україні, як у інших галузях застосування. Частково це зумовлено тим, що страхові компанії змушені використовувати застарілі системи обробки даних, а переорієнтування на роботу з хмарними сервісами потребує часу. Однак ситуація змінюється і страховики починають використовувати хмарне програмне забезпечення як найбільш перспективні рішення, про що свідчить аналіз останніх публікацій [2 – 4]. Близько 48% компаній використовує у своїй діяльності хмарні сервіси, а

до 90% компаній планують використання хмарних технологій у перспективі за даними дослідницької компанії IDC [5]. Саме хмарне програмне забезпечення здатне задовольнити потребу у гнучкості, масштабованості, швидкості, прискорити реагування на зміни та оптимізувати процеси обробки даних, використання яких необхідне у страховій практиці.

Для кожного продукту сьогодні страховики зобов'язані побудувати модель середньостатистичного клієнта – в іншому випадку буде неможливо планувати страховий тариф та діяльність в цілому, для цього необхідний постійний аналіз особистих даних. Для побудови такої моделі клієнта та для зменшення похибок при моделюванні фінансових потоків необхідно враховувати дані про страхувальників. Важливим етапом опрацювання таких даних є аналіз контекстуальних характеристик, що мають безпосередній вплив на фінансові потоки [6], при цьому оцінюється вплив кожної характеристики на загальну платоспроможність, невагомі характеристики виключаються із розгляду.

Класичний підхід до моделювання фінансових потоків недержавного пенсійного фонду. У класичних моделях формування недержавного пенсійного фонду індивідуальних накопичень (НПФІН) для одного учасника [7] використовуються такі позначення: $t = 0, 1, 2, \dots$ – моменти актуарної оцінки НПФІН, z – номер страхового договору, f_{t_z} – фонд індивідуальних пенсійних накопичень на момент t , при $t = 0$ фонд вважається нульовим, x – вік страхувальника, q_x – імовірність смерті страхувальника в віці x , p_{t_z} – пенсійний внесок на момент t , b_{t_z} – величина пенсії, що виплачується у момент t .

Процес формування пенсійного фонду для індивідуального учасника віку x розділяється на два етапи (процес формування фонду показано на рис. 1).

Перший етап з моменту вступу в схему (при $t = 0$ учаснику на цей момент $x = a$ років, будь-який момент актуарної оцінки можна оцінити за формулою $t = x - a$) до моменту виходу на пенсію (учаснику на цей момент $x = R$ років). Даний період триває $P_R = R - a$ років. У цей період в пенсійний фонд постійно надходять внески від страхувальника, відбувається накопичення коштів на індивідуальному рахунку учасника.

Другий етап з моменту виходу на пенсію до моменту смерті. Даний період зазвичай обмежується граничним віком ω , передбачається, що імовірність дожиття до цього віку дуже мала. Даний період триває $P_\omega = \omega - R$ років. Відправною точкою вважається момент виходу на пенсію, внески до фонду приводяться до моменту у майбутньому за допомогою компаундування [8].

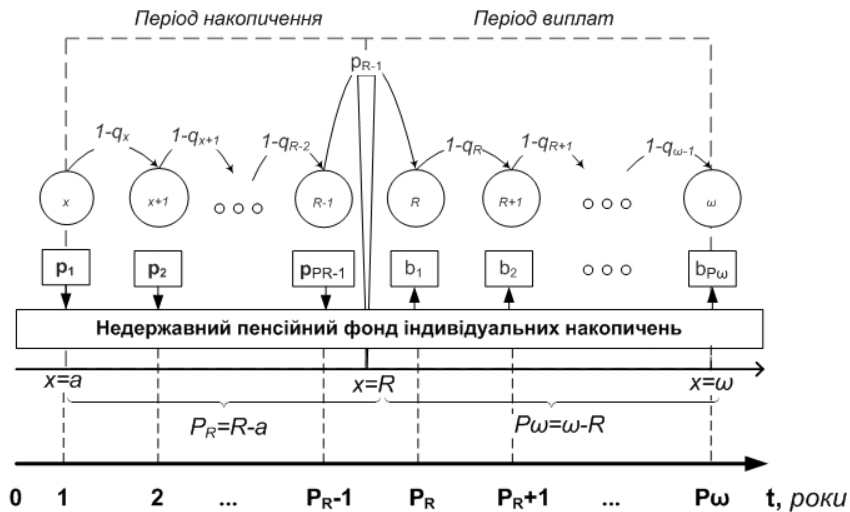


Рис. 1. Процес формування недержавного фонду індивідуальних пенсійних накопичень з моменту вступу в схему до моменту смерті

Основними недоліками класичних моделей у пенсійному страхуванні є: відсутність механізмів, які дозволяли б враховувати особисті характеристики страхувальників, що призводить до завищення тарифної політики страхових компаній, які проводять розрахунки централізовано; існуючі моделі дозволяють визначити імовірність настання дефіциту коштів, але не момент часу, коли це відбувається та їх обсяг; існують моделі, що дозволяють розрахувати величину страхової премії або пенсії, але відсутні моделі комплексного опису процесу формування фонду пенсійного страхування з урахуванням фактора часу та платоспроможності окремого страхувальника.

Метою статті є розроблення моделі фінансових потоків недержавного пенсійного фонду для групи учасників з урахуванням їх платоспроможності.

Основні результати. В рамках проведеного дослідження була розроблена модель фінансових потоків недержавного пенсійного фонду для групи учасників з урахуванням їх платоспроможності. Моделювання відбувається для аналізу динаміки фінансових потоків у моменти актуарної оцінки $-F_T$. Розглядається страховий фонд F_T у моменти актуарної оцінки $T \in \{T_{start}, T_{start+1}, \dots, T_{finish}\}$ з інтервалом дискретизації в один рік. На відміну від моделей, заснованих на групових методах фондування [9, 10], і моделі, наведеній в роботі [11], пропонується враховувати популяційну динаміку старіння під час формування фонду за

допомогою імовірностей дожиття до кожного року після досягнення пенсійного віку. При цьому загальний фонд пенсійних накопичень будується з окремих фондів індивідуальних, накопичень шляхом їх агрегування в певні моменти часу для отримання адитивних величин. Модель побудована на таких припущеннях: всі учасники вступають в схему в один момент часу, але при цьому знаходяться в різному віці, момент початку виплати пенсій у всіх учасників різний; до початку виплати пенсій відбувається накопичення певної суми, з якої потім виплачується пенсія. Якщо накопичена сума витрачається раніше, ніж настає смерть учасника, індивідуальний фонд пенсійних накопичень стає від'ємним, необхідна компенсація коштів з інших джерел (наприклад, з накопичень інших учасників); НПФІН кожного учасника фіксується в певні моменти – моменти актуарної оцінки. Зазвичай це моменти внесення внесків і виплати пенсій, їх можна вважати основними подіями, що відбуваються в системі; передбачається, що внески і виплати відбуваються синхронно або асинхронно для всіх страхувальників, у моменти актуарної оцінки розраховується адитивна величина НПФІН всіх учасників за допомогою агрегування, що дозволяє отримати загальну адитивну модель, що описує поведінку НПФІН в цілому для всієї групи страхувальників.

Розглянемо етапи побудови моделі. На першому етапі відбувається розрахунок платоспроможності страхувальників за допомогою класифікації страхувальників за платоспроможністю на основі аналізу контекстуальних характеристик. При цьому вік застрахованого x_z буде перебувати в інтервалі $x_z \in [a+1; R-1]$, де a – вік вступу в пенсійну схему, а R – пенсійний вік (див. рис. 1). На другому етапі формуються вхідні дані. Відбувається аналіз зовнішніх факторів впливу на фонд, збір і обробка інформації про контекстуальні характеристики. На третьому етапі відбувається моделювання або обробка популяційної динаміки старіння. На четвертому етапі відбувається вибір методу індивідуального фондування і розрахунок схеми надходження премій p_{t_z} для кожного року до пенсійного віку для $t \in 1 \dots P_R - 1$ в кожному окремому договорі страхування. Детальний опис процесу формування страхової премії на підставі відомих моделей і методів актуарної математики у пенсійному страхуванні наведено у роботі [9].

Розрахунок адитивної величини внесків НПФІН ${}_sP_t$ відбувається за формулою:

$${}_sP_t = \sum_{t=0}^{P_R-1} p_{t_z} \quad (1)$$

Розрахунок пенсії b_{t_z} для кожного року до граничного віку для $t \in R - a.. \omega - a$ відбувається за формулою:

$$b_{t_z} = b_{0_z} \cdot (1 + i')^{t - (R - a)}, \quad (2)$$

де b_{0_z} – початковий рівень пенсійних виплат, i' – процентна ставка. Побудова фонду для одного учасника відбувається на шостому етапі моделі в два кроки. Перший крок: надходження внесків і їх дисконтування: $f_{t_z} = (f_{t_z-1} + p_{t_z}) \cdot (1 + i')$ для $t \in 1 \dots R - a - 1, f_0 = 0$. Другий крок: виплата пенсій після досягнення пенсійного віку $f_{t_z} = (f_{t_z-1} - b_{t_z-1}) \cdot (1 + i')$ для $t = 0$. Розрахунок адитивної величини НПФІН у моменти актуарної оцінки для всіх учасників пенсійної схеми відбувається за допомогою агрегування.

$$F_T(f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tN}) = \sum_{z=1}^N f_{t_z}, \quad (t \geq T_{start}) \wedge (t < T_{finish}), \quad (3)$$

де N – кількість договорів в страховій схемі.

Схематично процес формування фінансових потоків загального фонду пенсійних накопичень відповідно до моделі представлений на рис. 2.

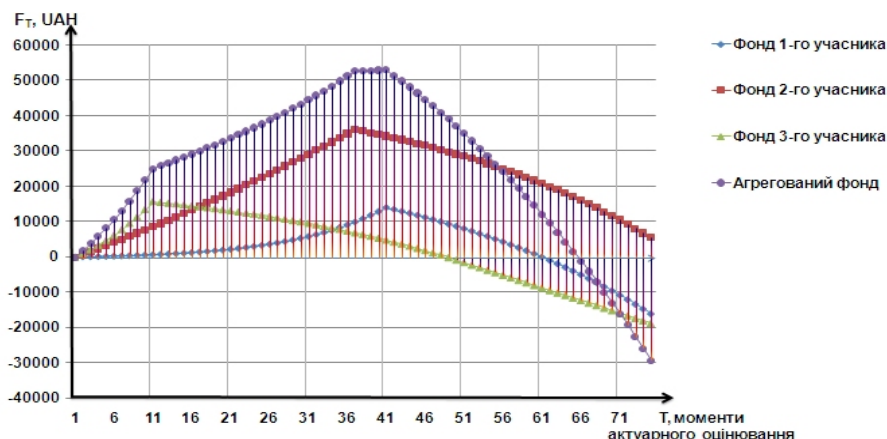


Рис. 2. Формування фінансових потоків агрегованого пенсійного фонду з фондів індивідуальних накопичень, $N = 3$

НПФІН частково перекриваються в часі, тому що початковий момент формування НПФІН у всіх страхувальників збігається, а кінцевий момент – залежить від віку, тому для кожного страхувальника буде різним. Агреговане значення фонду $F_T(f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tN})$ визначається за формулою (3) на інтервалі часу від моменту початку дії всіх НПФІН T_{start} і до моменту існування останнього НПФІН – T_{finish} . Підсумовування проводиться тільки за тими НПФІН, які перекриваються в часі. Після моменту досягнення граничного віку пенсійний фонд учасника вважається нульовим.

Модифікація формули для пенсійного страхування використовується під час агрегування НПФІН в разі компенсації страхових внесків за вирахуванням витрат на проведення страхування

$$F_T(f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tN}) = \sum_{z=1}^N f_{t_z} - \sum_{n=1}^{N_{i_t}} p_{t_n} \cdot t \cdot (1 - f_n),$$

$$(t \geq T_{start}) \wedge (t < R - a_z - 1),$$

де N_{i_t} – кількість договорів з неплатоспроможними страхувальниками до моменту моделювання t . За допомогою класифікації страхувальників за платоспроможністю на основі аналізу контекстуальних характеристик [6] розраховується величина $\rho(C)_z$, що визначає імовірність платоспроможності страхувальника в договорі z , де C – пояснююча змінна. Сам страховик визначає величину Lim_{liq} – допустимий рівень неплатоспроможності страхувальників. Якщо $\rho(C)_z < Lim_{liq}$ з імовірністю $1 - \rho(C)_z$ страховику необхідно буде виплачувати страхувальнику викупну суму S_{nt} у момент моделювання t , що описується формулою:

$$F_T(f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tN}) = \sum_{z=1}^N f_{t_z} - \sum_{n=1}^{N_{i_t}} S_{nt}, \quad (t \geq T_{start}) \wedge (t > R - a_z - 1).$$

Для програмної реалізації моделі була розроблена система "Insurance_Pension", написана на мові C# (рис. 3). Слід окремо зазначити що дані на основі яких формуються контекстуальні характеристики доцільно зберігати з використанням хмарних сховищ даних.

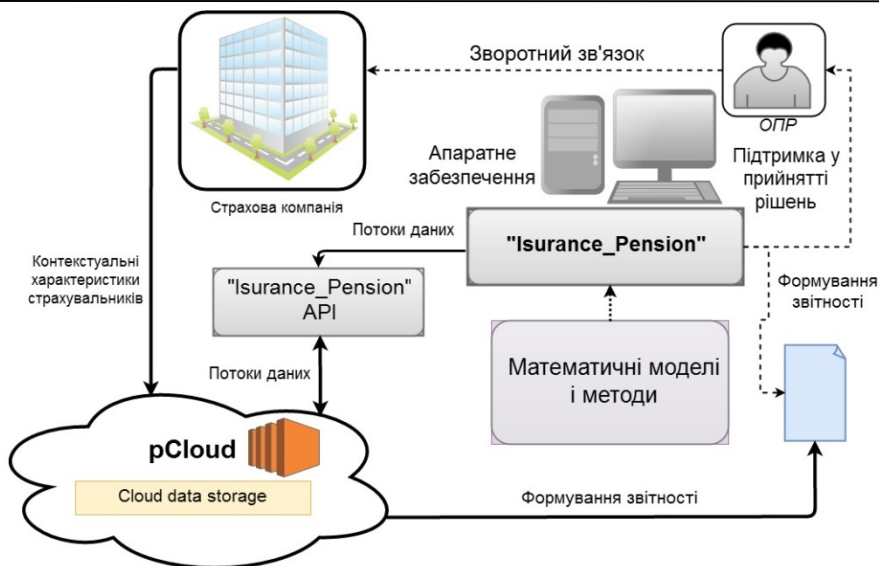


Рис. 3. Архітектура взаємодії «Insurance_Pension» та pCloud

Через те, що з часом дані будуть оновлюватись набагато ефективніше вносити зміни у хмарне сховище, яке розраховане на використання декількома користувачами одночасно. Це було реалізовано за допомогою хмарного сервісу pCloud, який підтримує сумісність з "Insurance_Pension" за допомогою роботи з двома методами обміну даними через HTTP/JSON та бінарного протоколу API. Архітектура сервісу дозволяє отримувати доступ до даних у будь-який час незалежно від місця розташування, а "Insurance_Pension" підтримує швидке та безпечне завантаження та вивантаження даних для обробки та зберігання завдяки інтеграції з хмарним сервісом pCloud. Отримані результати моделювання "Insurance_Pension" також можна експортувати як у хмарне сховище для зберігання, так і в Excel для перегляду чи подальшого оброблення.

Висновки: Розроблена модель фінансових потоків недержавного пенсійного фонду дозволяє відстежувати динаміку фінансових потоків загального пенсійного фонду в часі, а також враховувати особливості кожного страхувальника і кожного фонду індивідуальних пенсійних накопичень окремо. Для проведення моделювання була розроблена система "Insurance_Pension", що підтримує завантаження і вивантаження даних з хмарним сервісом pCloud. Завдяки підтримці наскрізного шифрування даних про страхувальників, яке проходить на стороні клієнта, стає неможливим перехоплення даних у незашифрованому вигляді, чим забезпечується достатній рівень захисту даних. Практична

цінність результатів дослідження полягає в тому, що в результаті аналізу і моделювання фінансових потоків фонду пенсійного страхування отримані обґрунтовані рішення щодо вибору стратегії розвитку фонду.

Список літератури: 1. Сахирова Н.П. Страхование: учеб. пособ. / Н.П. Сахирова. – М.: ТК Велби, 2006. – 744 с. 2. РБК-Украина (2017). Внедрение облачных сервисов для основных бизнес-приложений за 2016 год, available at: <https://comments.ua/ht/574827-polovina-ukrainskih-kompaniy-ispolzuet.html> 3. Forinsurer (2017). Новые технологии в страховании, available at: <http://forinsurer.com/news/17/03/06/34983> 4. Forbes (2017). New Cloud Computing Insurance Attempts to Solve Cloud Liability Concerns For Service Providers, available at: www.forbes.com/sites/reuencohen/2013/04/24/new-cloud-computing-insurance-tries-to-solve-cloud-liability-concerns-for-service-providers/#53893f4e1970 5. Оператор облачных технологий De Novo и компания IDC – Итоги ежегодного исследования рынка облачных сервисов Украины, available at: <http://hi-tech.ua/oblachnyie-servisyi-v-ukraine-itogi-issledovaniya> 6. Базилевич К.А. Определение вероятности выплат по страховым полисам на основе методов Data Mining / К.А. Базилевич, М.С. Мазорчук, А.А. Сухобрус // Системи обробки інформації : зб. наук. пр. / Харк. ун-т пов. сил ім. Івана Кожедуба. – Харків, 2016. – Вип. 2 (139). – С. 149 – 155. 7. Шоломицкий А.Г. Теория риска. Выбор при неопределенности и моделирование риска: учеб. пособ. для вузов / А.Г. Шоломицкий. – М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2005. – 400 с. 8. Ример М.И. Экономическая оценка инвестиций: учебник для вузов / М.И. Ример. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2011. – С. 115 – 122. 9. Шоломицкий А.Г. Финансирование накопительных пенсий: актуарные методы и динамические модели / А.Г. Шоломицкий // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2002. – № 9. – С. 544 – 577. 10. Cooper S.L. A Family of Accrued Benefit Actuarial Cost Methods / S.L. Cooper, J.C. Hickman // Trans. Society of Actuaries. – 1967. – Vol. 19. – P. 53-59. 11. Актуарная математика: пер. с англ.; под ред. В.К. Малиновского / Н. Бауэрс, Х. Гербер, Д. Джонс, С. Несбитт, Дж. Хикман. – М.: Янус-К, 2001. – 656 с.

References:

1. Sahirova, N. (2006), *Isurance*, TK Welby, Moscow, 744 p.
2. RBK-Ukraine (2017), "Implementation of cloud services for main business applications for 2016", available at: <https://comments.ua/ht/574827-polovina-ukrainskih-kompaniy-ispolzuet.html>
3. Forinsurer (2017), "New technologies in insurance", available at: <http://forinsurer.com/news/17/03/06/34983>
4. Forbes (2013), "New Cloud Computing Insurance Attempts to Solve Cloud Liability Concerns For Service Providers", available at: www.forbes.com/sites/reuencohen/2013/04/24/new-cloud-computing-insurance-tries-to-solve-cloud-liability-concerns-for-service-providers/#53893f4e1970
5. The operator of cloud technologies De Novo and the company IDC (2017), "Results of the annual survey of the market of cloud services in Ukraine", available at: <http://hi-tech.ua/oblachnyie-servisyi-v-ukraine-itogi-issledovaniya>
6. Bazylevich, K., Mazorchuk, M., and Suhobrus, A. (2016), "Determining the probability of insurance policies payments based on a data mining methods", *Information processing systems*, Vol. 2 (139), pp. 149-155.
7. Sholomitsky, A. (2005), *Theory of risk. Selection under uncertainty and risk modeling*, Ed. House of the Higher School of Economics, Moscow, 400 p.
8. Rimer, M. (2011), *Economic evaluation of investments*. 4th ed., Peter, Saint Petersburg pp. 115 – 122.

9. Sholomitsky, A. (2002), "Financing of funded pensions: actuarial methods and dynamic models", *Survey of Applied and Industrial Mathematics*, Vol. 9, pp. 544 – 577.
10. Cooper, S., and Hickman, J. (1967), "A Family of Accrued Benefit Actuarial Cost Methods", *Trans. Society of Actuaries*, Vol. 19, pp. 53 – 59.
11. Bowers, N., Gerber, H., Hickman, J., Jones, D., and Nesbitt, C. (2001), in Malinovsky, V.K. (Ed.), *Actuarial mathematics*, Janus-K, Moscow, P. 656.

Статтю представив д-р техн. наук, професор УІПА Тріщ Р.М.

Поступила (received) 12.06.2017

Bazilevych Kseniia, Cand. Tech. Sci., Assistant
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
Str. Chkalova, 17, Kharkiv, Ukraine, 61070
Tel.: +38 (057) 778-43-62, e-mail: ksenia.bazilevich@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5332-9545

Mazorchuk Mariia, Cand. Tech. Sci., Docent
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
Str. Chkalova, 17, Kharkiv, Ukraine, 61070
Tel.: +38 (057) 778-43-62, e-mail: mazorchuk.mary@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4416-8361

Parfeniuk Yurii, master
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel: +380636985423 , e-mail: parfuriy.l@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5357-1868

УДК 004.942:368.91

Моделювання фінансових потоків недержавного пенсійного фонду для групи учасників з урахуванням їх платоспроможності / Базілевич К.О., Мазорчук М.С., Парфенюк Ю.Л. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 28 – 37.

Розглядається класичний підхід до моделювання фінансових потоків недержавного пенсійного фонду, проводиться аналіз недоліків такого підходу. Розроблено модель фінансових потоків недержавного пенсійного фонду для групи учасників з урахуванням їх платоспроможності. Наведено опис програмної реалізації розробленої моделі. Модель дозволяє підвищити точність моделювання завдяки аналізу контекстуальних характеристик страхувальників, які мають суттєвий вплив на їх платоспроможність. Ил.: 3. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: недержавний пенсійний фонд; платоспроможність; контекстуальні характеристики; фінансові потоки.

УДК 004.942:368.91

Моделирование финансовых потоков негосударственного фонда для группы участников с учетом их платежеспособности / Базилевич К.А., Мазорчук М.С., Парфенюк Ю.Л. // Весник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 28 – 37.

Рассматривается классический подход к моделированию финансовых потоков негосударственного пенсионного фонда, проводится анализ недостатков такого подхода. Разработана модель финансовых потоков негосударственного пенсионного фонда для группы участников с учетом их платежеспособности. Представлено описание программной реализации разработанной модели. Модель позволяет повысить точность моделирования благодаря анализу контекстуальных характеристик страхователей, которые оказывают существенное влияние на их платежеспособность. Ил.: 3. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: негосударственный пенсионный фонд; платежеспособность; контекстуальные характеристики; финансовые потоки.

UDC 004.942:368.91

Modeling of cash flows in non-government pension fund for a group of participants with their solvency accounting/ Bazilevych K., Mazorchuk M., Parfeniuk Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – № 21 (1243). – С. 28 – 37.

A classical approach to modeling the cash flows in non-government pension funds is considered, and an analysis of the shortcomings of this approach is carried out. A model of cash flows in non-government pension fund for a group of participants with their solvency accounting has been developed. The description of the software implementation of the developed model is presented. The model allows to increase the accuracy of modeling due to the analysis of the contextual characteristics of policyholders, which have a significant impact on their solvency. Figs.: 3. Refs.: 11 titles.

Keywords: non-government pension fund; solvency; contextual characteristics; cash flows.

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А.Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ, д-р техн. наук, доц., ученый секретарь
НТУ "ХПИ",
Н.В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
Д.М. ГЛАВЧЕВ, асп. НТУ "ХПИ"

**ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ,
ОПИСЫВАЮЩЕЙ ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ, МЕТОДАМИ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

Рассматривается задача линеаризации математической модели, описывающей процессы управления подвижным составом, с целью получения удобного инструмента для оптимизации процессов движения объекта управления. Задача линеаризации решается с помощью геометрической теории управления. При этом основные аналитические преобразования автоматизированы с помощью специализированного программного обеспечения. Поиск функций преобразования, связывающих переменные линейной и нелинейной моделей, осуществляется с помощью нового конструктивного метода решения системы дифференциальных уравнений в частных производных. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: линеаризация математической модели; подвижной состав; геометрическая теория управления; функции преобразования.

Постановка проблемы и анализ литературы. Большое число различных технических объектов рационально описывать и исследовать с помощью систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, решения которых часто удобно представлять в виде кривых и поверхностей в трехмерном пространстве. Поскольку одно из основных назначений дифференциальной геометрии состоит в изучении свойств таких геометрических объектов, то неудивительно, что на стыке теории управления техническими объектами и дифференциальной геометрии возникла геометрическая теория управления [1, 2], которая находит определенное применение при поиске оптимальных управлений различными объектами. Привлекательность геометрической теории управления (ГТУ) связана, в первую очередь, с получением эквивалентных нелинейным линейных моделей, которые удобно использовать для решения задач оптимального управления. Более широкому применению геометрической теории управления препятствуют громоздкие аналитические преобразования, связанные с вычислением производных и скобок Ли, определением инволютивности распределений и т.д. [1 – 4], а также проблема определения функций преобразования, связывающих переменные линейных моделей в форме

Бруновского и исходных нелинейных моделей технических объектов управления. Большую часть аналитических преобразований удастся автоматизировать с помощью специализированного программного обеспечения [4, 5]. Однако проблема определения функций преобразования в общем случае требует своего решения, что связано с необходимостью решения системы дифференциальных уравнений в частных производных вида:

$$\begin{aligned}
 & a_{11} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_1} + a_{12} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_2} + \dots + a_{1n} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_n} = 0; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & a_{q1} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_1} + a_{q2} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_2} + \dots + a_{qn} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_n} = 0; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & a_{r1} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_1} + a_{r2} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_2} + \dots + a_{rn} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_n} = 0; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & a_{k1} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_1} + a_{k2} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_2} + \dots + a_{kn} \frac{\partial T_g(x)}{\partial x_n} = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{kn}$ – постоянные коэффициенты, задаваемые векторным полем объекта управления; $T_g(x)$ – неизвестная функция преобразования для g -ой клетки Бруновского; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор фазовых переменных исходного объекта; $a_{r1}, a_{r2}, \dots, a_{kn}$ – коэффициенты, определяемые производными Ли от функции $T_g(x)$ векторного аргумента x . Число уравнений в системе (1) зависит как от числа управлений, так и от индекса управляемости соответствующей клетки Бруновского. При числе управлений $l = 3$ и индексе управляемости, равном 4, число уравнений равно 12. Решение системы уравнений (1) в общем случае не является тривиальной задачей [1, 6]. В связи с этим в работе [7] был предложен поиск функций преобразований $T_g(x)$, где $g = 1, 2, \dots, k_g$, k_g – число клеток Бруновского, с помощью нейронной сети, а также метод, связанный с уменьшением числа аргументов, от которых может зависеть функция $T_g(x)$. При этом на правые части системы обыкновенных дифференциальных уравнений объекта управления наложены ограничения: только одно уравнение содержит три одночлена, а остальные уравнения содержат не более двух

одночленов. Увеличение числа одночленов в правых частях дифференциальных уравнений объекта управления может приводить к системам уравнений вида (1), которые требуют других подходов к их решению.

Целью статьи является разработка метода решения системы (1) уравнений в частных проводных, который расширяет возможность вышеуказанных методов решения этой системы.

Пусть дизель-поезд описывается как одномассовый объект с одним эквивалентным асинхронным двигателем [3, 8]:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= k_s \omega; \\
 \frac{d\omega}{dt} &= k_1 \mu \Psi_d i_q - a_{20} - a_{21} \omega - a_{22} \omega^2 - M(S); \\
 \frac{di_d}{dt} &= -\gamma i_d + p \omega i_q + \alpha L_m \frac{i_q^2}{\Psi_d} + \alpha \beta \Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s} u_d; \\
 \frac{d\Psi_d}{dt} &= -\alpha \Psi_d + \alpha L_m i_d; \\
 \frac{dp}{dt} &= p \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\Psi_d}; \\
 \frac{di_q}{dt} &= -\gamma i_q - p \omega i_d - \alpha L_m \frac{i_d i_q}{\Psi_d} - p \beta \Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s} u_q,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где S – расстояние, отсчитываемое от начала движения дизель-поезда; t – текущее время, отсчитываемое от начала движения состава; $k_s, k_1, a_{20}, a_{21}, a_{22}$ – постоянные коэффициенты; ω – угловая скорость вращения эквивалентного тягового асинхронного электродвигателя; $k_s \omega = V$ – скорость движения объекта; $\mu = p L_m / J L_r$; p, J – соответственно число пар полюсов статора электродвигателя и момент инерции объекта, приведенный к валу электродвигателя; L_m, L_r – соответственно индуктивность контура намагничивания и полная индуктивность ротора; $\Psi_d = \sqrt{\Psi_{ur}^2 + \Psi_{vr}^2}$ – потокосцепление ротора двигателя; Ψ_{ur}, Ψ_{vr} – потокосцепления ротора двигателя соответственно по осям u и v ; $i_d = i_{us} \cos \rho - i_{vs} \sin \rho$ – ток статора по оси d в системе

координат d, q ; $i_q = i_{vs} \cos \rho - i_{us} \sin \rho$ – ток статора по оси q в системе координат d, q ; $\rho = \arcsin(\Psi_{vr} / \sqrt{\Psi_{ur}^2 + \Psi_{vr}^2})$ или $\rho = \arccos(\Psi_{ur} / \sqrt{\Psi_{ur}^2 + \Psi_{vr}^2})$; i_{vs}, i_{us} – токи статора по осям v и u ; $M(S)$ – момент, зависящий от профиля пути, в первом приближении можно принять, что $M(S) = b_0 + b_1 S + b_2 S^2 + b_3 S^3$; $\gamma = R_r L_m^2 / \sigma L_s L_r^2 + R_s / \sigma L_s$; σ, L_s – соответственно полный коэффициент рассеяния и полная индуктивность статора; $\alpha = 1/T_r$; T_r – постоянная времени ротора эквивалентного двигателя; $\beta = L_m / (\sigma L_s L_r)$; $u_d = u_{us} \cos \rho + u_{vs} \sin \rho$; $u_q = u_{vs} \cos \rho + u_{us} \sin \rho$.

Введя обозначения: $x_1 = S$; $x_2 = \omega$; $x_3 = i_d$; $x_4 = \Psi_d$; $x_5 = \rho$; $x_6 = i_q$; $a_{11} = k_s$; $a_{21} = k_1 \mu$; $a_{22} = -a_{20}$; $a_{23} = -a_{21}$; $a_{24} = -a_{22}$; $a_{25} = b_0$; $a_{26} = b_1$; $a_{27} = b_2$; $a_{28} = b_3$; $a_{31} = -\gamma$; $a_{41} = -\alpha$; $a_{42} = \alpha L_m$; $a_{51} = p$; $a_{52} = a_{42}$; $a_{61} = a_{31}$; $u_1 = p\omega i_q + \alpha L_m i_q^2 / \Psi_d + \alpha \beta \Psi_d + u_d / (\sigma L_s)$; $u_2 = -p\omega i_d - \alpha L_m i_d i_q / \Psi_d - p\beta \omega \Psi_d + u_q / (\sigma L_s)$.

Из системы уравнений (2) получим следующую модель, описывающую движение состава:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_{11} x_2; \\ \dot{x}_2 &= a_{21} x_3 x_6 + a_{22} + a_{23} x_2 + a_{24} x_2^2 + a_{25} + a_{26} x_1 + a_{27} x_1^2 + a_{28} x_1^3; \\ \dot{x}_3 &= a_{31} x_3 + a_{32} x_4; \\ \dot{x}_4 &= a_{41} x_4 + u_1; \\ \dot{x}_5 &= a_{51} x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3}; \\ \dot{x}_6 &= a_{61} x_6 + u_2. \end{aligned} \tag{3}$$

С системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (3) связаны следующие векторные поля:

$$X(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} g_1 = a_{11}x_2 \\ g_2 = a_{21}x_3x_6 + a_{225} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{26}x_1 + a_{27}x_1^2 + a_{28}x_1^3 \\ g_3 = a_{31}x_3 + a_{32}x_4 \\ g_4 = a_{41}x_4 \\ g_5 = a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3} \\ g_6 = a_{61}x_6 \end{pmatrix};$$

$$Y_1 = |0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0|^T; \quad Y_2 = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1|^T,$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$; $a_{225} = a_{22} + a_{25}$.

Для определения возможного преобразования нелинейной системы (3) к линейному виду в форме Бруновского необходимо проверить условия инволютивности для распределений M^0, M^1, M^2 [1, 3].

Распределение $M^0 = \text{span}\{Y_1, Y_2\}$, где $\text{span}\{Y_1, Y_2\}$ – линейная оболочка векторов Y_1, Y_2 , инволютивно в силу постоянства соответствующих векторов.

Проанализируем теперь распределение $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_X Y_1, L_X Y_2\}$, где $L_X Y_1, L_X Y_2$ – соответственно производные Ли векторных полей Y_i ($i = 1, 2$) вдоль векторного поля X :

$$L_X Y_1 = [X, Y_1] = \frac{\partial Y_1}{\partial \mathbf{x}} X - \frac{\partial X}{\partial \mathbf{x}} Y_1 = -\frac{\partial X}{\partial \mathbf{x}} Y_1 =$$

$$= - \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_6} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_6}{\partial x_1} & \frac{\partial g_6}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_6}{\partial x_6} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= - \begin{vmatrix} 0 & a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{26} + 2a_{27}x_1 + 3a_{28}x_1^2 & a_{23} + 2a_{24}x_2 & a_{21}x_6 & 0 & 0 & a_{21}x_3 \\ 0 & 0 & a_{31} & a_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{41} & 0 & 0 \\ 0 & a_{51} & \frac{-a_{52}x_6}{x_3^2} & 0 & 0 & \frac{a_{52}}{x_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{61} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_{32} \\ -a_{41} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} ;$$

$$L_X Y_2 = [X, Y_2] = - \frac{\partial X}{\partial x} Y_2 = \begin{vmatrix} 0 & -a_{21}x_3 & 0 & 0 & -\frac{a_{52}}{x_3} & -a_{61} \end{vmatrix}^T.$$

Для выполнения инволютивности распределения M^1 необходимо, чтобы ранг матрицы $\text{rank}(Y_1, Y_2, L_X Y_1, L_X Y_2, [X_i, X_j])$, где X_i, X_j – векторные поля из семейства $(Y_1, Y_2, L_X Y_1, L_X Y_2)$ был равен четырем.

Поскольку это условие не выполняется, то распределение M^1 не является инволютивным. В связи с этим в систему уравнений (3) необходимо вводить дополнительное уравнение. Введем его во вторую часть системы уравнений (3):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_{11}x_2 = f_1; \\ \dot{x}_2 &= a_{21}x_3x_6 + a_{225} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25} + a_{26}x_1 + a_{27}x_1^2 + a_{28}x_1^3 = f_2; \\ \dot{x}_3 &= a_{31}x_3 + a_{32}x_4 = f_3; \\ \dot{x}_4 &= a_{41}x_4 + u_1 = f_4 + u_1; \\ \dot{x}_5 &= a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3} = f_5; \\ \dot{x}_6 &= a_{61}x_6 + x_7 = f_6; \\ \dot{x}_7 &= u_2, f_7 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

С новой моделью объекта управления связаны следующие векторные поля:

$$X^* = |f_1, f_2, \dots, f_7|^T; Y_1^* = |0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0|^T; Y_2^* = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1|^T. \quad (5)$$

Проверка инволютивности распределений $M^0 = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*\}$, $M^1 = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, L_{X^*}Y_1^*, L_{X^*}Y_2^*\}$, $M^2 = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, L_{X^*}Y_1^*, L_{X^*}Y_2^*, L_{X^*}^2Y_1^*, L_{X^*}^2Y_2^*\}$, $M^3 = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, \dots, L_{X^*}^3Y_1^*, L_{X^*}^3Y_2^*\}$ показала, что все распределения инволютивны. Таким образом, система уравнений (4) может быть преобразована к канонической форме Бруновского, которая имеет две клетки с индексами управляемости $k_1 = 4$ и $k_2 = 3$:

$$\begin{aligned} \frac{dz_i}{dt} &= z_{i+1}, i = 1, 2, 3, 5, 6; \\ \frac{dz_4}{dt} &= v_1, \quad \frac{dz_7}{dt} = v_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Для системы уравнений (6) существуют преобразования $z_1 = T_1(x) = T_1(x_1, x_2, \dots, x_7)$ и $z_5 = T_2(x_1, x_2, \dots, x_7)$ с помощью которых путем дифференцирования функций $T_1(x)$ и $T_2(x)$ вдоль векторного поля $X_1 = X^* + u_1^*Y_1^* + u_2^*Y_2^*$ можно определить z_2, z_3, z_5, z_6 .

В результате дифференцирования функций $T_1(x)$, $T_2(x)$ имеем:

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2 = L_{X_1}T_1(x^*) = L_{X^*}T_1(x^*) + u_1^*L_{Y_1^*}T_1(x^*) + u_2^*L_{Y_2^*}T_1(x^*); \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_2}{dt} = z_3 &= L_{X_1}(L_{X^*}T_1(x^*)) = L_{X^*}^2(T_1(x^*)) + u_1^*L_{Y_1^*}(L_{X^*}(T_1(x^*))) + \\ &+ u_2^*L_{Y_2^*}(L_{X^*}(T_1(x^*))); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_3}{dt} = z_4 &= L_{X_1}(L_{X^*}^2T_1(x^*)) = L_{X^*}^3(T_1(x^*)) + u_1^*L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2(T_1(x^*))) + \\ &+ u_2^*L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2(T_1(x^*))); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_4}{dt} = v_1 &= L_{X_1}(L_{X^*}^3T_1(x^*)) = L_{X^*}^4(T_1(x^*)) + u_1^*L_{Y_1^*}(L_{X^*}^3(T_1(x^*))) + \\ &+ u_2^*L_{Y_2^*}(L_{X^*}^3(T_1(x^*))); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{dz_5}{dt} = z_6 = L_{X_1}T_2(x^*) = L_{X^*}T_2(x^*) + u_1^*L_{Y_1^*}T_2(x^*) + u_2^*L_{Y_2^*}T_2(x^*); \quad (11)$$

$$\frac{dz_6}{dt} = z_7 = L_{X_1}(L_{X^*}T_2(x^*)) = L_{X^*}^2(T_2(x^*)) + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*}T_2(x^*)) + u_2^* L_{Y_2^*}T_2(x^*); \quad (12)$$

$$\frac{dz_7}{dt} = v_2 = L_{X_1}(L_{X^*}^2T_2(x^*)) = L_{X^*}^3(T_2(x^*)) + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2T_2(x^*)) + u_2^* L_{Y_2^*}^2T_2(x^*), \quad (13)$$

где $L_{X_1}T_k(x^*)$, $L_{X^*}T_k(x^*)$, $L_{Y_1^*}T_k(x^*)$, $L_{Y_2^*}T_k(x^*)$, $k=1, 2$ – производные Ли функций $T_k(x^*)$ вдоль векторных полей X_1 , X^* , Y_1^* , Y_2^* ; L_G^m – кратные производные Ли вдоль векторного поля G ($G = X^*$, Y_1^* , Y_2^*), $m=2, 3$.

Из системы уравнений в форме Бруновского следует, что переменные z_1, z_2, z_3, z_5 и z_6 не зависят от управлений v_1 и v_2 . Следовательно, в выражениях (7) – (9), (11), (12) коэффициенты при управлениях u_1^* и u_2^* равны нулю:

$$\begin{aligned} L_{Y_1^*}T_1(x^*) &= L_{Y_2^*}T_1(x^*) = L_{Y_1^*}(L_{X^*}T_1(x^*)) = L_{Y_2^*}(L_{X^*}T_1(x^*)) = \\ &= L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2T_1(x^*)) = L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2T_1(x^*)) = 0; \end{aligned} \quad (14)$$

$$L_{Y_1^*}T_2(x^*) = L_{Y_2^*}T_2(x^*) = L_{Y_1^*}(L_{X^*}T_2(x^*)) = L_{Y_1^*}^2T_2(x^*) = 0. \quad (15)$$

При этом коэффициенты при управлениях u_1^* и u_2^* в уравнениях (10) и (13) не равны нулю:

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*}^3T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*}^3Y_1^* \right\rangle \neq 0; \quad (16)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*}^3T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*}^3Y_2^* \right\rangle \neq 0;$$

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2T_2(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x^*}, L_{X^*}^2Y_1^* \right\rangle \neq 0; \quad (17)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2T_2(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x^*}, L_{X^*}^2Y_2^* \right\rangle \neq 0.$$

Соотношения (14) – (17) в компактной форме описывают систему из 10 дифференциальных уравнений в частных производных и четыре дифференциальных неравенства, с помощью которых можно определить функции преобразования $T_1(\mathbf{x}^*)$ и $T_2(\mathbf{x}^*)$. Эти функции в общем случае могут зависеть от семи компонент вектора $\mathbf{x}^* = (x_1, x_2, \dots, x_7)$. Из первых двух дифференциальных уравнений имеем:

$$L_{Y_1^*} T_1(\mathbf{x}^*) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, Y_1^* \right\rangle = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} y_{1i} = \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2} \cdot 0 + \\ + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4} \cdot 1 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_7} \cdot 0.$$

Отсюда следует, что функция $T_1(\mathbf{x}^*)$ не зависит от аргумента x_4 .

$$L_{Y_2^*} T_1(\mathbf{x}^*) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, Y_2^* \right\rangle = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} y_{2i} = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_7} \cdot 1.$$

Поэтому функция $T_1(\mathbf{x}^*)$ не зависит от x_7 . Таким образом, $T_1(\mathbf{x}^*)$ не зависит от x_4 и x_7 .

Для дальнейшего анализа функции $T_1(\mathbf{x}^*)$ необходимо использовать из соотношения (14) следующие четыре дифференциальных уравнения в частных производных, в которых используются производные Ли первого и второго порядка:

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*} Y_1^* \right\rangle = 0; \quad (18)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*} Y_2^* \right\rangle = 0; \quad (19)$$

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*}^2 Y_1^* \right\rangle = 0; \quad (20)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*}^2 Y_2^* \right\rangle = 0, \quad (21)$$

где

$$L_{X^*} Y_1^* = [X^*, Y_1^*] = \frac{\partial Y_1^*}{\partial x^*} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_1^* = -\frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_1^* =$$

$$= \begin{vmatrix} 0 & 0 & -a_{32} & a_{41} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}^T; \quad (22)$$

$$L_{X^*} Y_2^* = [X^*, Y_2^*] = -\frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_2^* = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}^T; \quad (23)$$

$$L_{X^*}^2 Y_1^* = \begin{vmatrix} 0, & a_{21}a_{23}x_6, & a_{32}(a_{31} + a_{41}), & a_{41}^2, & -(a_{32}a_{52}x_6 / x_3^2), & 0, & 0 \end{vmatrix}^T; \quad (24)$$

$$L_{X^*}^2 Y_2^* = \begin{vmatrix} 0, & a_{21}x_{31}, & 0, & 0, & a_{52} / x_{31}, & a_{61}, & 0 \end{vmatrix}^T. \quad (25)$$

Из соотношений (18) и (22) получим:

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*} Y_1^* \right\rangle = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, \begin{vmatrix} 0 & 0 & -a_{32} & -a_{41} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}^T \right\rangle =$$

$$= \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_3} \cdot (-a_{32}) + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_4} \cdot (-a_{41}) = 0.$$

Поскольку $T_1(x^*)$ не зависит от x_4 , то $\frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_4} = 0$ и отсюда следует, что $T_1(x^*)$ не зависит от x_3 , т.е. $T_1(x^*)$ не зависит от x_3, x_4, x_7 .

Из соотношений (19), (23) имеем

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x^*}, L_{X^*} Y_2^* \right\rangle = \left\langle \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x^*}, \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}^T \right\rangle =$$

$$= \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 6}}^7 \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_i} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_6} \cdot (-1) = 0.$$

Отсюда следует, что $T_1(x^*)$ не зависит и от x_6 .

Из выражений (20), (21) и (24), (25) с учетом того, что функция T_1 не зависит от x_3, x_4, x_6, x_7 несложно получить

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2 T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x^*}, L_{X^*}^2 Y_1^* \right\rangle = \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_2} a_{21} - \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_5} \frac{a_{52}}{x_3^2} = 0;$$

$$L_{Y_2}^*(L_{X^*}^2 T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x^*}, L_{X^*}^2 Y_2^* \right\rangle = \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_2} a_{21} x_3 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_5} \frac{a_{52}}{x_3} = 0.$$

Решение системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_2} a_{21} - \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_5} \frac{a_{52}}{x_3^2} &= 0; \\ \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_2} a_{21} x_3 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_5} \frac{a_{52}}{x_3} &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

показывает, что функция T_1 не зависит и от x_2 , x_5 . Таким образом, функция T_1 является функцией только одного аргумента x_1 .

Теперь проверим выполнение неравенств (16). Для этой проверки необходимо знать $L_{X^*}^3 Y_1^*$ и $L_{X^*}^3 Y_2^*$. Эти производные Ли можно вычислить с помощью соотношения

$$L_{X^*}^3 Y_p^* = [X^*, L_{X^*}^2 Y_p^*] = \frac{\partial L_{X^*}^2 Y_p^*}{\partial x^*} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial x^*} L_{X^*}^2 Y_p^*, \quad p = 1, 2.$$

Из выражений (16) следует

$$\left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*}^3 Y_1^* \right\rangle = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial T_1}{\partial x_i} (L_{X^*}^3 Y_1^*)_i \neq 0; \quad (27)$$

$$\left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*}^3 Y_2^* \right\rangle = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial T_1}{\partial x_i} (L_{X^*}^3 Y_2^*)_i \neq 0, \quad (28)$$

где $(L_{X^*}^3 Y_1^*)_i$, $(L_{X^*}^3 Y_2^*)_i$, $i = \overline{1, 7}$ — соответственно компоненты производных Ли $L_{X^*}^3 Y_1^*$, $L_{X^*}^3 Y_2^*$.

Поскольку функция преобразования $T_1(x^*)$ не зависит от $x_2, x_3, \dots, x_7$, то производные $\frac{\partial T_1}{\partial x_2}, \frac{\partial T_1}{\partial x_3}, \dots, \frac{\partial T_1}{\partial x_7}$ равны нулю и соотношения (27), (28) можно записать в виде

$$\frac{\partial T_1}{\partial x_1} (L_{X^*}^3 Y_1^*)_1 = \frac{\partial T_1}{\partial x_1} (-a_{11} a_{21} a_{32} x_6) \neq 0; \quad (29)$$

производных Ли вдоль векторного поля X^* несложно получить выражения, связывающие переменные линейной и нелинейной моделей для первой клетки канонической формы Бруновского:

$$z_2 = L_{X^*} T_1(x^*) = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_i} X_i^* = a_{11} x_2;$$

$$z_3 = L_{X^*} (L_{X^*} T_1(x^*)) = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial (L_{X^*} T_1(x^*))}{\partial x_i} X_i^* = a_{11} (a_{21} x_3 x_6 + a_{22} x_2 + a_{23} x_2 + a_{24} x_2^2 + a_{26} x_1 + a_{27} x_1^2 + a_{28} x_1^3);$$

$$z_4 = L_{X^*} (L_{X^*}^2 T_1(x^*)) = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial (L_{X^*}^2 T_1(x^*))}{\partial x_i} X_i^*, \text{ и т.д.}$$

Аналогичным образом нетрудно определить функцию $T_2(x^*)$, связывающую переменные линейной и нелинейной моделей для второй клетки канонической формы Бруновского.

Сопоставление результатов моделирования объекта управления с помощью моделей (4) и (6) показывает их полное совпадение, что подтверждает правильность математических преобразований как при получении модели (6), так и при получении функций преобразований, связывающих переменные линейной и нелинейной моделей. Полученные линейные модели могут быть использованы для поиска оптимальных управлений с помощью принципа максимума Понтрягина [3].

Выводы. При решении задачи линеаризации нелинейных моделей к эквивалентным линейным средствами геометрической теории управления предложен конструктивный метод определения функций преобразования, связывающих переменные линейной и нелинейной моделей, из системы дифференциальных уравнений в частных производных с дифференциальными ограничениями. Работоспособность метода продемонстрирована на линеаризации математической модели процессов движения состава с тяговым асинхронным приводом.

Список литературы: 1. Краснощёченко В.Н. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза / В.Н. Краснощёченко, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с. 2. Kim D.P. Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System / D.P. Kim. – Seal: Harnol, 2000. – 558 p. 3. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: НТМТ, 2013. – 248 с. 4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2 Многомерные нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие / Д.П. Ким. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с. 5. Дмитриенко В.Д. Преобразование нелинейных систем управления к эквивалентным линейным в канонической форме Бруновского / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный

// Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск: МГТУ, 2014. – № 4 (25). – С. 8 – 14. **6.** Дмитриенко В.Д. Автоматизация процессов преобразования нелинейных моделей к эквивалентным линейным в форме Бруновского / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2014. – Вип. 62 (1104). – С. 22 – 37. **7.** Арнольд В.И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 1978. – 304 с. **8.** Дмитриенко В.Д. Метод поиска функций преобразования, связывающих переменные нелинейных и линейных моделей в ГТУ / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – Вип. 44 (1216). – С. 14 – 30. **9.** Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполковский, С.Ю. Леонов. – Х.: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с. **10.** Курош А.Г. Курс высшей алгебры. – СПб.: Лань, 2008. – 432 с.

References:

1. Krasnoshechenko, V.N., and Krishenko, A.P. (2005), "Nonlinear systems: geometrical method of analysis and synthesis", Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, 520 p.
2. Kim, D.P. (2000), "Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System", Seal: Harnol, 558 p.
3. Dmitrienko, V.D., and Zakovorotny, A.Y. (2013), "Modelling and optimization of management processes of diesel trains", HTMT, Kharkiv, 248 p.
4. Kim, D.P. (2004), "Theory of automatic control. T. 2 Multidimensional nonlinear, optimal and adaptive systems", FYSMATLIT, Moscow, 464 p.
5. Dmitrienko, V.D., and Zakovorotny, A.Y. (2014), "Converting the nonlinear control systems equivalent to the linear canonical Brunovsky form", Electrical systems and complexes, Magnitogorsk: MSTU, Vol. No 4 (25), pp. 8-14.
6. Dmitrienko, V.D., and Zakovorotny, A.Y. (2014), "Automation of processes of transformation of nonlinear models to equivalent linear in the Brunovsky form", Herald of NTU "KhPI", Vol. No 62 (1104), pp. 22-37.
7. Arnold, V.I. (1978), "Additional chapters of the theory of ordinary differential equations", Science, Moscow, 304 p.
8. Dmitrienko, V.D., Zakovorotny, A.Y., and Hlavchev, D.M. (2016), "The method of searching for the transformation functions connecting the variables of nonlinear and linear models in the GCT", Herald of NTU "KhPI", No 44 (1216), pp. 14-30.
9. Noskov, V.I., Dmitrienko, V.D., Zapolovsky, N.I., and Leonov, S.Y. (2003), "Modelling and optimization of locomotive management and control systems", KhPhi "Transport of Ukraine", Kharkiv, 248 p.
10. Kurosh, A.G. (2008), *Course of Higher Algebra*. St. Petersburg., Lan, 432 p.

Статью представил д-р техн. наук, проф. Кучук Г.А.

Поступила (received) 05.06.2017

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech.Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Zakovorotniy Alexandr, Dr. Tech.Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (097) 967-32-71, e-mail: arcade@i.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

Mezentsev Nickolay, Cand. Tech.Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (098) 859-88-98, e-mail: besitzer@i.ua
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

Dmytro Hlavchev, master
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel: +380993049807, e-mail: dmitriyglavchev@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-4248-4819

УДК 861.5.015.24

Лінеаризація математичної моделі, яка описує процеси управління рухомим складом, методами диференціальної геометрії / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю., Мезенцев М.В., Главчев Д.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 38 – 53.

Розглядається задача лінеаризації математичної моделі, яка описує процеси управління рухомим складом, з метою отримання зручного інструменту для оптимізації процесів руху об'єкта управління. Задача лінеаризації вирішується за допомогою геометричної теорії управління. При цьому основні аналітичні перетворення автоматизовані за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Пошук функцій перетворення, що зв'язують змінні лінійної і нелінійної моделей, здійснюється за допомогою нового конструктивного методу розв'язання системи диференціальних рівнянь в частинних похідних. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: лінеаризація математичної моделі; рухомий склад; геометрична теорія управління; функції перетворення.

УДК 861.5.015.24

Линеаризация математической модели, которая описывает процессы управления подвижным составом, методами дифференциальной геометрии / Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Главчев Д.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 38 – 53.

Рассматривается задача линеаризации математической модели, описывающей процессы управления подвижным составом, с целью получения удобного инструмента для оптимизации процессов движения объекта управления. Задача линеаризации решается с помощью геометрической теории управления. При этом основные аналитические преобразования автоматизированы с помощью специализированного программного обеспечения. Поиск функций преобразования, связывающих переменные линейной и нелинейной моделей, осуществляется новым конструктивным методом решения системы дифференциальных уравнений в частных производных. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: линеаризация математической модели; подвижной состав; геометрическая теория управления; функции преобразования.

UDC 861.5.015.24

Linearization of the mathematical model, which describes the processes of control rolling stock, using methods of differential geometry / Dmitrienko V.D., Zakovorotny A.Y., Mezentsev N.V., Hlavchev D.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 38 – 53.

The problem of linearization of the mathematical model, which describes the rolling stock control processes, is considered with the aim of obtaining a convenient tool for optimization of the motion processes of the control object. The problem of linearization by means of a geometric control theory is solved. At the same time, the main analytical transformations with the help of specialized software are automated. The search for transformation functions connecting the variables of the linear and nonlinear models out using a new constructive method for solving the system of partial differential equations is carried. Bibliography: 10 titles.

Keywords: linearization of the mathematical model; rolling stock; geometric control theory; transformation functions.

А.Л. ЕРОХИН, д-р техн. наук, проф, ХНУРЭ, Харьков,
С.Н. ЛЕДНЁВ, магистр, ХНУРЭ, Харьков

МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ТРЕХОСЕВЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ANDROID УСТРОЙСТВ

Статья посвящена анализу методов распознавания жестов на основе показаний трехосевых акселерометров мобильных устройств. Рассмотрены основные методы машинного обучения применительно к задаче классификации жестов. Произведена начальная обработка данных, отбор признаков и выполнено сравнение алгоритмов с приведением качества распознавания. Ил.: 4. Табл.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: распознавание жестов; трехосевые акселерометры; мобильные устройства; классификация.

Постановка проблемы. Распознавание жестов является перспективным направлением развития интерфейсов взаимодействия человека с техникой в режиме реального времени, которые в будущем вполне смогут заменить текстовые и графические интерфейсы. Большая часть способов, направленных на распознавание жестов, применяет техники компьютерного зрения и обработки изображений [1]. Для этого необходимо наличие камер и присутствие человека в зоне видимости. Еще одним способом является анализ показаний акселерометров и гироскопов с устройств. Самым известным контроллером, использующих такой тип распознавания жестов, является Wii Remote [2] для игровой консоли Wii от компании Nintendo.

Развитие мобильных технологий и усовершенствование технологических процессов ведут к уменьшению размеров и увеличению мощностей мобильных устройств, появлению носимой электроники, оснащенной разными датчиками. Большинство современных смартфонов обладают встроенным трехосевым акселерометром, с помощью которого, например, реализуется всем привычная функция авто-поворота дисплея. Основное предназначение такого датчика – предоставление информации о текущем ускорении устройства (разности ускорения устройства и ускорения свободного падения). В состоянии покоя показания датчика совпадают с вектором ускорения свободного падения.

Все более распространенными и доступными на рынке становятся "умные" часы, которые тоже представляют собой Android устройства,

также часто оснащены акселерометром и другими датчиками. Также беспроводные устройства малых размеров, оснащенные акселерометром, могут быть встроены в одежду либо другие персональные электронные устройства. Распознавание жестов позволяет добавлять разные функции не только для работы с самими устройствами, например, управление медиаплеером или включение камеры, но и для работы с другими устройствами и приложениями на компьютере, например рисование или использование мобильного устройства как контроллера в играх.

Поскольку распознавание жестов является перспективным направлением взаимодействия интерфейсов, то необходимо провести дополнительные исследования моделей и методов распознавания двигательной активности пользователя. При изучении предметной области не было выявлено исследований, связанных с применением групповых (ensemble) методов классификации относительно задачи распознавания жестов, кроме Random Forest [3]. Поэтому было принято решение исследовать групповые алгоритмы, такие как Extra Trees (Extremely Randomized Trees), Random Forest, Gradient Boosting, а также использовать метод Bagging (сокращение от "bootstrap aggregation") для общепринятых для данного класса задач алгоритмов KNN и SVM. Bagging представляет собой классификатор, состоящий из нескольких классификаторов, обученных на случайным образом сгенерированных выборках, данные в которых могут пересекаться. Обычно применяют данный метод для деревьев решений, поскольку их комбинации хорошо работают при построении моделей, обученных на различных частях выборки, но также Bagging можно применить и к любому другому алгоритму классификации.

Анализ литературы. Платформа Android предоставляет несколько датчиков, которые позволяют отследить движение устройства [4]. Акселерометр и гироскоп всегда основаны на аппаратной составляющей, а датчик гравитации, линейного ускорения и вектор вращения могут быть как аппаратными, так и программными. Датчики движения полезны для мониторинга движений устройства, таких как наклон, встряска, поворот или взмах.

Необработанные значения, полученные от акселерометра смартфона, представляют собой массив из трех элементов, соответствующих трем координатным осям, приведенным на рис. 1.

Значения элементов массива являются ускорением вдоль оси (с учетом гравитации) и могут быть как положительными, так и отрицательными. Измеряются в м/с^2 . Стоит отметить, что важной особенностью координатной системы Android устройств является тот факт, что при смене положения устройства оси координат не меняются,

т.е. если сначала устройство держали в книжной ориентации, а затем перевернули в альбомную, то оси x и y не меняют своего положения.

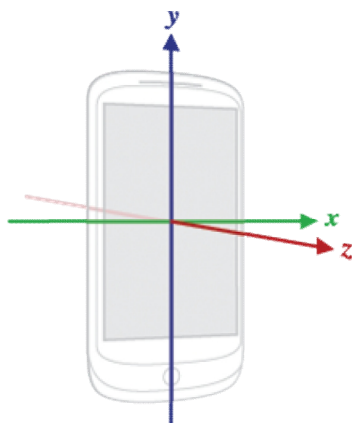


Рис. 1. Система координат датчиков устройства Android

Особенность датчиков мобильного устройства также в том, что в состоянии покоя акселерометр считывает величину $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ [4], а когда устройство находится в состоянии свободного падения и быстро ускоряется к земле с ускорением 9.81 м/с^2 , то акселерометр считывает величину $g = 0 \text{ м/с}^2$. Таким образом, для измерения реального ускорения необходимо устранить вклад силы тяжести из данных акселерометра.

Акселерометры в мобильных устройствах обычно не являются очень качественными, поэтому сигнал содержит большое количество шумов. Убрать вклад силы тяжести и шумы из исходного сигнала можно с помощью фильтра низких (low-pass) и высоких (high-pass) частот, простейшие реализации которых (формулы 1 и 2) предлагаются в документации Android [4]:

$$g_i = \alpha \cdot g_{i-1} + (1 - \alpha) \cdot v_i, \quad (1)$$

$$acc_i = v_i - g_i, \quad (2)$$

где g_i – изолированная сила гравитации; v_i – необработанные, "сырые" данные, полученные от акселерометра; α – константа; $0 \leq \alpha \leq 1$, acc_i – чистое ускорение (без учета гравитации).

Фильтры высоких и низких частот довольно часто используются при обработке данных с датчиков, благодаря простоте и эффективности. Также популярны скользящее среднее и фильтр Калмана.

Все предыдущие работы в области распознавания жестов можно разделить на две группы: основанные на шаблонах и основанные на моделях. Принцип работы первых заключается в хранении "эталонных"

жестов и дальнейшем их сравнении с выполненным жестом при помощи различных метрик расстояния, например евклидовой метрики. К таким алгоритмам можно отнести uWave [5], который по заявлениям авторов позволяет с точностью до 98% распознать совершенный жест. Данный алгоритм использует в своей основе другой алгоритм – DTW [6, 7] (Dynamic Time Wrapping, Динамическая Шкала Трансформации Времени), который часто применяется в обработке видео, аудио, распознавании речи и использует расстояние Левенштейна.

Статистические методы, например, такие как широко известные Скрытые Марковские Модели (Hidden Markov Model, HMM), базируются на вероятностной интерпретации образцов жестов для моделирования траектории жеста. В довольно известной работе Schlomer [8] использовалась HMM, оптимизированная алгоритмом Баума-Вельша с 8 состояниями. Данные жеста перед тем, как попасть в HMM, предварительно обрабатывались двумя фильтрами. Первый, так называемый "фильтр простоя", представляет собой пороговый фильтр, отбрасывающий вектора данных, не вносящих значимый вклад в характеристику жеста. Второй фильтр устранял векторы, которые приблизительно похожи на предыдущий.

Довольно часто можно встретить использование метода опорных векторов (SVM) [3, 9] в качестве классификатора. Методы, базирующиеся на SVM, обычно обладают меньшими вычислительными требованиями во время классификации, что делает их привлекательными для использования на мобильных устройствах.

Поскольку один жест представляет собой набор данных из трех векторов по осям x , y и z , а также времени получения каждой координаты в наносекундах, для дальнейшей работы его необходимо представить в виде одного вектора, при этом сохранив наиболее важные характеристики жеста. Для решения проблемы уменьшения размерности можно воспользоваться алгоритмами кластеризации, например K-Means [10] (K-Средних), либо PCA [11] (Principal Component Analysis, Метод главных компонент) – статистической процедуры, направленной на уменьшение размерности с минимальной потерей информации.

В работе [8] для этих целей был использован алгоритм K-Means, с $K = 14$. Число K было выбрано эмпирически, путем расположения центров кластеров в трехмерной системе координат по осям x , y и z , формируя таким образом сферу.

Целью исследования является сравнительное исследование групповых алгоритмов классификации Random Forest, Gradient Boosting и Extra Trees и применение техники Bagging для алгоритмов KNN (K-ближайших соседей) и SVM (метод опорных векторов),

применительно к задаче распознавания жестов на основе данных трехосевых акселерометров Android устройств.

Система распознавания жестов. Работа системы по распознаванию жестов (рис. 2) состоит из следующих этапов: получение данных, фильтрация, уменьшение размерности и/или выделение признаков, классификация.

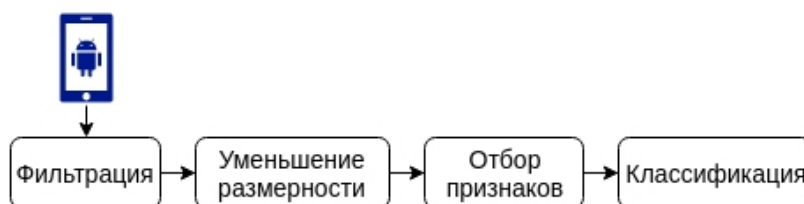


Рис. 2. Схема работы системы распознавания жестов

При работе с датчиками в Android есть возможность выставить, с какой частотой будут опрашиваться датчики. В данной работе была выбрана частота опроса в 20,000 микросекунд (что соответствует значению `SENSOR_DELAY_GAME` в документации).

Фильтрация является необходимым этапом, поскольку в исходном сигнале присутствуют шумы и разные датчики обладают разной калибровкой. Для фильтрации в данной работе были использованы фильтры, предложенные в документации Android со значением параметра $\alpha = 0.95$.

Для уменьшения размерности был использован алгоритм *K*-Means с одним кластером для каждой оси. Малое количество выбранных кластеров обосновывается использованием дополнительных признаков, сформированных на основе исходных данных.

Отбор признаков представляет собой процесс выбора характеристик из данных, которые имеют наиболее тесную связь с целевой переменной. Признаки формируются на основе уже существующих переменных в данных, либо являются комбинацией нескольких переменных. Данный шаг является важным, поскольку при грамотном подходе позволяет уменьшить переобучение модели, извлекая таким образом ненужные переменные, сбивающие с толку модель и заставляющие ее делать ложные выводы, повысить точность, а также сократить время обучения, при условии уменьшения признаков.

Признаков, полученных после этапа уменьшения размерности, может быть не достаточно для обеспечения приемлемого уровня распознавания жестов. Для улучшения качества были добавлены следующие признаки (в общем итоге 28 признаков):

- центры кластеров по осям x , y , z ;

- сумма по осям x, y, z ;
- среднее по осям x, y, z ;
- максимум по осям x, y, z ;
- минимум по осям x, y, z ;
- стандартное отклонения по осям x, y, z ;
- сумма общего усиления (формула 3) [3];
- минимум, максимум, стандартное отклонение и среднее для продольной оси (движение "крен", roll, формула 4) и поперечной оси (движение "тангаж", pitch формула 5);
- время выполнения жеста в наносекундах;

$$a_c(i) = \sqrt{a_x(i)^2 + a_y(i)^2 + a_z(i)^2}, \quad (3)$$

где $a_c(i)$ – общее ускорение, а $a_x(i)^2, a_y(i)^2, a_z(i)^2$ – квадраты ускорений по осям x, y, z соответственно.

Из показаний акселерометра можно извлечь такие данные, как угол наклона для продольной (roll) и поперечной (pitch) осей:

$$\text{pitch} = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right); \quad (4)$$

$$\text{roll} = \arctan\left(\frac{-a_x}{a_z}\right). \quad (5)$$

Полученный по формулам выше результат будет углом в радианах. Для перевода в градусы результат необходимо умножить на 180 и разделить на число π .

Такие простые статистические признаки, как сумма, среднее, медиана, максимум, минимум и т.д. обычно хорошо работают и не требуют особых вычислительных ресурсов.

В данной работе исследовались следующие типы жестов (рис.3):

- влево;
- вправо;
- вверх;
- вниз;
- круг по часовой стрелке;
- круг против часовой стрелки;
- квадрат по часовой стрелке;
- квадрат против часовой стрелки;
- латинская буква Z.

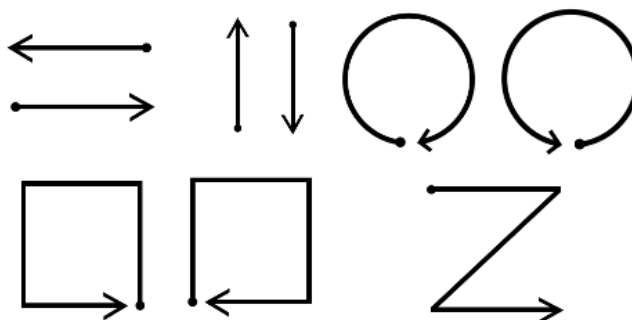


Рис. 3. Типы исследуемых жестов

В испытании приняли участие 4 человека, суммарно было собрано 1800 повторений жестов – по 200 для каждого типа. Для сбора данных было разработано Android-приложение. Начало жеста обозначалось нажатием кнопки в приложении на дисплее, затем следовал процесс выполнения жеста и отжатие кнопки означало завершение жеста.

Для каждого алгоритма классификации были подобраны наилучшие параметры путем кросс-валидации по сетке параметров. Все расчеты выполнялись с использованием языка Python и библиотеки машинного обучения Scikit-Learn с использованием пакетов Pandas и Numpy.

Алгоритмы классификации KNN и SVM очень чувствительны к входным параметрам. На наборе данных с отобранными признаками они давали очень низкое качество, поэтому для них было применена стандартизация признаков путем удаления среднего и масштабирования с единичной дисперсией (использовался класс StandardScaler из библиотеки).

Вся выборка делилась стратифицировано (для гарантии наличия одинакового количества типов жестов в каждой части) по принципу 70/30, 70% из которой использовались на этапе кросс-валидации (по 5 блокам), а затем 30% тестовых данных делились по принципу 60/40 для обучения и тестирования. Таким образом итоговая проверка качества работы алгоритмов проводилась на той части выборки, которая не принимала участие в кросс-валидации и обучении. Для оценки качества кросс-валидации использовалась взвешенная F-мера.

При вычислении итоговой оценки учитывались несколько метрик – точность, полнота и F-мера, которые вычислялись для каждого класса жеста. В таблице ниже приведены результаты работы алгоритмов (отсортированы по убыванию качества).

Таблиця

Качество классификации алгоритмов

Алгоритм	Точность	Полнота	F-мера
Extra Trees	95,1 %	94,8 %	94,8 %
SVM + Bagging	94,4 %	93,8 %	93,9 %
SVM	94,3 %	93,9 %	93,8 %
KNN	92,6 %	92,0 %	92,0 %
KNN + Bagging	92,3 %	91,5 %	91,6 %
Random Forest	91,9 %	91,5 %	91,6 %
Gradient Boosting	87,6 %	87,3 %	87,2 %

На рис. 4 приведена матрица неточностей для алгоритма, получившего самую высокую оценку – Extra Trees.

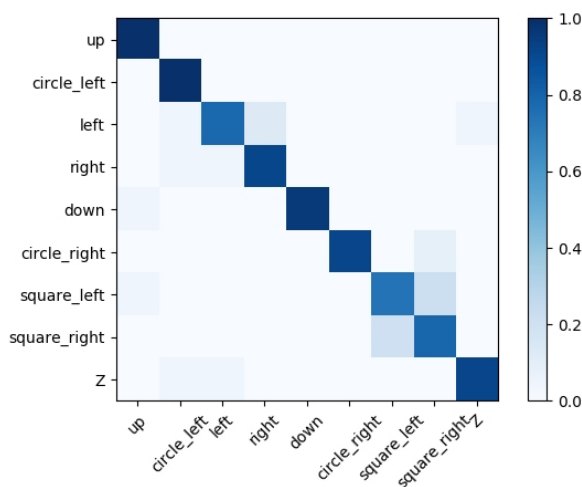


Рис. 4. Матрица неточностей для алгоритма Extra Trees

По матрице видно, что значимых отклонений не наблюдается и алгоритм редко ошибается, в основном все жесты распознаются верно. Труднее всего, по сравнению с другими жестами, поддается распознавание жестов Z и вниз – для них точность составляет 88%. Самыми успешно распознаваемыми жестами (точность 100%) являются жесты вверх, круги и квадрат против часовой стрелки.

Выводы. Проведенное в работе исследование показало, что вполне возможно добиться качества распознавания жестов близкого к 95%

используя лишь показания акселерометра путем извлечения несложных признаков и применив один из популярных алгоритмов классификации.

В работе проведено сравнение групповых методов классификации и использована техника беггинг для алгоритмов KNN и SVM, что, в свою очередь, приблизило их к разряду групповых. Ранее не используемый, применительно к задаче классификации жестов на основе датчиков мобильных устройств, алгоритм Extra Trees показал наилучшие результаты в сравнении с другими, и в особенности, с близким по своей сути алгоритмом Random Forest.

При использовании в дополнении к акселерометру показаний таких датчиков, как гироскоп и магнитометр, и извлечения из них дополнительных признаков, вполне осуществимо добиться более высокого качества распознавания. Исследования по данной тематике позволяют использовать мобильные устройства как средства для работы с дополненной реальностью, а также как средства управления интерфейсами, в особенности на носимых устройствах, таких как умные часы и фитнес-трекеры.

References:

1. "Gesture Recognition" (2016), available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Gesture_recognition (accessed 10 March 2017).
2. "Wii | Nintendo", (2016), available at: www.nintendo.ru/Wii/Wii-94559.html (accessed 10 March 2017).
3. Feng, Hong, Shujuan, You, Meiyu, Wei, Yongtuo, Zhang, and Zhongwen, Guo (2016), *MGRA: Motion Gesture Recognition via Accelerometer*, Vol. 16 (4), 530 p.
4. "Motion Sensors and Android Developers", (2017), available at: http://developer.android.com/intl/ru/guide/topics/sensors/sensors_motion.html (accessed 12 March 2017).
5. Liu, J., Zhong, L., Wickramasuriya, J., and Vasudevan, V. (2009), *uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications*. Pervasive Mob. Comput, No. 5, pp. 657-675.
6. Berndt, D.J., Clifford, J. (1994), *Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series*. KDD workshop, No. 16, pp. 359-370.
7. Senin P. (2008), *Dynamic time warping algorithm review*. Information and Computer Science Department, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, USA, 23 p.
8. Schlömer, T. Poppinga, B. Henze, N., and Boll, S. (2008), *Gesture recognition with a Wii controller. Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, Bonn, 18-21 February 2008, Germany, pp. 11-14.
9. Pati, I. M.A.R., Subbaraman, S.S. (2013), *A Review On Vision Based Hand Gesture Recognition Approach Using Support Vector Machines*, *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, pp. 7-12.
10. "K-Means clustering" (2016), available at: http://en.wikipedia.org/wiki/K-means_clustering (accessed 15 March 2017).
11. "Principal component analysis" (2016), available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Principal_component_analysis (accessed 15 March 2017).

Статью представил д-р техн. наук, зав. каф. искусственного интеллекта ХНУРЭ Филатов В.А.

Поступила (received) 28.03.2017

Andriy Yerokhin, Dr.Sci.Tech, Professor
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauky Ave 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel: +38 067 575-84-81, e-mail: andriy.yerokhin@nure.ua
ORCID ID: 0000-0002-8867-993X

Serhii Lednov, master
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauky Ave 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel: +38 050 802 96 36, e-mail: serge.lednirov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2542-8874

УДК 004.94

Методи розпізнавання жестів на основі даних трьохосьових акселерометрів Android пристроїв / Єрохін А.Л., Ледньов С.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 54 – 64.

Статтю присвячено аналізу методів розпізнавання жестів на основі показань трьохосьових акселерометрів мобільних пристроїв. Розглянуто основні методи машинного навчання відносно задачі класифікації жестів. Виконано початкову обробку даних, відбір ознак і виконано порівняння алгоритмів з наведенням якості розпізнавання. Ил.: 4. Табл.: 1. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: розпізнавання жестів; трьохосьові акселерометри; мобільні пристрої; класифікація.

УДК 004.94

Методы распознавания жестов на основе данных трехосевых акселерометров Android устройств / Ерохин А.Л., Леднёв С.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 54 – 64.

Статья посвящена анализу методов распознавания жестов на основе показаний трехосевых акселерометров мобильных устройств. Рассмотрены основные методы машинного обучения применительно к задаче классификации жестов. Произведена начальная обработка данных, отбор признаков и выполнено сравнение алгоритмов с приведением качества распознавания. Ил.: 4. Табл.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: распознавание жестов; трехосевые акселерометры; мобильные устройства; классификация.

UDC 004.94

Gesture recognition methods based on three-axis Android accelerometers readings / Yerokhin A.L., Lednov S.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 54 – 64.

The article is devoted to gesture recognition methods analysis based on the readings of three-axis accelerometers of mobile devices. The basic methods of machine learning applied to the problem of classification of gestures. Conducted initial data processing, feature selection and comparison of algorithms providing recognition quality results. Figs.: 4. Tab.: 1. Refs.: 11 titles.

Keywords: gesture recognition; three-axis accelerometers; mobile devices; classification.

Д.Е. ИВАНОВ, д-р техн. наук, доц., с.н.с., ИПММ НАН Украины,
г. Славянск

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТЖИГА ОЦЕНКИ ПИКОВОГО РАССЕИВАНИЯ ТЕПЛА ЦИФРОВЫХ СХЕМ

Предлагается новый метод оценки пикового рассеивания тепла цифровых схем. Задача сведена к задаче идентификации параметра цифрового устройства. Метод относится к недетерминированным эволюционным алгоритмам. В качестве основы используется метод симуляции отжига построения входных идентифицирующих последовательностей. Выполнена алгоритмическая и программная реализация. Приведены результаты апробации на контрольных схемах из международного каталога. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 20 назв.

Ключевые слова: цифровое устройство; эволюционный алгоритм; рассеивание тепла; моделирование отжига.

Постановка проблемы и анализ литературы. В соответствии с одной из тенденций современного рынка радиоэлектроники потребителю предлагается продукция с пониженным энергопотреблением. Это вписывается в глобальную концепцию по снижению энергозатрат человечеством в целом.

Проблема энергоэффективности (или, что тоже самое в рамках данного исследования, низкого рассеивания тепла) цифровых устройств (ЦУ) в настоящее время определяется тремя основными факторами [1]:

- развитие портативной электроники: смартфоны, МПЗ плееры, навигаторы и т.д., которая среди прочих потребительских свойств должна обладать пониженным потреблением энергии;

- понижение энергопотребления электронных цифровых устройств, что вписывается в общую концепцию современного потребительского общества;

- эффективное проведение тестирования сложных реализаций ЦУ.

Проблема рассеивания тепла для микросхем СБИС становится особенно острой в связи уменьшением норм технологического процесса и соответствующим ростом плотности активных элементов (транзисторов) на кристалле. Чрезмерное тепловыделение ведёт к перегреву кристалла и нещадящему режиму работы ЦУ, следствием чего может быть уменьшение наработки устройства на отказ, уменьшение жизненного цикла, либо в критическом случае – выход его из строя. В [2] отмечается, что повышенное рассеивание тепла в процессе работы кристалла вызывает кратковременные перегревы – отказы в работе, при этом число отказов в единицу времени удваивается при повышении

рабочей температуры на каждые 10°C .

Под энергоэффективными мы будем понимать ЦУ, которые, с одной стороны, спроектированы с учётом минимизации потребления энергии, а с другой стороны, при их работе избегаются экстремальные тепловые режимы.

Для проектировщиков ЦУ требование снижения потребления энергии аппаратурой означает переход на новые принципы её проектирования [3]. Они могут быть разделены на два больших направления:

- технологическое: в частности, уменьшение технологических норм производства СБИС; очевидно, что проектировщики логики ЦУ непосредственно не могут влиять на технологию производства; данное направление выходит за рамки настоящего исследования;

- проектное: применение специальных стилей (методов) проектирования, т.е. проектирование таких устройств, которые обладают пониженным энергопотреблением [4 – 7].

В направлении снижения рассеивания тепла проектируемых СБИС первоначально разрабатываются методы, позволяющие оценивать такое рассеивание для заданного ЦУ [8 – 10]. Для оценки данного параметра на логическом уровне представления, в основном, используется активность логических элементов при моделировании. Заметим, что данный параметр также оптимизируется в генетических алгоритмах (ГА) построения входных последовательностей. Поэтому можно сделать вывод о родственности подходов.

Позднее разрабатывались методы оценки максимально возможного в работе (пикового) рассеивания тепла заданным ЦУ [11]. В указанной работе задача по определению пикового рассеивания тепла в ЦУ сводится к задаче о максимальном покрытии для булевой функции с множеством выходов. Также показывается, что задача является NP-полной, а для её решения используется известная техника ветвей и границ. Применимость алгоритма ограничена небольшими устройствами. Например, для наибольшей представленной схемы с 733 вентилями время работы составило несколько часов. Преимуществом метода является гарантирование нахождения решения, если не произойдёт переполнение при построении дерева решений.

Аналогичную задачу применительно к комбинационным ЦУ рассматривали в [12], а для последовательностных – в [13]. В последней работе решение требует восстановления графа переходов с последующей оценкой параметра рассеивания тепла для каждого перехода. Очевидным недостатком подхода является его сложность: для небольшой схемы s208 граф содержал 71 миллион переходов. Таким образом, замечания о

применимости метода совпадают с таковыми для структурных детерминированных методов.

В [14] предлагается основанный на генерации тестов подход к решению задачи, идея которого основана на активизации тех вентилях в устройстве, которые имеют наибольшее число элементов-последователей, а, следовательно, порождают наибольшее число событий.

Как и в случае построения других типов входных последовательностей, для решения задачи оценки рассеивания тепла стали разрабатывать методы, основанные на моделировании [10]. Наконец, был предложен ГА решения данной задачи [15], в котором для повышения точности оценки используется алгоритм моделирования с задержками.

Целью статьи является разработка нового эффективного метода оценки пикового рассеивания тепла, основанного на эволюционной стратегии моделирования отжига; алгоритмическая и программная реализация метода и апробация на схемах из международного каталога.

Оценка пикового рассеивания тепла заданного ЦУ. Для заданного на логическом уровне описания ЦУ A и заданной входной последовательности $S_{вх}$ точно оценить параметр рассеивания тепла при работе на ней можно только зная физическую технологию реализации ЦУ. В настоящее время наиболее распространенной технологией производства ЦУ является КМОП технология (CMOS), а также её современные модификации. Поэтому далее в работе оценки будут строиться именно для данной технологии.

Поскольку предполагается, что в процессе функционирования ЦУ не накапливает тепловую или электрическую энергию, то вся потребляемая мощность выделяется в виде тепла через корпус микросхемы. Поэтому во избежание тавтологии мы будем применять термины "рассеивание тепла устройством" и "потребление мощности устройством", считая их эквивалентными для целей нашего исследования.

В КМОП технологии производства СБИС рассеивания тепла делится на [3]:

$E_{ст}$ – статическое потребление тока;

$E_{кз}$ – переходные токи коротких замыканий;

$E_{дин}$ – динамическое потребление тока.

В общем, рассеивание тепла выражается формулой:

$$E = E_{ст} + E_{кз} + E_{дин} \quad (1)$$

Причина первых двух типов рассеивания $E_{ст}$ и $E_{дин}$ кроется в токах утечки, либо других паразитных токах и является следствием несовершенства технологии. Уменьшить рассеивание данного типа можно за счёт совершенствования технологии производства чипов. Отметим, что данный тип рассеивания тепла происходит всегда, когда ЦУ включено в работу и не зависит от типа выполняемой работы (прилагаемой входной последовательности).

Переключательная активность схемы влияет на динамическое рассеивание $E_{дин}$ в КМОП чипах и является следствием утечки токов при зарядке/разрядке конденсаторов во время переключения уровней сигналов в транзисторах логических вентилей. Именно переключательная активность определяется тем, какая входная последовательность подаётся на вход ЦУ. Более того, входная последовательность никак не влияет на статическую составляющую рассеивания тепла. Таким образом, можно сделать два вывода:

- проектировщик тестов не влияет на рассеивание тепла $E_{ст}$ и $E_{кз}$, вызванное технологическими особенностями производства чипов;
- входная последовательность определяет только динамическую $E_{дин}$ составляющую рассеивания тепла.

В качественно спроектированных схемах доминирует динамическое рассеивание тепла $E_{дин}$. Причём его доля составляет 70 – 90% от общего энергопотребления чипа. Именно данный тип рассеивания тепла следует оценивать при анализе качества проектирования схем на логическом уровне представления.

Для заданного ЦУ A , произведенного по КМОП технологии, на вход которого подаётся входная двоичная последовательность, оценка динамической составляющей производится по формуле [16]:

$$E(S) = 0.5V^2 f Act(S), \quad (2)$$

где V – физическое напряжение работы схемы; f – частота работы схемы; $Act(S)$ – переключательная активность схемы, равная числу событий при моделировании поведения ЦУ A на заданной входной последовательности S .

Из формулы (2) видно, что вклад физических величин напряжения V и частоты работы схемы f в параметр рассеивания тепла будет определяться константой и только параметр $Act(S)$ зависит от входной последовательности.

Таким образом, оценка рассеивания тепла для заданного ЦУ и входной последовательности с точностью до постоянного множителя

может быть выполнена без привлечения физических величин, т.е. параметров технологического процесса. Для этого достаточно вычислить параметр переключательной активности $Act(S)$. Мы в работе не будем учитывать влияние, определяемое физическими параметрами, и без потери общности будем считать, что $Act(S) = E(S)$.

Для входного набора X_i активность схемы описывается выражением

$$Act(X_i) = \sum_g Act_g^i C_g, \quad (3)$$

где Act_g^i – активность логического вентиля g при работе на входном наборе с номером i ; C_g – ёмкость выхода вентиля g , которая равна числу его элементов-последователей в схеме. Тогда для всей последовательности данный параметр вычисляется как сумма оценок (3) для каждого входного вектора

$$Act(S) = \sum_{i=1}^l \sum_g Act_g^i C_g, \quad (4)$$

где l – длина входной последовательности $S = (X_1, X_2, \dots, X_l)$ (число входных наборов). Активность одиночного логического элемента определяется следующим образом

$$Act_g^i = \begin{cases} 1, & \text{если выход вентиля изменился;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, для вычисления переключательной активности заданного ЦУ A и оценки его динамического рассеивания тепла $E_{\text{дин}}$ с точностью до физических коэффициентов необходимо выполнить моделирование поведения работы A на последовательности S и определить число событий моделирования $N_{\text{соб}}$. Данную задачу решает любой событийный алгоритм моделирования ЦУ.

Для оценки рассеивания тепла исправного/неисправного ЦУ применяются соответственно процедуры исправного/неисправного событийного моделирования. Различные алгоритмы моделирования ЦУ будут давать различные оценки параметра рассеивания тепла в соответствии с формулой (4). Наиболее часто для решения данной задачи используются алгоритмы моделирования с номинальными задержками. В данной работе для этих целей адаптированы процедуры алгоритма моделирования [17].

Оценка рассеивания тепла, выполненная выше, позволяет понять влияние входной двоичной последовательности на данный параметр. Однако произвольному фиксированному ЦУ A присущ ряд некоторых внутренних свойств, касающихся рассеивания тепла, которые не зависят от прилагаемой последовательности, а определяются его внутренней структурой, т.е. применёнными проектировочными решениями. Одно из таких свойств показывает пиковое рассеивание тепла данным ЦУ, которое может быть достигнуто в процессе работы. Причём подразумевается, что данное пиковое значение может быть достигнуто на одном такте работы ЦУ.

Определение. Для заданного ЦУ A пиковым однотоктным рассеиванием тепла E_A^1 называется максимальное рассеивание тепла, которое может произойти за один такт работы устройства.

Решение задачи оценки E_A^1 является задачей идентификации данного параметра для устройства A .

Знание такой оценки является существенным при проектировании современных ЦУ. Известно, что задача является NP-полной и попытки решить её традиционными методами "ветвей и границ" или преобразованием булевых выражений приводят к чрезмерным требованиям времени и ресурсов памяти. В данной статье будет показано построение метода решения данной задачи с помощью алгоритма моделирования отжига (МО), который сводится к одноуровневой схеме построения идентифицирующих последовательностей (ИдП) [18].

В последовательностном ЦУ A переключательная активность зависит как от начального его состояния Z , так и от прилагаемого в текущий момент времени входного набора (в отличие от комбинационного ЦУ, в котором такая активность зависит только от входного набора). При этом активность зависит от состояния схемы в большей степени, поскольку число триггеров (элементов состояний) в схеме обычно существенно больше, чем число внешних входов.

Математически такая зависимость выглядит как $E_A^1(Z, X)$, где Z – начальное состояние схемы, X – текущий входной набор.

Однако такая оценка не может являться приемлемой, поскольку в ней совсем не учитываются значения сигналов на внутренних линиях комбинационного блока (КБ) ЦУ. Для того чтобы учесть данный фактор необходимо сначала произвести их инициализацию. Таким образом, мы приходим к необходимости при оценке рассеивания тепла за один такт учитывать два последовательных входных набора. При этом первый входной набор X_1 необходим для инициализации схемы, а второй набор X_2 для получения переключательной активности схемы. Учитывая, что

применяется модель синхронных последовательностных ЦУ, это приведёт к использованию двух копий КБ, как это показано на рис. 1. При этом выходные реакции ЦУ нас в данной задаче не интересуют.

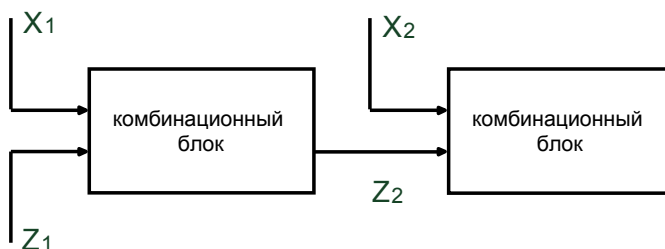


Рис. 1. Двухтактная модель работы последовательностного ЦУ в задаче оценки пикового рассеивания тепла

Поясним работу модели, изображённой на данном рисунке. Первоначально ЦУ находится в полностью неопределённом состоянии, что при моделировании в трёхзначном алфавите E_3 соответствует наличию на всех линиях ЦУ неопределённого значения u . После записи исходного состояния Z_1 и подачи первого входного набора X_1 выполняется моделирование работы КБ ЦУ. При этом в соответствии с реализованной логикой будут получены выходной набор Y_1 (для оценки рассеивания тепла не учитывается и не приведён на рисунке) и новое состояние ЦУ Z_2 . КБ при этом перейдёт в полностью определённое состояние, т.е. на её линиях будут присутствовать значения 0 и 1 из алфавита моделирования E_3 . Данное утверждение верно только для "правильно" спроектированных ЦУ, в которых отсутствует избыточная логика, и мы рассматриваем только такой случай. На следующем такте времени ЦУ начинает работу из состояния Z_1 , получает на вход набор X_2 , выполняется моделирование КБ и оценка потребляемой энергии по формуле (3). Заметим, что выход Y_2 в оценке также не учитывается. Видно, что оценка потребления энергии происходит только для второго такта времени. Также нет необходимости в параметры работы данной модели включать состояние Z_2 , которое сформируется на триггерах после первого такта времени. Будем называть состояние Z_1 в таком эксперименте предыходным. Ограничением такой модели является то, что она применима к "правильно спроектированным" ЦУ, которые обеспечивают полный контроль элементов состояний, т.е. позволяют записать произвольный двоичный вектор состояния Z_1 .

Таким образом, мы приходим к тому, что для оценки рассеивания тепла за один такт времени, необходимо максимизировать функционал

$$E_A^1(Z_1, X_1, X_2) \rightarrow \max. \quad (6)$$

В общем случае данная задача является задачей идентификации параметра ЦУ, она является NP-полной. Для решения задачи в такой постановке предлагается использовать алгоритм моделирования отжига.

Построение алгоритма моделирования отжига оценки рассеивания тепла. Алгоритм моделирования отжига, как и генетический алгоритм, относится к группе эволюционных методов. Основным его отличием от ГА является то, что здесь происходит эволюция одного потенциального решения. Подробно алгоритм МО разработан авторами, например, в [19], поэтому здесь дадим только его краткое описание.

Формально метод МО задаётся как упорядоченная совокупность объектов

$$MO = (K, R, C, T, K_0, N, l), \quad (7)$$

где K – множество возможных конфигураций (потенциальных решений); $R: K \rightarrow K$ – операция построения конфигураций в окружении; $C: K \rightarrow R$ – функция стоимости решения; $T = \{T_1, T_2, \dots\}$ – расписание температур; $K_0 \in K$ – начальная конфигурация; $N(O(K_i)) = |O(K_i)|$ – размер окружения для конфигурации $K_i \in K$; l – длина кодирования особи в битах.

Цель метода: поиск конфигурации с наивысшей оценкой: $C \rightarrow \max$.

Общая схема алгоритма МО приведена на рис. 2.

Поясним этапы работы алгоритма.

1. В начальный момент генерируется случайная конфигурация K_0 и вычисляется её функция стоимости $C_0 = C(K_0)$.

Выполняется подготовка к дальнейшим итерациям алгоритма:

- начальная итерация принимается в качестве текущей для последующих итераций алгоритма: $K_i = K_0$, $C_i = C_0$;

- начальная температура из распределения T принимается в качестве текущей: $T_i = T_0$.

Далее итеративно выполняются следующие шаги.

2. Формируется окружение текущей конфигурации: $O(K_i)$.

3. Для всех конфигураций $K'_i \in O(K_i)$ вычисляется функция оценки и в качестве промежуточной $K_{\text{пром}}$ выбирается лучшая из них.

4. Если $C(K_{\text{пром}}) > C(K_i)$, то промежуточная конфигурация заменяет текущую: $K_{i+1} = K_{\text{пром}}$. Переход на шаг 2.

5. Если $C(K_{\text{пром}}) < C(K_i)$, то вычисляется разность $\Delta C = C(K_{\text{пром}}) - C(K_i)$; на основании этой разности и текущей температуры вычисляется вероятность $P(-\Delta C, T_i)$, с которой конфигурация $K_{\text{пром}}$ заменит K_i : $K_{i+1} = K_{\text{пром}}$ с вероятностью P .

6. Изменение текущей температуры.

7. Переход к шагу 2.

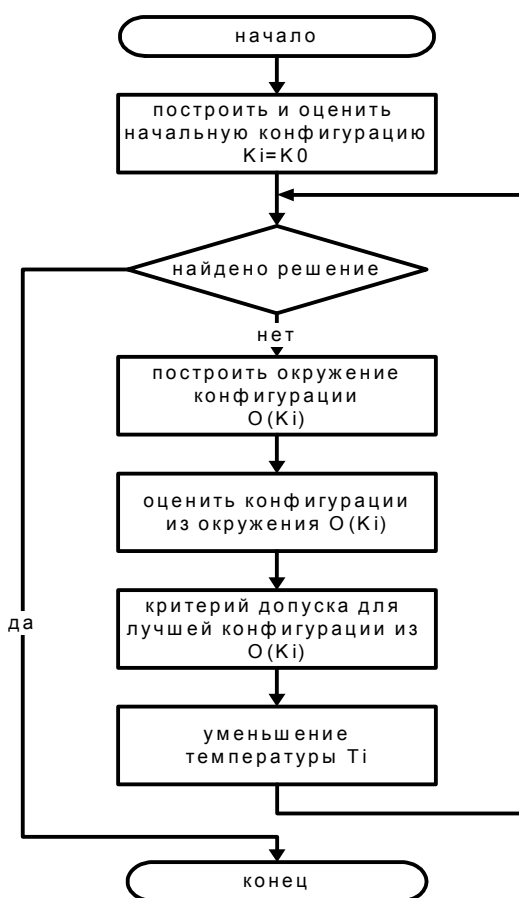


Рис. 2. Блок-схема алгоритма МО

Если в какой-либо момент работы метода найдено решение (это видно по значению функции стоимости), то работа завершается. Вторым формальным критерием остановки является достижение конечной температуры. Часто на практике также применяют ограничение по

времени работы алгоритма. В двух последних случаях решением задачи принимается последняя конфигурация K_i .

Вероятность принимать отрицательные решения в пункте 5 алгоритма существенно влияет на его работу. Наиболее часто используется распределение Больцмана

$$P = \exp(-\Delta C / kT_i) , \quad (8)$$

где k – подстроечная константа.

Такой подход позволяет при больших температурах принимать отрицательные изменения в оценке чаще, а также допускает большие такие изменения. При понижении температуры данная вероятность падает.

Приведенное описание метода МО фактически задает шаблон его реализации. В соответствии с разрабатываемой авторами методологии синтеза эволюционных методов [18], построение конкретного метода на основании заданного шаблона выполняется путем задания его компонент. В данном случае они перечислены в формуле (7).

Отметим, что близость подхода к ГА позволяет при конструктивном синтезе методов заимствовать следующие компоненты: кодирование решений-последовательностей, возмущающие операции, вид функций оценки и т.д.

После конструктивного задания метода алгоритмической реализации происходит экспериментальное обоснование эвристических параметров: расписания температур $\{T_i\}$, распределения принимать ухудшающие решения, критериев остановки и т.д.

Выполним конструктивное построение метода МО решения заданной задачи (6). В качестве потенциального решения (конфигурации в терминах МО) будем использовать двоичную последовательность. Одна такая последовательность кодирует сразу тройку объектов (Z_1, X_1, X_2) (рис. 3).

В качестве оценочной функции используется выражение (4). Для получения численного значения выполняется событийное моделирование исправного ЦУ A , которое начинает работу из состояния Z_1 , а на вход подаются входные наборы X_1 и X_2 . Вычисление данного значения, как отмечено выше, должно производиться только при моделировании второго входного набора X_2 , представленного в закодированной конфигурации.

Для построения новых конфигураций из текущей необходимо построить соответствующую операцию. Поскольку закодированная

конфигурация (рис. 3) представляет собой двоичную строку, то будем использовать операции мутации из простого ГА [18].

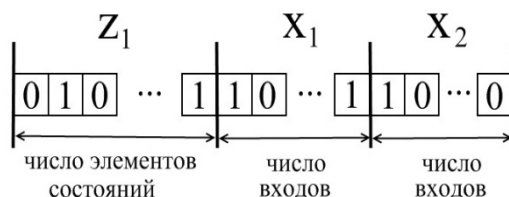


Рис. 3. Кодирование особи в алгоритме оценки пикового рассеивания тепла ЦУ

С описанными выше компонентами метод МО оценки пикового потребления мощности заданным ЦУ строится в соответствии с блок-схемой на рис. 2.

Как и при разработке других эволюционных (и эвристических алгоритмов в целом) важным является этап подбора эвристических констант, что осуществляется на основании предварительных экспериментов.

Результаты машинных экспериментов для метода МО оценки пикового рассеивания тепла приведены в табл. 1. Была проведена серия машинных экспериментов (около 5000), на основании которых выбраны следующие значения эвристических параметров: $T_0 = 120$ – начальная температура; $T_{\text{кон}} = 1$ – конечная температура, размер окружения (максимальное число конфигураций) для одной температуры равно 100; 50 – количество итераций без улучшения; константа Больцмана распределения (8) для средних схем: $k = 0,0001$, для больших $k = 0,000001$.

В качестве апробации эффективности предложенного метода использовались схемы из международного каталога ISCAS-89 [19]. Численные результаты экспериментов приведены в табл. 1. Результаты усреднялись для каждой схемы по 10 экспериментам. Колонка "моделирование отжига" содержит три столбца: "число событий" – параметр рассеивания тепла, который соответствует формуле (4); "вентильная активность" – показывает среднее число переключений вентиля при приложении входного набора X_2 , численно равен отношению параметра "число событий" к числу элементов в схеме; "время работы" – показывает время выполнения соответствующего алгоритма.

Для понимания эффективности ГА в колонке "случайный метод" даны результаты оценки рассеивания тепла при случайной генерации 500 000 раз тройки объектов (Z_1, X_1, X_2) .

Таблица 1

Численные результаты экспериментов оценки пикового рассеивания тепла

Схема	Число элементов в схеме	Случайный метод			Моделирование отжига		
		Число событий	Венти- льная актив- ность	Время, мин: сек	Число со- бы- тий	Венти- льная актив- ность	Время, мин:сек
s1196	578	902	1,56	3:18	978	1,69	0:04
s1238	557	880	1,58	3:41	984	1,76	0:03
s1269	637	1831	2,87	2:58	1885	2,96	0:18
s1423	756	1217	1,61	3:07	1228	1,62	0:36
s1488	689	1322	1,92	3:14	1322	1,92	0:02
s1494	683	1322	1,94	3:16	1322	1,94	0:02
s3271	1731	1054	0,61	3:49	1157	0,67	0:21
s3330	2037	2348	1,15	5:18	2471	1,21	0:37
s3384	1940	581	0,30	3:48	615	0,32	0:20
s4863	2514	7918	3,15	6:35	8881	3,53	1:01
s5378	3045	2091	0,69	4:30	2577	0,71	0:31
s6669	3460	1523	0,44	5:25	1572	0,45	0:46
s9234	5869	2534	0,43	6:13	2536	0,43	0:17
s13207	8775	665	0,08	8:58	672	0,08	0:28
s15850	10473	5752	0,55	13:14	5752	0,55	0:27
s35932	18151	44463	2,45	35:22	44463	2,45	4:37
s38417	23952	2794	0,12	20:40	2829	0,12	1:05
s38584	20998	9231	0,44	27:47	9231	0,44	1:48

Численные результаты показывают, что несмотря на достаточно ограниченную глубину поиска, метод МО позволяет найти более высокую оценку пикового значения рассеивания тепла в сравнении с очень глубоким случайным перебором. При этом время работы метода МО существенно меньше (на 1 – 2 порядка). Таким образом, в данной задаче эффективность метода моделирования отжига оказалась существенно выше глубокого случайного поиска.

Выводы. В статье предложен новый метод определения пикового рассеивания цифровых последовательностных устройств. В отличие от существующих, в качестве основы используется эволюционный алгоритм моделирования отжига. Показано, что задача является задачей идентификации внутреннего параметра устройства и сводится к максимизации функционала переключательной активности.

Выполнена алгоритмическая и программная реализация нового метода. По результатам экспериментов на контрольных схемах из международного каталога показана высокая эффективность метода в сравнении с глубоким псевдослучайным поиском.

В качестве дальнейших исследований можно отметить разработку аналогичных методов для оценки рассеивания тепла для различных режимов работы цифровых устройств.

Список литературы: 1. Белоус А.И. Методы минимизации энергопотребления при проектировании КМОП БИС / А.И. Белоус, И.А. Мурашко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 2. – С. 39-44. 2. Small C. Shrinking devices put the squeeze system packaging / C. Small // EDN. – 1994. – Vol. 39. – № 4. – P. 41-46. 3. Мурашко И.А. Методы оценки рассеиваемой мощности в цифровых КМОП схемах / И.А. Мурашко // Доклады БГУИР. – 2007. – № 1 (17). – С. 100-108. 4. Piguet C. Low-power CMOS circuits: technology, logic design and CAD tools / C. Piguet. – CRC/Taylor & Francis, 2005. – 440 p. 5. Soudris D. Designing CMOS circuits for low power / D. Soudris, C. Piguet, C. Goutis // Springer, 2002. – 277 p. 6. Integrated circuit and system design: power and timing modeling, optimization and simulation / Editor E. Macii, editor V. Paliouras // Proceedings of 14th International Workshop, PATMOS 2004. – Springer, 2004. – 910 p. 7. Pedram M. Power aware design methodologies / M. Pedram, Jan M. Rabaey. – Springer, 2002. – 521 p. 8. Najm F.N. Power estimation in sequential circuits / F.N. Najm, S. Goel, I.N. Hajj // Proc. Design Automation. – 1995. – P. 635-640. 9. Tsui C. Power estimation methods for sequential logic circuits / C. Tsui, J. Monterio, M. Pedram, A. Despain and B. Lin // IEEE Trans. on VLSI Systems. – 1995. – V. 3. – № 3. – P. 406-416. 10. Corno F. Prediction of Power Requirements for High-Speed Circuits / F. Corno, M. Rebaudengo, M. Sonza Reorda, G. Squillero, M. Violante // EvoTel2000: European Workshops on Telecommunications, Edinburgh (UK), May 2000. – P. 247-254. 11. Devadas S. Estimation of power dissipation in CMOS combinational circuits using Boolean function manipulation / S. Devadas, K. Keutzer, J. White // IEEE Trans. CAD. – 1995. – P. 373-383. 12. Kriplani H. Resolving signal correlations for estimating maximum currents in CMOS combinational circuits / H. Kriplani, F. Najm, P. Yang, I. Hajj // Proc. Design Automation Conf. – 1993. – P. 384-388. 13. Manne S. Computing the maximum power cycles of a sequential circuit / S. Manne, A. Prado, R.I. Bahar // Proc. Design Automation Conf. – 1995. – P. 23-28. 14. Wang C.-Y. Maximum power estimation for sequential circuits using a test generation based technique / C.-Y. Wang, K. Roy, T. L. Chou // Proc. of IEEE Custom Integrated Circuits Conf. – 1996. – P. 229-232. 15. Hsiao M. S. Peak power estimation using genetic spot optimization for large VLSI Circuits / M.S. Hsiao // Design, Automation and Test in Europe Conference. – 1999. – P. 175-179. 16. Shen A. An Average Power Dissipation and Random Pattern Testability of CMOS Combinational Logic Networks / A. Shen, A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer // Proc. IEEE International Conference on Computer-Aided Design. – 1992. – P. 402-407. 17. Иванов Д.Е. Параллельное моделирование неисправностей для последовательностных схем / Д.Е. Иванов, Ю.А. Скобцов // Искусственный интеллект. – 1999. – № 1. – С. 44-50. 18. Иванов Д.Е. Генетические алгоритмы построения входных идентифицирующих последовательностей цифровых устройств / Д.Е. Иванов. – Донецк, 2012. – 240 с. 19. Иванов Д.Е. Алгоритм симуляции отжига оптимизации рассеивания тепла диагностических тестов / Д.Е. Иванов, Р. Зуауи // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 7 (48). – С. 170-175. 20. Brgles F. Combinational profiles of sequential benchmark circuits / F. Brgles, D. Bryan, K. Kozminski // International symposium of circuits and systems, ISCAS-89. – 1989. – P. 1929-1934.

References:

1. Belous, A.I., and Murashko I.A. (2008), "Methods for minimizing energy consumption in the design of CMOS VLSI", *Technology and design in electronic equipment*, No. 2, pp. 39-44.

2. Small, C. (1994), "Shrinking devices put the squeeze system packaging", *EDN*, Vol. 39, No. 4, pp.41–46.
3. Muraschko, I.A. (2007), "Methods for estimating power dissipation in digital CMOS circuits", Reports of BSUIR, No. 1 (17), pp.100–108.
4. Piguët, C. (2005), *Low-power CMOS circuits: technology, logic design and CAD tools*, CRC/Taylor & Francis, 440 p.
5. Soudris, D., Piguët, C., and Goutis, C. (2002), *Designing CMOS circuits for low power*, Springer, 277 p.
6. Macii, E. (editor), and Paliouras, V. (editor) (2004), "Integrated circuit and system design: power and timing modeling, optimization and simulation", *Proceedings of 14th International Workshop, PATMOS*, Springer, 910 p.
7. Pedram, M., and Rabaey Jan, M. (2002), *Power aware design methodologies*, Springer, 2002. – 521 p.
8. Najm, F.N., Goel, S., and Hajj, I.N. (1995), "Power estimation in sequential circuits", *Proc. Design Automation*, pp. 635-640.
9. Tsui, C., Monterio, J., Pedram, M., Despain A., and Lin, B. (1995), "Power estimation methods for sequential logic circuits", *IEEE Trans. on VLSI Systems*, Vol. 3, pp. 406-416.
10. Corno, F., Rebaudengo, M., Sonza-Reorda, M., Squillero, G., and Violante, M. (2000), "Prediction of Power Requirements for High-Speed Circuits", *EvoTel2000: European Workshops on Telecommunications*, Edinburgh (UK), May, pp. 247-254.
11. Devadas, S., Keutzer, K., and White J. (1995), "Estimation of power dissipation in CMOS combinational circuits using Boolean function manipulation", *IEEE Trans. CAD*, pp. 373-383.
12. Kriplani, H., Najm, F., Yang, P., and Hajj, I. (1993), "Resolving signal correlations for estimating maximum currents in CMOS combinational circuits", *Proc. Design Automation Conf.*, pp. 384-388.
13. Manne, S., Prado, A., and Bahar, R.I. (1995), "Computing the maximum power cycles of a sequential circuit", *Proc. Design Automation Conf.*, pp. 23-28.
14. Wang, C.-Y., Roy, K., and Chou, T.L. (1999), "Maximum power estimation for sequential circuits using a test generation based technique", *Proc. of IEEE Custom Integrated Circuits Conf.*, pp. 229-232.
15. Hsiao, M.S. (1999), "Peak power estimation using genetic spot optimization for large VLSI Circuits", *Design, Automation and Test in Europe Conference*, pp. 175-179.
16. Shen, A., Ghosh, A., Devadas, and Keutzer, K. (1992), "An Average Power Dissipation and Random Pattern Testability of CMOS Combinational Logic Networks", *Proc. IEEE International Conference on Computer-Aided Design*, pp. 402-407.
17. Ivanov, D.E., and Skobtsov, Yu.A. (1999), "Parallel fault simulation for sequential circuits", *Artificial Intelligence*, No. 1, pp. 44-50.
18. Ivanov, D.E. (2012), *Genetic algorithms for constructing input identifying sequences of digital devices*, Donetsk, 240 p.
19. Ivanov D.E., and Zouioi R. (2010), "Simulated annealing algorithm for heat dissipation optimization of diagnostic tests", *Radioelectronic and computer systems*, No. 7 (48), pp. 170-175.
20. Brgles, F., Bryan, D., and Kozminski, K. (1989), "Combinational profiles of sequential benchmark circuits", *International symposium of circuits and systems, ISCAS-89*, pp. 1929–1934.

*Статтю представил д-р физ.-мат. наук, зам. директора по науке
ІПММ НАН України, Щербак В.Ф.*

Поступила (received) 18.04.2017

Ivanov Dmitry, Dr. Sci.Tech, Ass. Professor
Institute of Applied Mathematics and Mechanics,
Gen. Batyuka str., 19, Slavyansk, 84100
Tel: (063) 559-51-90, e-mail: dmitry.ivanov.iamm@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9956-6589

УДК 681.518:681.326.7

Алгоритм моделювання відпалу оцінки пікового розсіювання тепла цифрових схем / Іванов Д.Є. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 65 – 80.

Пропонується новий метод оцінки пікового розсіювання тепла цифрових схем. Задачу зведено до задачі ідентифікації параметру цифрового пристрою. Метод відноситься до недетермінованих еволюційних алгоритмів. В якості основи використовується метод симуляції відпалу побудови вхідних ідентифікуючих послідовностей. Виконано алгоритмічну та програмну реалізацію методу. Наведено результати апробації на контрольних схемах з міжнародного каталогу. Ил.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 20 назв.

Ключові слова: цифровий пристрій; еволюційний алгоритм; розсіювання тепла; моделювання відпалу.

УДК 681.518:681.326.7

Алгоритм моделирования отжига оценки пикового рассеивания тепла цифровых схем / Иванов Д.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 65 – 80.

Предлагается новый метод оценки пикового рассеивания тепла цифровых схем. Задача сведена к задаче идентификации параметра цифрового устройства. Метод относится к недетерминированным эволюционным алгоритмам. В качестве основы используется метод симуляции отжига построения входных идентифицирующих последовательностей. Выполнена алгоритмическая и программная реализация. Приведены результаты апробации на контрольных схемах из международного каталога. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 20 назв.

Ключевые слова: цифровое устройство; эволюционный алгоритм; рассеивание тепла; моделирование отжига.

UDC 681.518:681.326.7

An simulated annealing algorithm for evaluation of maximum heat dissipation of digital circuits / Ivanov D.E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 65 – 80.

A new method for estimating of the peak heat dissipation of digital circuit was developed. It is proposed to extend the evolutionary approach of constructing identifying sequences to the identification problems. The task is reduced to the task of identifying of an unknown internal parameter of a digital device. The method refers to nondeterministic evolutionary algorithms. As a basis for constructing of the input identification sequences, an annealing simulation method is used that maximizes the gate activity of the circuit for various input sequence. The application of previously developed heuristics of genetic algorithms is shown: the coding of individuals and populations, the construction of evaluation functions, etc. Algorithmic and software implementation was performed. The results of approbation on the control schemes from the international catalog ISCAS-89 are given. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 20 titles.

Keywords: digital circuit; evolutionary algorithms; heat dissipation; simulated annealing; heuristics.

В.В. КУЗЬМИН, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
В.И. НОСКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
В.С. ШПАТЕНКО, инженер, НТУ "ХПИ",
Г.В. ГЕЙКО, ст. преп., НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Проанализированы проблемы, связанные с модернизацией синхронных генераторов крупных электростанций. Разработан метод, позволяющий определить гармонический состав напряжения модернизированного генератора. Приведены результаты расчётов, по которым можно выполнить оценку правильности выбора оптимальной конструкции генератора. Ил.: 4. Табл.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: модернизация; синхронный генератор; гармонический состав; оптимальная конструкция генератора.

Постановка проблемы и анализ литературы. В современной энергетике актуальной является задача повышения эффективности работы крупных электростанций, которая решается модернизацией (реабилитацией) турбогенераторов (ТГ) на электростанциях или заводе-изготовителе [1 – 3]. На практике проблема улучшения формы напряжения решается двумя методами: для гидрогенераторов – за счёт изменения воздушного зазора в районе полюсного наконечника, для турбогенераторов – за счёт сокращения шага обмотки статора. Использование научно-технических инноваций [4] позволяет отказаться от устаревших методик проектирования и модернизации ТГ и обоснованно улучшить массо-габаритные показатели и качество напряжения синхронных ТГ с неявнополюсными и многофазными роторами. Для выбора и подтверждения наиболее приемлемой конструкции ТГ с использованием современных решений необходимо выполнить гармонический анализ его напряжения.

Гармонический состав и определение первой гармоники напряжения ТГ, по которой оценивается его работа, можно получить различными методами [5, 6]. Одним из основных методов гармонического анализа функций, удовлетворяющих условиям Дирихле, является метод, основанный на преобразовании Фурье. Однако, он хорошо работает при обработке информации относительно большой длительности и мало меняющихся параметрах. Поэтому для ТГ электростанций, работающих в широком диапазоне нагрузок, этот метод гармонического анализа напряжения неприемлем. В этой связи, потребовалась разработка метода определения гармонического состава

напряжения ТГ, который бы отличался необходимой точностью и требуемым быстродействием.

Целью статьи является разработка метода определения гармонического состава напряжения ТГ на этапе выполнения проектных работ и выполнения с его помощью оценки правильности выбора оптимальной конструкции ТГ.

При модернизации или создании новых ТГ появилась возможность обоснованного улучшения их конструкции за счёт изменения схемы его обмоток и числа пазов [1]. Подтверждением выбранного решения является исследование состава выходного напряжения ТГ. Правильно выполненная оценка состава высших гармоник позволяет выбрать оптимальную конструкцию ТГ. В частности, изменение формы, числа и распределения пазов позволит убрать из выходного напряжения гармоники до 7 порядка.

Пример использования метода. Отклонения формы напряжения от идеальной синусоиды регламентирует ГОСТ. В частности, для ТГ действующими стандартами предусмотрено, что значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения не должно превышать 5% и определяется по формуле

$$K_u = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где U_1 – действующее значение фазного напряжения 1-ой гармоники (основной частоты), $U_2, U_3, \dots, U_k$ – действующие значения фазного напряжения высших гармоник, кратных по частоте основной гармонике.

Для решения этой задачи предлагается использовать метод, основанный на применении формул Бесселя [6]. Как известно, периодическая функция может быть представлена тригонометрическим полиномом вида

$$y = \sum_{k=0}^n (A_k \cos kx + B_k \sin kx). \quad (2)$$

При этом, гармоники k -го порядка тригонометрического полинома определяются по выражению:

$$y_k = r_k \sin(kx + \varphi_k) = (r_k \sin \varphi_k) \cos kx + (r_k \cos \varphi_k) \sin kx, \quad (3)$$

где r_k и φ_k – соответственно амплитуда и фаза k -й гармоники ($k = \overline{1, n}$).

Введя обозначения:

$$A_k = r_k \sin \varphi_k; B_k = r_k \cos \varphi_k, \quad (4)$$

получаем

$$y_k = A_k \cos kx + B_k \sin kx. \quad (5)$$

Из (5) следует, что амплитуда k -ой гармоники может быть получена следующим образом

$$r_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}. \quad (6)$$

При этом, коэффициенты A_k и B_k могут быть определены по формулам:

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{v} \sum_{\lambda=1}^{2v} y_{\lambda}, & A_k &= \frac{1}{v} \sum_{\lambda=1}^{2v} y_{\lambda} \cos k\lambda \frac{\pi}{v}, \\ B_k &= \frac{1}{v} \sum_{\lambda=1}^{2v} y_{\lambda} \sin k\lambda \frac{\pi}{v}, & (k &= \overline{1, v-1}), \end{aligned} \quad (7)$$

где A_0 – постоянная составляющая, k – номер гармоники, v – количество интервалов, на которые разбивается период, y_{λ} – значение ординаты соответствующей функции [6].

Разбивая период функции на равные интервалы, по выражениям (6), (7) можно вычислить коэффициенты, которые будут определять амплитуды гармоник.

Анализ кривой изменения магнитодвижущей силы (МДС) в ТГ предлагается выполнять следующим образом: расчётная ступенчатая кривая МДС раскладывается на гармонические составляющие.

На рис. 1 показан полупериод зависимости магнитодвижущей силы Φ , возникающей в обмотке катушечного типа. Результаты расчёта для такой формы МДС приведены в табл. 1.

Расчёт коэффициентов поглощения гармоник напряжения в обмотке статора производится по формуле:

$$C_n = \cos(n(1 - t_w)90^0), \quad (8)$$

где n – порядковый номер гармоники, t_w – шаг обмотки (для диаметрального $t_w = 1$, для сокращённого $t_w = 0,8$).

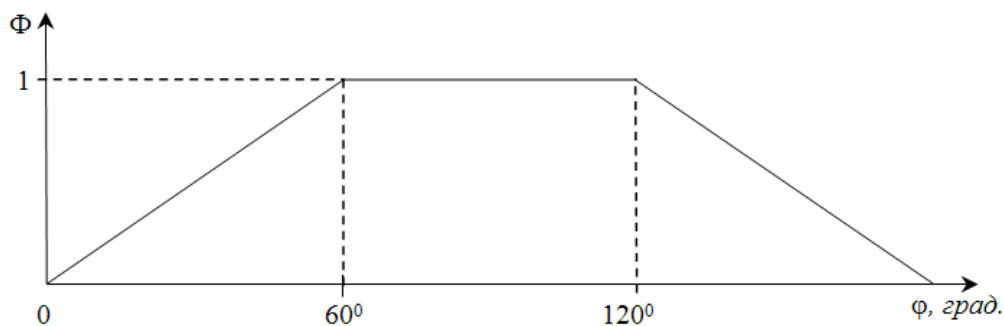


Рис. 1. Форма МДС

Таблица 1

Гармонический состав напряжения при различном исполнении обмотки статора

		Диаметральный шаг обмотки ($t_w = 1$)	Сокращённый шаг обмотки ($t_w = 0,8$)
Амплитуда гармоник	A_1	0,7442	0,7078
	A_2	0	0
	A_3	0,0018	0,0010
	A_4	0	0
	A_5	0,0320	0
	A_6	0	0
	A_7	0,0151	0,0089
	A_8	0	0
	A_9	0,0006	0,0006
	A_{10}	0	0
	A_{11}	0,0071	0,0068
		$K_u = 4,8550$	$K_u = 1,5906$

Традиционно, для снижения высших гармонических укорачивают шаг обмотки. Однако, такое решение приводит к ухудшению массо-габаритных показателей ТГ.

Во-первых, так как в большинстве пазов статора находятся стержни разных фаз, то при сокращении шага обмотки это создает значительные динамические усилия на пазовые клинья.

Для уменьшения тока в стержнях обмоток крупных ТГ выполняются обмотки статора с двумя параллельными ветвями, что ведёт к росту числа пазов в два раза, увеличению диаметра и длины сердечника статора, а также массы ТГ.

Во-вторых, укорочение шага обмотки несущественно влияет на амплитуду высших гармоник магнитного поля, которые продолжают создавать добавочные потери и динамические усилия в сердечнике

статора, а также электромагнитные и акустические излучения во внешнюю среду.

Используемый в настоящее время метод не приемлем для использования в ТГ с двухфазной обмоткой возбуждения.

Из-за существенного ограничения зоны расположения фазной обмотки ухудшается гармонический состав напряжения и коэффициент K_u становится больше 5% (рис. 2 и табл. 2).

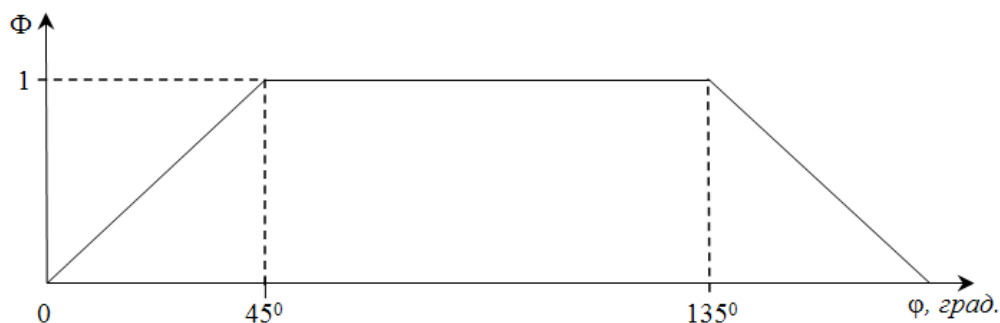


Рис. 2. Форма МДС

Таблица 2

Гармонический состав напряжения при различном исполнении обмотки статора

		Диаметральный шаг обмотки ($t_w = 1$)	Сокращённый шаг обмотки ($t_w = 0,8$)
Амплитуда гармоник	A_1	0,8092	0,7696
	A_2	0	0
	A_3	0,0873	0,0513
	A_4	0	0
	A_5	0,0342	0
	A_6	0	0
	A_7	0,0168	0,0099
	A_8	0	0
	A_9	0,0099	0,0094
	A_{10}	0	0
	A_{11}	0,0060	0,0057
		$K_u = 11,8555$	$K_u = 6,9377$

В [7, 8] предложены новые методы решения этой проблемы за счёт модернизации обмоток ротора, а не статора. Эффективность использования вариантов новой конструкции однофазной обмотки возбуждения подтверждается результатами проведённого исследования гармонического состава МДС (рис. 3 и табл. 3).

Отношение МДС в зоне А и в зоне В составляет

$$\frac{\Phi_A}{\Phi_B} = \frac{\Phi(36^\circ)}{1 - \Phi(36^\circ)} = \frac{2}{1}. \quad (9)$$

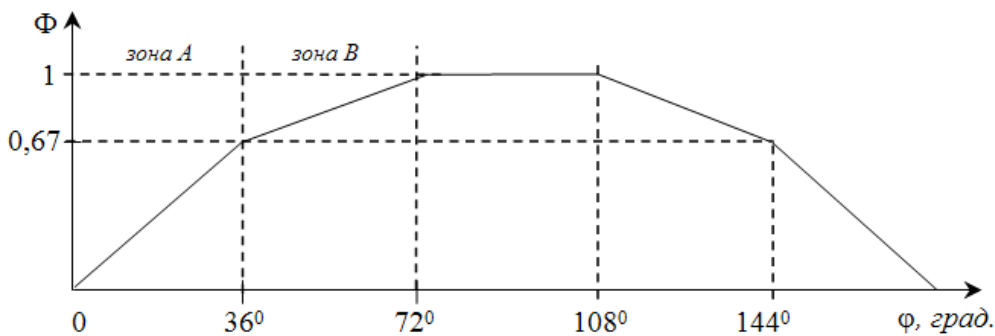


Рис. 3. Форма МДС

Таблица 3

Гармонический состав напряжения при различном исполнении обмотки статора

		Диаметральный шаг обмотки ($t_w = 1$)	Сокращённый шаг обмотки ($t_w = 0,8$)
Амплитуда гармоник	A_1	0,7359	0,6999
	A_2	0	0
	A_3	0,0186	0,0109
	A_4	0	0
	A_5	0,0023	0
	A_6	0	0
	A_7	0,0038	0,0022
	A_8	0	0
	A_9	0,0091	0,0087
	A_{10}	0	0
	A_{11}	0,0055	0,0053
		$K_u = 2,9714$	$K_u = 2,1524$

Этот новый вариант обмотки предназначен для использования в ТГ с водяным охлаждением обмотки статора.

В [7] предложено использовать вариант модернизации гидрогенераторов путём замены явнополюсного ротора на неявнополюсный.

Данные для исследования гармонического состава приемлемой конструкции двухфазной обмотки "корзиночного" типа приведены на рис. 4.

Отношение МДС:

$$\frac{\Phi_A}{\Phi_B} = \frac{\Phi(15^\circ)}{1 - \Phi(15^\circ)} = \frac{1}{2}. \quad (10)$$

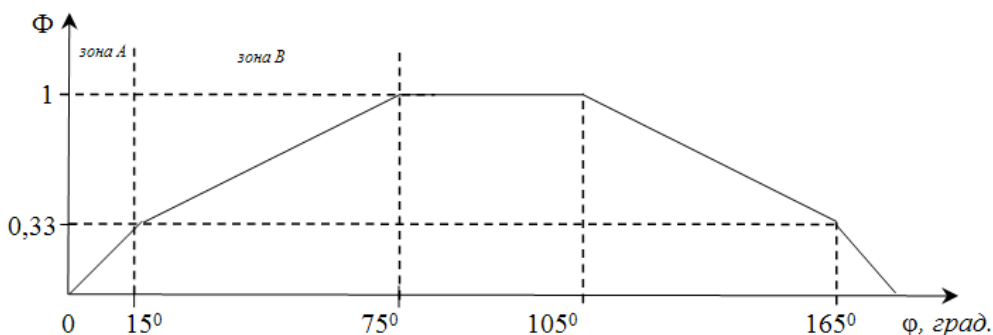


Рис. 4. Форма МДС

Таблица 4

Гармонический состав напряжения при различном исполнении обмотки статора

		Диаметральный шаг обмотки ($t_w = 1$)	Сокращённый шаг обмотки ($t_w = 0,8$)
Амплитуда гармоник	A_1	0,7013	0,6670
	A_2	0	0
	A_3	0,0030	0,0018
	A_4	0	0
	A_5	0,0255	0
	A_6	0	0
	A_7	0,0141	0,0083
	A_8	0	0
	A_9	0,0007	0,0007
	A_{10}	0	0
	A_{11}	0,0049	0,0046
		$K_u = 4,2354$	$K_u = 1,4521$

Этот вариант обмотки предназначен для использования в генераторах-двигателях с частотным регулированием оборотов (± 2 Гц).

В [8] показано, что использование новых конструкций обмоток ротора и статора позволяет значительно улучшить массо-габаритные параметры синхронного генератора (см. табл. 5).

При этом результаты анализа гармонического состава, приведённые в настоящей статье, показали, что отклонение формы напряжения от идеальной синусоиды не превышает допустимых значений.

Таблица 5

Параметры современных серийных ТГВ и новой (ТАВ) конструкций турбогенераторов (320 МВт, 50 Гц, с водяным охлаждением обмотки статора)

Параметр	Значение параметра	
	ТГВ	ТАВ
Длина статора, м	5,0	2,8
Внутренний диаметр статора, м	1,28	0,96
Шаг обмотки статора, о.е.	0,8	1
Плотность тока в обмотке, А/мм ²	6	12
Диаметр ротора, м	1,12	0,84
График МДС	рис. 1	рис. 3
Охлаждающий газ	водород	воздух
Масса генератора, т	340	110

Выводы. Разработан метод определения гармонического состава напряжения ТГ, который в отличие от существующих методов анализа, построенных на преобразовании Фурье, работает в широком диапазоне нагрузок и позволяет на этапе выполнения проектных работ и в процессе эксплуатации исследовать кривые МДС. Метод построен на использовании формул Бесселя, и в отличие от существующих методов анализа, построенных на преобразовании Фурье, работает в широком диапазоне нагрузок. Приведен пример расчёта, который подтверждает правильность выбранных решений при модернизации ТГ.

Список литературы. 1. Шевченко В.В. Пути повышения мощности турбогенераторов при проведении работ по их реабилитации / В.В. Шевченко // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харьков: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – 2012. – №7 (105). – С. 152-155. 2. Mohanta Rati Kanta Sources of vibration and their treatment in hydro power stations – A review / Rati Kanta Mohanta, Thanga Raj Chelliah, Srikanth Allamsetty, Aparna Akula, Ripul Ghosh // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2017. – Vol. 20. – P. 637-648. 3. Selak Luka Condition monitoring and fault diagnostics for hydropower plants / Luka Selak, Peter Butala, Alojz Sluga // Computers in Industry. – 2014. – Vol. 65. – Iss. 6. – P. 924-936. 4. Кузьмин В.В. Малозатратные и энергосберегающие технологии реабилитации турбогенераторов – основа технического перевооружения энергетики Украины / В.В. Кузьмин, А.Л. Ливиш, В.С. Шпаченко // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах // Наука, освіта і практика. – 2011. – № 1. – С. 216-217. 5. Носков В.И. Метод определения гармонического состава фазного тока статора асинхронного двигателя в системах регулируемых приводов / В.И. Носков, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко, М.В. Липчанский // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2015. – № 7 (132). – С. 59-61. 6. Серебренников М.Г. Гармонический анализ / М.Г. Серебренников. – М.: ОГИЗ, ГОСТЕХИЗДАТ. – 1948. – 504 с. 7. Новые концепции совершенствования электрооборудования ГЭС и ГАЭС. Рекомендации по модернизации генераторов и трансформаторов / В.В. Кузьмин, Т.В. Шпаченко, В.С. Шпаченко, Ю.Н. Бондаренко // Свідोцтво про реєстрацію авторського права на

твір № 65220. – Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України 06.05.2016.
8. Режимы возбуждения и устойчивость работы синхронных генераторов. Системный подход к повышению эффективности генерирования и передачи мощности в больших энергосистемах / В.В. Кузьмин, Т.В. Шпатенко, В.С. Шпатенко // Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір № 64346. – Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України 03.03.2016.

References:

1. Shevchenko, V.V. (2012), "Ways to increase the power of turbogenerators during rehabilitation works", *Information processing systems: research papers*, Kharkiv, Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, No. 7 (105), P. 152-155.
2. Mohanta Rati Kanta, Thanga Raj Chelliah, Srikanth Allamsetty, Aparna Akula, Ripul Ghosh (2017), "Sources of vibration and their treatment in hydro power stations – A review", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 20, pp. 637-648.
3. Luka Selak, Peter Butala, Alojzij Sluga (2014), "Condition monitoring and fault diagnostics for hydropower plants", *Computers in Industry*, Vol. 65, Iss. 6, pp. 924-936.
4. Kuzmin, V.V., Livshits, A.L., Shpatenko, V.S. (2011), "Low-cost and energy-saving technologies for the rehabilitation of turbogenerators - the basis for the technical re-equipment of the Ukrainian energy sector", *Problems of energy saving in electrical systems. Science, Education and Practice*, No. 1, pp. 216-217.
5. Noskov, V.I., Mezentsev, N.V., Gejko, G.V., Lipchanskij M.V. (2015), "The method for determination harmonic content of induction motors stator phase current in the systems of variable speed drives", *Information processing systems: research papers*, Kharkiv, Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, No. 7 (132), pp. 59-61.
6. Serebrennikov, M.G. (1948), *Harmonic analysis*, Moscow, OGIZ, GOSTEHIZDAT, 504 p.
7. Kuzmin, V.V., Shpatenko, T.V., Shpatenko, V.S., Bondarenko, Yu.N. (2016), *New concepts for improving the electrical equipment of HPS and HNPS. Recommendations for the modernization of generators and transformers*, Certificate of registration of copyright № 65220.
8. Kuzmin, V.V., Shpatenko, T.V., Shpatenko, V.S. (2016), *Excitation modes and stability of synchronous generators. A systematic approach to increasing the efficiency of generation and transmission of power in large power systems*, Certificate of registration of copyright № 64346.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Болюх В.Ф.

Поступила (received) 10.04.2017

Kuzmin Victor, Dr.Tech.Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Курпичова стр., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (050) 323-55-60, e-mail: tiger3ttt@rambler.ru
ORCID ID: 0000-0001-5632-7473

Noskov Valentin, Dr.Tech.Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Курпичова стр., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: val1942@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-7879-0706

Shpatenko Victor, engineer
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Курпичова стр., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002

Tel.: +38 (050) 323-55-60, e-mail: tiger3ttt@rambler.ru

ORCID ID: 0000-0003-3902-4854

Gejko Gennadij, senior lecturer

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute "

Курпучова str., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002

Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: gennady1752@gmail.com

ORCID ID: 0000-0001-6958-8306

УДК 681.5.015

Аналіз гармонійного складу напруги синхронних генераторів / Кузьмін В.В., Носков В.І., Шпатенко В.С., Гейко Г.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 81 – 91.

Проаналізовано проблеми, які пов'язані з модернізацією синхронних генераторів великих електростанцій. Розроблено метод, що дозволяє визначити гармонійний склад напруги модернізованого генератора. Наведено результати розрахунків, по яких можна виконати оцінку правильності вибору оптимальної конструкції генератора. Ил.: 4. Табл.: 4. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: модернізація; синхронний генератор; гармонійний склад; оптимальна конструкція генератора.

УДК 681.5.015

Анализ гармонического состава напряжения синхронных генераторов / Кузьмин В.В., Носков В.И., Шпатенко В.С., Гейко Г.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 81 – 91.

Проанализированы проблемы, связанные с модернизацией синхронных генераторов крупных электростанций. Разработан метод, позволяющий определить гармонический состав напряжения модернизированного генератора. Приведены результаты расчётов, по которым можно выполнить оценку правильности выбора оптимальной конструкции генератора. Ил.: 4. Табл.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: модернизация; синхронный генератор; гармонический состав; оптимальная конструкция генератора.

UDC 681.5.015

The harmonic composition of the voltage synchronous generators analysis / Kuzmin V.V., Noskov V.I., Shpatenko V.S., Gejko G.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 81 – 91.

The problems connected with the modernization of large power plants synchronous generators are analyzed. A method that makes it possible to determine the harmonic composition of the modernized generator voltage has been developed. The results of calculations on which it is possible to evaluate the correctness of the choice of generator optimal design are presented. Figs.: 4. Tabl.: 4. Refs.: 8 titles.

Keywords: modernization; synchronous generator; harmonic composition; generator optimal design.

В.С. СУЗДАЛЬ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков,
Ю.М. ЕПИФАНОВ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков,
И.И. ТАВРОВСКИЙ, канд. техн. наук, Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков

МАТРИЧНЫЕ НЕРАВЕНСТВА В СИНТЕЗЕ УПРАВЛЕНИЯ РОСТОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

Рассмотрен синтез управления установкой для выращивания методом Бриджмена-Стокбаргера органических монокристаллов, позволяющий решить многоэтапную задачу адаптивной стабилизации скорости роста кристалла. Синтез управления системой проведен на основе решения матричных неравенств с таблично задаваемыми параметрами стабилизирующего регулятора для разных этапов выращивания монокристаллов. Ил.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: матричные неравенства; монокристалл; метод Бриджмена-Стокбаргера; система; синтез управления.

Постановка проблемы. В настоящее время в качестве сцинтилляторов в науке и технике получили широкое распространение органические монокристаллы. Органические кристаллы (ОМК) обладают наилучшими характеристиками для решения задач спектрометрии короткопробежных заряженных частиц и быстрых нейтронов. Наиболее известны органические кристаллы стильбена и паратерфенила. Последний кристалл, является наиболее эффективным органическим сцинтиллятором с наилучшими механическими характеристиками.

ОМК выращиваются методом Бриджмена-Стокбаргера в ростовых ампулах на затравочный кристалл [1]. Современная установка для выращивания ОМК представляет собой вертикальную шахтную печь, разделенную диафрагменной перегородкой на верхнюю "горячую" камеру и нижнюю "холодную", в которой проводят отжиг выращенного кристалла (рис. 1) [2]. В промышленных условиях ростовая камера установки для выращивания ОМК состоит из двух концентрически расположенных и центрированных стеклянных труб. На внутренней трубе (внешняя – не показана) намотаны нижний и верхний нагреватели, которые при управлении тепловым режимом выращивания взаимно влияют друг на друга. Ампула с кристаллом перемещается в ростовой печи с помощью вытягивающего механизма. При выращивании крупных ОМК (диаметр 80–120 мм) наблюдается эффект существенного ослабления конвекции воздуха диафрагмой, разделяющей камеры печи. На начальной стадии роста, когда ампула опускается из верхней в

нижнюю камеру, перекрывая отверстие диафрагмы, возникают нестационарные конвективные потоки, за счет увеличения площади экранирования ростового пространства.

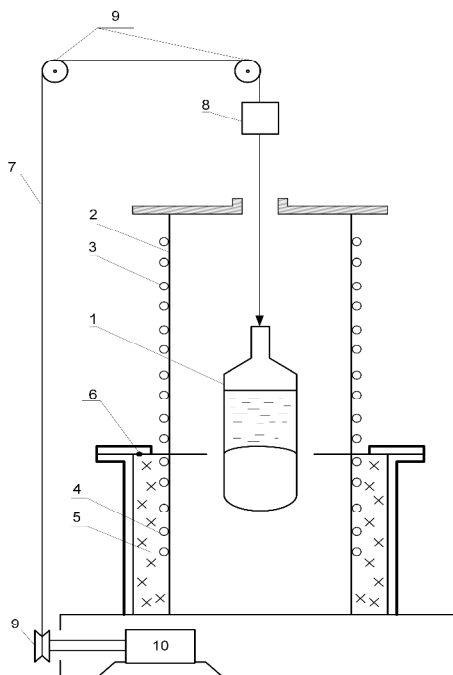


Рис. 1. Структурная схема установки для выращивания ОМК

1 – ампула, 2 – внутренняя труба, 3, 4 – верхний и нижний нагреватели, 5 – теплоизоляция нагревателя, 6 – разделительная диафрагма, 7 – металлический трос, 8 – груз, 9 – система шкивов, 10 – двигатель перемещения ампулы

Это приводит к изменению тепловых условий выращивания и к тому, что фронт кристаллизации вначале смещается вниз, относительно первоначального положения, затем поднимается вверх, по мере прохождения дна ампулы через диафрагму, в результате чего меняется форма фронта кристаллизации и скорость роста. Фронт кристаллизации имеет вогнутую форму, а скорость роста вначале уменьшается, а затем возрастает, причем более чем в два раза. При этом происходит нарушение условий торцевого теплоотвода и однородности теплофизических условий кристаллизации на поверхности раздела кристалл-расплав и, следовательно, ухудшается качество монокристалла.

Данные для идентификации объекта управления (ОУ) получены в реальном масштабе времени при выращивании монокристалла стибьена на двух этапах роста ОМК: до перекрытия и при перекрытии дном ампулы отверстия диафрагмы.

Процесс выращивания рассматривался как двухмерный линейный стационарный ОУ второго порядка с двумя входными величинами и двумя выходами – напряжение управления температурой и температура "горячей" и "холодной" камеры, соответственно.

На первом этапе роста параметры модели ОУ в пространстве состояний:

$$A = \begin{bmatrix} -0.5443 & -0.007845 \\ -0.007845 & -0.5207 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1.047 & 0 \\ -0.198 & -0.2383 \end{bmatrix}, \quad (1)$$
$$C = \begin{bmatrix} 0.2296 & -0.6169 \\ 0.44 & -0.2748 \end{bmatrix}, D = 0.$$

На втором этапе роста параметры модели объекта:

$$A = \begin{bmatrix} -1.049 & -0.07195 \\ -0.0715 & -0.5738 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0.4942 \\ -0.5708 & -0.9914 \end{bmatrix}, \quad (2)$$
$$C = \begin{bmatrix} 1.077 & -2.26 \\ 0 & -0.5644 \end{bmatrix}, D = 0.$$

Модели полностью управляемы и наблюдаемы.

Следовательно, установку для выращивания ОМК необходимо рассматривать как многомерный линейный непрерывный объект управления с неопределенностью, для которого необходимо решить задачу стабилизации температурного поля. При этом выбор оптимального регулятора проведем на основе синтеза управления с таблично задаваемыми параметрами стабилизирующего регулятора, для разных этапов выращивания.

Анализ литературы. Синтез управления процессами кристаллизации ОМК для решения задачи стабилизации в терминах матричных неравенств можно производить на основе LQR оптимального синтеза [3, 4]. Синтез основан на интегральных квадратичных функционалах, с достаточной для практики исследовательского проектирования, мерой адекватности. Они характеризуют точность управления и энергетические затраты управляющих устройств, т.е. решается задача о таком выборе законов управления, чтобы эти характеристики достигали своих экстремальных значений с учетом требования устойчивости замкнутых систем.

Пусть математическая модель ОУ в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(0) = x_0, \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (4)$$

где $x(t) \in R^n$ – n -мерный вектор состояния системы, $u(t) \in R^m$ – m -мерный вектор управления и $y(t) \in R^q$ – q -мерный вектор контролируемых координат. Реализацию в пространстве состояний (3), (4) обозначим тройкой матриц (A, B, C) .

Введем понятие – стабилизирующий регулятор:

$$u = Kx(t), \quad (5)$$

где K – матрица параметров регулятора соответствующего порядка.

В системе для синтеза LQR с реализацией (A, B, C) и указанными начальными условиями, задается интегральный квадратичный функционал в виде

$$J = \int_0^{\infty} (y^T Q y + v u^T R u) dt = \int_0^{\infty} (x^T C^T Q C x + v u^T R u) dt, \quad (6)$$

где Q – знакоположительная матрица, R – положительно определенная матрица, $v > 0$ – весовой коэффициент.

Решая задачу LQR-оптимального синтеза, находят такую матрицу K , чтобы функционал (6) достигал своего наименьшего значения, по отношению ко всем другим матрицам коэффициентов усиления, обеспечивающим асимптотическую устойчивость замкнутой системы

$$J = J(K) \rightarrow \min_{K \in \Omega},$$

где Ω – множество матриц K таких, что корни характеристического полинома замкнутой системы $\Delta = \det(I_n - A + BK)$ расположены в открытой левой полуплоскости.

Предполагается, что матрицы R , Q и коэффициент v в функционале (6) LQR-синтеза заданы. Однако, на практике их приходится многократно изменять, чтобы добиться желаемого качества процесса управления с учетом ограничений на реальные возможности управлений.

Вместе с тем, возможен альтернативный и более эффективный путь синтеза стабилизирующих регуляторов, основанный на применении теории линейных матричных неравенств и алгоритмов их решения, реализованных в среде МАТЛАБ [5, 6]. В основу численных методов решения линейных матричных неравенств положены методы выпуклой оптимизации [7].

Цель статьи – разработка адаптивного управления процессом выращивания ОМК путем решения задачи стабилизации температурного поля, в терминах теории линейных матричных неравенств.

Управление по состоянию. В терминах матричных неравенств задача синтеза стабилизирующих регуляторов в пространстве состояний сводится к решению системы неравенств (СМН)

$$YA^T + AY + Y\Theta^T B^T + B\Theta Y < 0, \quad Y > 0. \quad (7)$$

Из СМН необходимо найти пару матриц (Y, Θ) .

Известны два способа решения этой задачи [5]. Один из этих способов состоит в том, чтобы ввести новую матричную переменную $Z = \Theta Y$ и записать неравенства (7) в виде линейных матричных неравенств

$$YA^T + AY + Z^T B^T + BZ < 0, \quad Y > 0, \quad (8)$$

относительно переменных Y и Z . Находя пару (Y, Z) , удовлетворяющую (8), вычисляют параметры искомой обратной связи

$$\Theta = ZY^{-1}. \quad (9)$$

Для объекта (1) с реализацией (A, B, C) решим систему линейных матричных неравенств (8) в среде МАТЛАБ, используя команды `lmivar`, `lmiterm`, `feasp` из LMI Toolbox. Все детали, относительно использования этих и других команд LMI Toolbox, содержатся в [8].

Выбраны, следующие параметры алгоритма оптимизации команды `feasp`:

$$options = [0 \quad 0 \quad 27e+006 \quad 0 \quad 0].$$

Решение СМН (8) дает пару матриц

$$Y = \begin{bmatrix} 4.6861 & 0.2266 \\ 0.2266 & 4.5455 \end{bmatrix} \times 1.0e+006,$$
$$Z = \begin{bmatrix} 0.0166 & 1.5192 \\ 0.0776 & 2.5222 \end{bmatrix} \times 1.0e+006.$$

Стабилизирующий регулятор Θ вычислен по выражению (9)

$$\Theta = \begin{bmatrix} -0.0126 & 0.3349 \\ -0.0103 & 0.5554 \end{bmatrix}.$$

Собственные числа замкнутой системы -0.5511 и -0.3020 , то есть замкнутая система устойчива.

На рис. 2 приведены переходные характеристики температур "горячей" и "холодной" камер по управлению "горячей" камерой в системе с регулятором Θ для первого этапа выращивания. Здесь и далее (рис. 3, 4) температура "горячей" камеры, обозначена сплошной линией, а "холодной" камеры – штриховой линией.

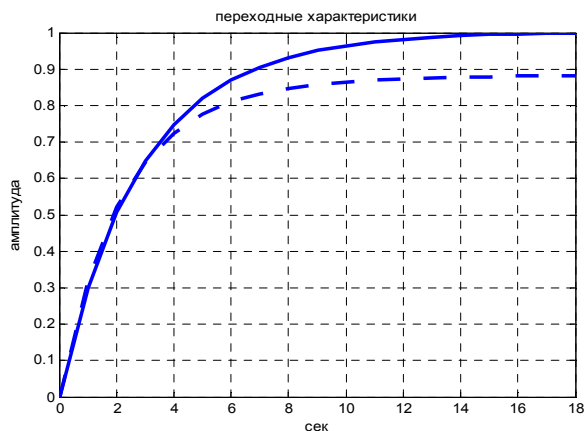


Рис. 2. Первый этап выращивания. Переходные характеристики, в системе с регулятором Θ по управлению "горячей" камерой

Управление по выходу. Рассмотрим управляемый объект (3), (4) с неизмеримым состоянием. Требуется построить линейный динамический регулятор k -порядка, обеспечивающий асимптотическую устойчивость замкнутой системы. В [5] показано, что в терминах матричных неравенств синтез стабилизирующего регулятора по выходу k -порядка, в случае $k \neq 0$, сводится к синтезу статического регулятора по выходу для вспомогательного объекта

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}^* &= A_0 \bar{x} + B_0 \bar{u}, \\ \bar{y} &= C_0 \bar{x}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$A_0 = \begin{bmatrix} A & 0_{n \times k} \\ 0_{k \times n} & 0_{k \times k} \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0_{n \times k} & B \\ I_k & 0_{k \times n} \end{bmatrix}, \quad C_0 = \begin{bmatrix} 0_{k \times n} & I_k \\ C & 0_{n \times k} \end{bmatrix}.$$

Пусть $\bar{u} = \Theta \bar{y}$, тогда матрица замкнутой системы $A_c = A_0 + B_0 \Theta C_0$ и соответствующие блоки матрицы Θ будут определять параметры динамического регулятора k -порядка.

В терминах СМН задача синтеза сводится к решению системы неравенств

$$YA_0^T + A_0Y + YC_0^T \Theta^T B_0^T + B_0 \Theta C_0 Y < 0, \quad Y > 0. \quad (11)$$

Введем новую матричную переменную

$$Z = \Theta C_0 Y, \quad (12)$$

тогда из (11) получаем систему линейных матричных неравенств

$$YA_0^T + A_0Y + Z^T B_0^T + B_0 Z < 0, \quad Y > 0, \quad (13)$$

относительно Y и Z . Пусть (Y, Z) – некоторое решение этой системы. Тогда, для нахождения элементов матрицы параметров Θ необходимо решить систему уравнений (12), которая может оказаться несовместной, даже если требуемый регулятор и существует. В этом случае задача решается через нахождение взаимнообратных матриц [5, 6].

Для первого этапа выращивания первый способ синтеза управления по выходу, при параметрах алгоритма оптимизации команды *feaspr*:

$$options = [0 \quad 0 \quad 14e+006 \quad 0 \quad 0],$$

дает следующую матрицу параметров регулятора:

$$\Theta = \begin{bmatrix} 0.7149 & 0.3063 & 0 \\ -1.2267 & -0.1043 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Собственные числа замкнутой системы $-0.5993+0.3504i$, $-0.5993-0.3504i$ и -0.5435 , то есть замкнутая система устойчива.

На рис. 3 приведены переходные характеристики температур "горячей" и "холодной" камер по управлению "горячей" камерой в системе с регулятором по выходу, для первого этапа выращивания.

Анализ переходных характеристик в системе с синтезированными регуляторами показывает, что для выращивания ОМК наиболее приемлемым является регулятор по выходу, параметры которого задаются матрицей (14). Этот регулятор обеспечивает в переходном процессе перерегулирование до 10% и постоянную времени до 2 с, что полностью отвечает требованиям к качеству управления.

Проведем синтез стабилизирующего регулятора по выходу для второго этапа выращивания. При параметрах алгоритма оптимизации команды *feaspr* $options = [0 \quad 0 \quad 16e+006 \quad 0 \quad 0]$, синтез регулятора по выходу дает следующую матрицу параметров

$$\Theta = \begin{bmatrix} 1.5842 & 7.2374 & 0 \\ 0.2404 & 2.5916 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Собственные числа замкнутой системы -4.6187 , -1.0756 и -0.8558 , т.е. замкнутая система устойчива.

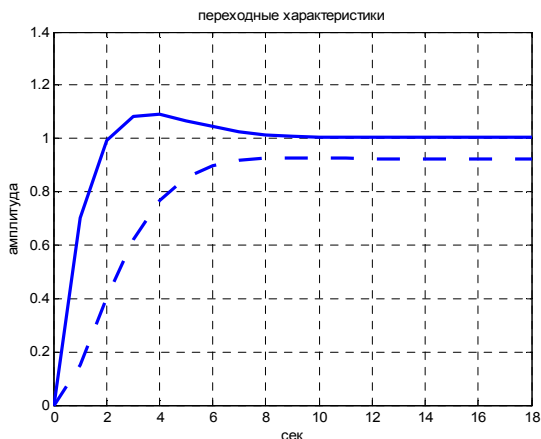


Рис. 3. Первый этап выращивания. Переходные характеристики в системе по управлению "горячей" камерой с регулятором по выходу

На рис. 4 приведены переходные характеристики температур "горячей" и "холодной" камер по управлению "горячей" камерой в системе с регулятором по выходу для второго этапа выращивания.

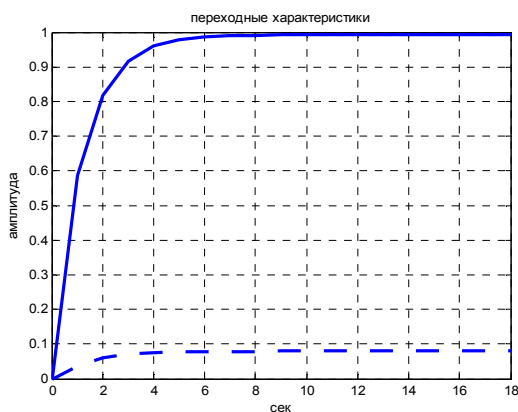


Рис.4. Второй этап выращивания. Переходные характеристики в системе по управлению "горячей" камерой с регулятором по выходу

Анализ переходных характеристик в системе с регулятором по выходу для второго этапа выращивания, когда ростовая ампула перекрывает своим дном отверстие диафрагмы, показывает, что при удовлетворительном качестве управления температурой, ее изменение в "горячей" камере мало влияет на температуру "холодной", где проводится отжиг выращенного монокристалла.

Выводы. В результате проведенной работы для установки выращивания ОМК, которая рассматривалась как многомерный линейный непрерывный объект управления с неопределенностью, решена задача стабилизации температурного поля. Выбор оптимального регулятора для выращивания ОМК проведен на основе синтеза в терминах матричных неравенств с таблично задаваемыми параметрами стабилизирующего регулятора для разных этапов выращивания.

Оптимизация процесса управления установкой для выращивания ОМК позволила решить многоэтапную задачу адаптивной стабилизации скорости роста кристалла, а, значит, и повысить его качество.

Список литературы: 1. Stockbarger D. The production of large single crystals / D. Stockbarger . – Rev. Sci. Instr. – 1936. – Vol. 7. – № 3. – P. 133-136. 2. Пат. 93940 Украина, МПК С30 В 15/20, G05D 27/00. Устройство для выращивания монокристаллов из расплава в ампуле / Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Козьмин Ю.С., Будаковский С.В., Щелкалин В.Н., Тевяшев А.Д.; заявитель и патентообладатель ИСМА, г. Харьков. – № а 200908356; заявл. 07.08.2009; опубл. 25.03.2011. Бюл. № 6. 3. Хлебников М.В. Синтез оптимальной обратной связи при ограниченном управлении / М.В. Хлебников, П.С. Щербakov. – Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 177–192. 4. Честнов В.Н. Синтез дискретных H_∞ -регуляторов по заданному радиусу запасов устойчивости и времени регулирования / В.Н. Честнов. – Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 9. – С. 65-82. 5. Федотов И.А. Синтез ПИД-регуляторов на основе методов пространства состояний и техники линейных матричных неравенств / И.А. Федотов // Вестник Нижегородского ун-та. – Н. Новгород: Нижегородский ун-т, 2014. – № 4-1. – С. 14-17. 6. Balandin D.V. LMI-based optimal attenuation of multistory building oscillations under seismic excitations / D.V. Balandin, M.M. Kogan // Structural Control and Health Monitoring. – 2005. – Vol. 12. – № 2. – P. 213-224. 7. Nesterov Y.E. Interior-Point Polynomial Algorithms in Convex Programming. Studies in Applied Mathematics / Y.E. Nesterov, A. Nemirovski. – Philadelphia: SIAM Publications. – 1994. – 405 p. 8. Gahinet P. The LMI Control Toolbox. For Use with Matlab. User's Guide / P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, M. Chilali. – Massachusetts: Natick, The MathWorks, Inc. – 1995. – 310 p.

References:

1. Stockbarger, D. (1936), "The production of large single crystals", *Rev. Sci. Instr.*, Vol. 7, No. 3, pp. 133-136.
2. Suzdal, V.S., Yepifanov, Yu.M., Kozmin, Yu.S., Budakovskiy, S.V., Schelkalin, V.N., and Tevyashev, A.D. (2011), *Device for growing single crystals from a melt in an ampoule*, Patent UA, No. 93940.
3. Khlebnikov, M.V., and Shcherbakov, P.S. (2014), "Optimal Feedback Synthesis under Bounded Control", *Automation and telemechanics*, No. 2, pp. 177-192.

4. Chestnov, V.N. (2014), "Discrete H_∞ -controllers synthesis for a given radius of stability stocks and control time", *Automation and telemekhanics*, No. 9, pp. 65-82.
5. Fedotov, I.A. (2014), "PID-controllers synthesis on the basis of state space methods and linear matrix inequality techniques", *Herald of the N. Novgorod Un-ty*, N. Novgorod, No. 4-1, pp. 14-17.
6. Balandin, D.V., and Kogan, M.M. (2005), "LMI-based optimal attenuation of multistory building oscillations under seismic excitations", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 12, No. 2, pp. 213-224.
7. Nesterov, Y.E., and Nemirovski, A. (1994), *Interior-Point Polynomial Algorithms in Convex Programming*, Studies in Applied Mathematics, SIAM Publications, Philadelphia, 405 p.
8. Gahinet, P., Nemirovski, A., Laub, A.J., and Chilali, M. (1995), *The LMI Control Toolbox. For Use with Matlab. User's Guide*, Natick, MA: The MathWorks, Inc., 310 p.

Статтю представил д-р физ.-мат. наук, зав. отделом 2319 ИСМА НАН Украины Тарасов В.А.

Поступила (received) 12.04.2017

Suzdal Viktor, Dr. Sci. Tech., Senior Researcher,
ISMA NAS of Ukraine,
Nauki Ave., 60, Kharkov, Ukraine, 61072.
Tel.: (057) 341-01-45, email: suzdal@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0002-3816-9886

Yepifanov Yuriy, Dr. Sci. Tech., Senior Researcher,
Nauki Ave., 60, Kharkov, Ukraine, 61072.
Tel.: (057) 341-01-45, email: epiphanov@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0003-2303-9138

Tavrovskiy Ihor, PhD Tech.,
ISMA NAS of Ukraine,
Nauki Ave., 60, Kharkov, Ukraine, 61072.
Tel.: (057) 341-01-45, email: tawr@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0001-9175-1667

УДК 621.3.078.3

Матричні нерівності в синтезі керування ростовими установками / Суздаль В.С., Єпіфанов Ю.М., Тавровський І.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 92 – 102.

Розглянуто синтез керування установкою для вирощування методом Бриджмена-Стокбаргера органічних монокристалів, що дозволяє вирішити багатоетапну задачу адаптивної стабілізації швидкості росту кристала. Синтез керування системою проведений на основі рішення матричних нерівностей з параметрами стабілізуючого регулятора, що задаються в табличному вигляді для різних етапів вирощування монокристалів. Іл.: 4. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: матричні нерівності; монокристал; метод Бриджмена-Стокбаргера; система; синтез керування.

УДК 621.3.078.3

Матричные неравенства в синтезе управления ростовыми установками / Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Тавровский И.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 92 – 102.

Рассмотрен синтез управления установкой для выращивания методом Бриджмена-Стокбаргера органических монокристаллов, позволяющий решить многоэтапную задачу адаптивной стабилизации скорости роста кристалла. Синтез управления системой проведен на основе решения матричных неравенств с таблично задаваемыми параметрами стабилизирующего регулятора для разных этапов выращивания монокристаллов. Ил.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: матричные неравенства; монокристалл; метод Бриджмена-Стокбаргера; система; синтез управления.

UDC 621.3.078.3

Matrix inequalities in control synthesis of growth installations / Suzdal V.S., Yepifanov Y.M., Tavrovskiy I.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 92 – 102.

The control synthesis of an installation for Bridgman-Stockbarger method growing organic single crystals is considered, which makes it possible to solve the multistage problem of adaptive stabilization of a crystals growth rate. The control system synthesis is based on the solution of matrix inequalities with tabulated parameters of the stabilizing regulator for different stages of growing crystals. Figs.: 4. Refs.: 8 titles.

Keywords: matrix inequalities; single crystal; Bridgman-Stockbarger method; system; synthesis of control.

V.I. TIKHONOV, Dr. of Tech. Sciences, prof., "ONAT", Odessa

GENERALIZED FOURIER TRANSFORMS BASED ON QUANTUM UNCERTAINTY PRINCIPLE

In this paper, basic forms of Fourier analysis considered – harmonic series, integrals and discrete transforms with respect to engineering approach. Quantum uncertainty relation introduced for bound time-frequency metrics in harmonic function presentation. Generalized Fourier transforms determined on the basis of unified summation-integration operator. This extends the scope of harmonic analysis application. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: Fourier analysis; quantum uncertainty relation; generalized Fourier transforms; harmonic analysis application.

The problem statement. Many outstanding achievements were obtained on the basis of spectral analysis methods, named after the great French mathematician of the 19th century J. Fourier (1768 – 1830). In the modern coding theory, data transmission and processing, Fourier analysis is one of the most important mathematical tools, which is based on classical theory of Fourier series and integrals. The classical Fourier series describes a periodic function as a superposition of discrete harmonic functions with a finite or infinite set of frequencies. A lot of physical phenomena can be simulated by periodic processes that adequately modeled by Fourier series. To study non-periodic functions, Fourier proposed continuous integral transforms. Modern tasks of harmonic analysis widely use discrete spectral transforms. It should be noted, that the classical Fourier analysis operates with idealized models of physical processes, and no method known to clearly divide physical phenomena into classes, which explicitly relevant to harmonic series, integrals or discrete frameworks. This makes difficult comprehensive understanding and practical use of Fourier analysis methods. Therefore, an actual problem rises on further unification of various harmonic analysis forms with particular focus on engineering applications.

Related publications survey. Trigonometric series were used in periodic function analysis before Fourier researches by mathematics d'Alembert, Euler, Bernoulli and Gauss, [1]. In 1755 L. Euler in his "Differential Calculus" wrote a chapter "On the representation of functions by series", [2]. In 1805 K. Gauss, in his unpublished work, presented the method of interpolation of orbital measurements, which can be considered a prototype of modern discrete trigonometric transforms, [3]. In 1807, J. Fourier reported at the Paris Academy his results on the propagation of heat in a solid body, where he firstly described arbitrary functions with the help of trigonometric series. This work was criticized by many famous scientists of that time; in

1812, J. Fourier received the Academy award, and in 1817 he became a member of the Paris Academy. But only 15 years later, after the death of the academy secretary, J. Fourier published his well-known paper "Analytical theory of heat" (1822), where new method proposed of integral transforms to describe heat transfer processes [4]. The Fourier theory of heat propagation had not been recognized for a long time; later on, this approach, referred to as harmonic Fourier analysis, got various applications (Fourier series and integrals, discrete transforms, fast discrete transforms) [5]; this theory was completed after J. Fourier, when D. Hilbert became an authoritative mathematician of that time (1862-1943). The direct integral Fourier transform maps a given continuous time function whose modulus is integrated on an infinite real time axis, to its spectral image as a function of the continuous frequency, also defined on the infinite real axis, [6]. Integral transforms and Fourier series are effectively used in various fields of physics and geometry, optics, number theory, combinatory, signal processing, probability theory, etc. In fact, in the Fourier series, the periodicity of the process is required, and the Fourier integral considers functions integrated on an infinite time axis, or in an infinite range of continuous frequencies. For these reasons, modern applications of spectral analysis widely apply discrete Fourier transforms (DFT), as well as special algorithmic methods to accelerate the DFT processing, aka fast Fourier transform (FFT), [7].

An increase in the speed of Fourier transforms is an important problem for many technical applications. In this direction, many works contributed. The origins of the DFT and FFT go back to the aforementioned work of Gauss (1805); however, the widely known today algorithm of the FFT was developed after 160 years by IBM engineers (1965), [8]. The terms FFT and DFT are similar in that the FFT is a special algorithm for calculating the DFT, which differs from the direct calculation of the DFT by its determining formulas.

In recent years, works have appeared in the literature in which attempts have been made to construct generalized Fourier transforms, [9 – 11]. In [9] a formula found that relates the Fourier transform of a radial function on R_n with the Fourier transform of the same function defined on R_{n+2} . In [10] a survey in a nutshell given on diverse known forms of Fourier analysis, including the so called short-time Fourier transforms firstly introduced by D. Gabor (1946). In [11] a generalized Fourier transform presented with the use of is the cylindrical Bessel function. We note that in known forms of Fourier analysis, the time and frequency domains commonly are not bound.

Objective. *In this paper, we intend to construct generalized Fourier transforms with bound time and frequency domains that include harmonic series, integrals, and discrete Fourier transforms as special cases.*

Methodology aspects of Fourier analysis. In math literature for engineers, the classic Fourier analysis is usually represented by two main sections: "Fourier series" and "Fourier integrals"; an extra item is discrete Fourier transform as a section of numerical methods for solving a wide class of applied problems, [5]. Consider some methodological aspects of Fourier series, integrals and discrete Fourier transforms with respect to engineering applications.

Fourier series. The Fourier series calculus represents a periodic real function $f(t)$ of a real argument t with a repetition period T that satisfies the Dirichlet conditions, as the sum of a trigonometric series. According to the Dirichlet conditions, the $f(t)$ function must be single-valued, piecewise-continuous and piecewise-monotone (that is, to have a finite number of discontinuities and extrema), and be absolutely integrable (have a finite integral value $\int_0^T |f_T(t)| dt$, [5 – 7]. The direct mapping $f(t) \rightarrow \{a_0, a_n, b_n\}$ of the function $f(t)$ into the set of coefficients of the Fourier series $\{a_0, a_n, b_n\}$, $n = 1, 2, \dots$, has the form:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt, \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T} dt, \quad n = 1, 2, \dots, \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T} dt, \quad n = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

The inverse mapping on $\{a_0, a_n, b_n\} \rightarrow f(t)$ means presentation the function $f(t)$ as Fourier series sum

$$f(t) \rightarrow a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} \left(a_n \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T} + b_n \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T} \right). \quad (2)$$

If function $f(t)$ has a finite set of Fourier series terms, than inverse mapping $\{a_0, a_n, b_n\} \rightarrow f(t)$ in (2) is exhaustive (with some inaccuracy of trigonometric functions calculation). In case of infinite set of Fourier series terms, one can only approximate $f(t)$ by partial sum of trigonometric series. The Fourier series presentation (1) and (2) evolve to more compact complex view in normalized interval $T = 2 \cdot \pi$:

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot e^{-i \cdot n \cdot t} dt, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3)$$

$$f(t) \rightarrow \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \cdot e^{i \cdot n \cdot t}, \quad t \in [0, 2\pi]. \quad (4)$$

The complex coefficients c_n are related to real numbers a_0, a_n, b_n :

$$\begin{cases} a_0 = 2 \cdot c_0; & a_n = c_{+n} + c_{-n}; & b_n = c_{-n} - c_{+n}, \\ c_0 = \frac{a_0}{2}; & c_{+n} = \frac{a_n - i \cdot b_n}{2}; & c_{-n} = \frac{a_n + i \cdot b_n}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Integral Fourier transforms. The direct integral Fourier transform is applied to a function $f(t)$ defined on an infinite axis of the independent argument $t \in (-\infty, +\infty)$; as a rule but not necessary, the time axis supposed. The complex Fourier integral is defined with respect to absolutely integrable real or complex function $f(t)$, i.e. such one, that the integral $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt$ exists and is finite [5 – 7].

Direct and inverse integral Fourier transforms are often written in symmetrical form:

$$\begin{cases} \bar{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} dt, \\ f(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{f}(\omega) \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} d\omega. \end{cases} \quad (6)$$

Understanding Fourier series and integrals relationships. We will compare the relevance of Fourier series and integrals (1-6) with respect to engineering tasks. An actual issue is consideration about Fourier integral transforms as generalized Fourier series. In other words, are Fourier series a particular case of Fourier integrals? Formally, a periodic function that satisfies the Dirichlet conditions is not absolutely integrable in an infinite time interval.

For instance, function $f(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } t \in \pm n \cdot [0, \pi] \\ -1, & \text{if } t \in \pm n \cdot [\pi, 2\pi] \end{cases}$ is obviously representable by Fourier series; instead, the integral $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt = \infty$ does not exist as a finite number. In fact, the requirement of $f(t)$ periodicity for adequate representation by Fourier series can be mitigated, if determined $f(t)$ on a bound normalized interval $t \in [0, 2\pi]$, where $f(t + 2\pi) = f(t)$; herewith, Fourier series calculation remains unchanged, but function $f(t)$ itself turns into absolutely integrable and presentable by Fourier integral [7].

It can be shown that the spectrum of such a function will also be discrete, and the inverse integral transformation will become a sum very similar to the sum of the Fourier series. But still, with this approach, the coefficients c_n of the Fourier series in (3) do not coincide with the amplitudes $\bar{f}(\omega)$ of the discrete harmonics in (6). This is because of different normalizations in Fourier integral and Fourier series coefficients calculus.

We will represent the direct and inverse transforms of (3) and (4) in symmetric form:

$$\begin{cases} c_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot e^{-i \cdot n \cdot t} dt, & n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \\ f(t) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \cdot e^{i \cdot n \cdot t}, & t \in [0, 2\pi]. \end{cases} \quad (7)$$

Compare (6) and (7) to get the following. If frequency ω in (6) takes solely integer values $\omega_n = n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, then transforms (7) may consider a special case of integral transforms (6). However, in general, this does not happen. For complete embracing Fourier series by Fourier integral forms, an essential detail needed more, this is a unified way of scaling time t and frequency ω . This aspect discussed onwards in the context of the time-to-frequency quantum uncertainty principle.

Discrete Fourier Transforms. In applications, the discrete form of Fourier transforms (DFT) widely used, as well as special algorithms for accelerated computation of the DFT – the so-called Fast Fourier transforms (FFT), [7 – 8]. The symmetric form of direct/inverse discrete DFT is:

$$\begin{cases} \bar{x}(k) = \sqrt{\frac{1}{N}} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp(-i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot n), & k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \\ x(n) = \sqrt{\frac{1}{N}} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \bar{x}(k) \cdot \exp(i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot n), & n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \end{cases} \quad (8)$$

where $x(n)$, $\bar{x}(k)$ are ordered sets of N real or complex numbers. These sets of numbers can be regarded as the coordinates of vectors in some complex space; so, for simplicity, we will designate both $x(n)$ and $\bar{x}(k)$ as vectors x and $\bar{x}$, if no ambiguity seemed. The discrete Fourier transforms can also be written in terms of matrix or tensor operations for convenient program coding.

Let complex kernels of sum operators (8) be complex conjugate unitary matrices F and F^* with the property $F^* \cdot F = F \cdot F^* = I$, where I is the diagonal unit matrix:

$$\begin{cases} F^* = F^*(n, k) = \sqrt{\frac{1}{N}} \cdot \exp(-i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot n), \\ F = F(k, n) = \sqrt{\frac{1}{N}} \cdot \exp(i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot n \cdot k). \end{cases} \quad (9)$$

With notation introduced above, the DFT pair becomes:

$$\begin{cases} \bar{x} = x \cdot F^*, \\ x = \bar{x} \cdot F. \end{cases} \quad (10)$$

Substitute $\bar{x}$ from the first into the second transform (10), we obtain

$$x = \bar{x} \cdot F = (x \cdot F^*) \cdot F = x \cdot (F^* \cdot F) = x \cdot I = x. \quad (11)$$

The unitarity of discrete Fourier transform matrix. The unitarity of the discrete Fourier transform matrix is the key feature to validate the one-to-one mapping property of $(x = \bar{x} \cdot F) \leftrightarrow (\bar{x} = x \cdot F^*)$. Unlike rather abstract reasoning for convergence Fourier series sum and inverse integral Fourier transform [6, 7], the unitarity of the discrete transformation matrix is simply derived by elementary geometric progression and *primitive complex unity root* [9].

Let a geometric progression given as a numerical sequence $\{a_k\}$ with a real or complex denominator $q \neq 1$:

$$\{a_k\} = a_0, a_0 \cdot q, a_0 \cdot q^2, \dots = \{a_0 \cdot q^k\}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

The partial sum of a segment of this sequence is calculated by the following formula, [5]:

$$\sum_{k=L}^K \{a_k\} = \frac{a_L - a_K \cdot q}{1 - q}, \quad L < K. \quad (13)$$

In particular, the initial sum of the progression terms from 0 to N is

$$\sum_{k=0}^N \{a_k\} = \frac{a_0 - a_N \cdot q}{1 - q}. \quad (14)$$

Let consider a special case of a geometric progression – the so-called *cyclic progression*, in which the initial and final elements of a periodic segment match, i.e. $a_L = a_K$, $L < K$. In this case, the sum of the cyclic segment terms is simplified

$$\sum_{k=L}^K \{a_k\} = \frac{a_L - a_L \cdot q}{1 - q} = a_L \cdot \frac{1 - q}{1 - q} = a_L. \quad (15)$$

In particular, if $a_0 = a_K = 1$, then (15) evolves to $\sum_{k=0}^K \{a_k\} = 1$. This will be used in consideration the primitive complex unity root 1_C defined as [9]:

$$1_C := \exp(i \cdot 2 \cdot \pi), \quad i := \sqrt{-1}. \quad (16)$$

The following property of the primitive root 1_C holds: if some number μ is an integer, then the expression $(1_C)^\mu$ equals 1; if μ not integer, then $(1_C)^\mu \neq 1$: integer

$$(1_C)^\mu \begin{cases} = 1, & \text{if } \mu \text{ is integer number,} \\ \neq 1, & \text{if } \mu \text{ is not integer number.} \end{cases} \quad (17)$$

It is not hard to find property (17) using the well-known Euler formula $\exp(i \cdot \varphi) = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi$, taking into account that $\cos 2\pi = 1$, and $\sin 2\pi = 0$. Now, consider the following sequence

$$\left\{ \exp\left(i \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu}{N}\right)^k \right\} = \left\{ [(1_C)^{\frac{\mu}{N}}]^k \right\}, \quad |\mu| < N; \quad k = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (18)$$

According to the primitive root 1_C property (17), along with $|\mu| < N$, the $q = (1_C)^{\frac{\mu}{N}}$ can be denominator of the following geometric progression

$$\left\{ [(1_C)^{\frac{\mu}{N}}]^k \right\} = \{q^k\}, \quad |\mu| < N; \quad k = 0, 1, 2, \dots, N, \dots \quad (19)$$

Obviously, the initial and final terms of sequence (19) have the same values: $a_0 = q^0 = 1$; $a_N = q^N = [(1_C)^{\frac{\mu}{N}}]^N = (1_C)^{\frac{\mu}{N} \cdot N} = (1_C)^\mu = 1$, as μ is an integer number. The partial sum of (19) is

$$\sum_{k=0}^N [(1_C)^{\frac{\mu}{N}}]^k = \sum_{k=0}^N q^k = 1. \quad (20)$$

Since the last term of the series (19) is 1, it follows from (20) that partial sum of (19) omitting the last term with number N , is zero:

$$\sum_{k=0}^{N-1} [(1_C)^{\frac{\mu}{N}}]^k = \sum_{k=0}^N q^k - 1 = 0. \quad (21)$$

The formula (21) is the principal key to justify the unitarity of the DFT matrix. Consider the product of DFT (8) substituting n by m in F matrix defined in (9):

$$F^* \cdot F = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} F^*(n, k) \cdot F(k, m) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \exp(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{(n-m)}{N} \cdot k). \quad (22)$$

Denote $\mu = n - m$. Since $n < N, m < N$, it is $|\mu| = |n - m| < N$ and $\frac{\mu}{N} \neq 1$; therefore, $\exp(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{(n-m)}{N} \cdot k) = [\exp(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{\mu}{N})]^k = [(1_C)^{\frac{\mu}{N}}]^k$. Compare the last expression with (21), we can see that $F^* \cdot F = 1$ for $n = m$, and $F^* \cdot F = 0$ for $n \neq m$, i.e. F, F^* are unitary matrices. Hence it is also easy to show that $F \cdot F^* = (F^* \cdot F)^* = I^* = I$.

Generalized Fourier Transforms. It was shown above that integral Fourier transforms (6) look like embracing the Fourier series (3); however, the non-correspondence of time/frequency scaling in Fourier series (3) and integrals (6) hinders complete unification of these two forms of harmonic analysis. These issues are discussed below in more details.

Consider relationship between Fourier series and DFT. Suppose vector $x = x(n)$ as function $\bar{f}(t)$ quantization product, assuming that $\bar{f}(t)$ determined on a bounded half-open interval $t \in [0, T)$ and satisfied the Dirichlet conditions (in order to be representable by Fourier series). Despite function $\bar{f}(t)$ is not periodic in our case, the time interval $[0, T)$ can be interpreted as a part of an extended time interval $0 \leq t < \infty$ [7]

$$\cup \langle [0, T)_1, [0, T)_2, [0, T)_3, \dots \rangle = [0, 3 \cdot T), \dots \rightarrow \langle 0 \leq t < \infty \rangle. \quad (23)$$

Now, the closure of a half-open interval $[0, T)$ by a point $t = T$ together with its neighborhood, along with function definition in the neighborhood of T under condition $f(0) = f(T)$, allows function $\bar{f}(t)$ in a half-open interval $t \in [0, T)$ considered as one period of a periodic function $f(t)$ determined on the interval $0 \leq t < \infty$. Function $f(t)$ defined on a closed interval $[0, T]$ of the real axis $t \in R$ where $f(0) = f(T)$, we denote as *quasi-periodic function with a half-open repetition period* $t \in [0, T)$ that is closed on the left and is open to the right. However, integration $f(t)$ on entire

closed interval $[0, T]$ in (1) is not absolutely accurate to our mind, as point $t = T$ does not belong to the period of function $f(t)$. This aspect seems to be the core issue in unification diverse forms of harmonic analysis. Fig. 1 shows vector $x = x(n)$ as quantified function $f(t)$ on interval $t \in [0, T]$ partitioned in 8 quanta $\Delta t = \frac{T}{8}$. Eight discrete function samples are taken at the beginning of each Δt quantum. The last point $n = 9$ of the interval does not belong to the period of function repetition and does not carry additional information, since $x(9) \equiv x(0)$. To overcome the issue of the wrong extra point within the closed integration interval $t \in [0, T]$ of a periodic function $f(t)$, we propose to change the commonly used open time axis $-\infty < t < +\infty$ for a closed loop-time, or *topological time-circle* C with normalized length $\sqrt{2 \cdot \pi}$. Herewith, two marginal points of closed linear interval $t \in [0, T]$ will merge into one joint point $t = 0 = \sqrt{2 \cdot \pi}$. Next, we postulate the quantum uncertainty relationship (QUR) to bound frequency and time arguments along with known Heisenberg uncertainty principle in quantum physics [10]

$$\Delta t \cdot \Delta \omega = \frac{2 \cdot \pi}{N}. \quad (24)$$

Define symmetric normalized form of QUR [11]

$$\Delta t = \Delta \omega = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{N}}. \quad (25)$$

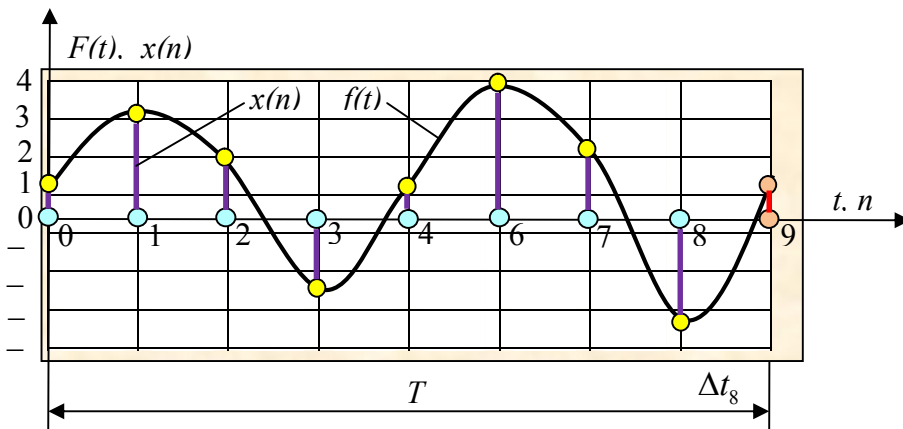


Fig. 1. Vector of function quantization in time

In this case, time and frequency arguments $t, \omega \in C$ vary in normalized *time-circle* interval C . Here, DFTs (8) evolve to integral sums along unified contour C [5, 6]:

$$\begin{cases} \bar{x}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \sum_{t \in C} x(t) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) \cdot \Delta t, \\ x(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \sum_{\omega \in C} \bar{x}(\omega) \cdot \exp(i \cdot t \cdot \omega) \cdot \Delta \omega. \end{cases} \quad (26)$$

Substitute $\bar{x}(\omega)$ in the second equation of (26) for its form in the first equation (26), changing argument t for τ in the second equation (26), we obtain the following identity:

$$\begin{aligned} x(\tau) &= \frac{\Delta t \cdot \Delta \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_{t \in C} x(t) \cdot \sum_{\omega \in C} \exp[i \cdot (\tau - t) \cdot \omega] = \\ &= \sum_{t \in C} x(t) \cdot I(\tau, t) = x(\tau). \end{aligned} \quad (27)$$

Introduce "*unified summation-integration operator*" (USO) on a *circle* interval, which is scaled to the standard interval C of $\sqrt{2 \cdot \pi}$ length; it is similar to common contour integral, so denote USO as $\oint_t f(\)$ in time domain or $\oint_\omega f(\)$ in frequency domain. For example,

$$\oint_t f(\) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \sum_{t \in C} f(\) \cdot \Delta t. \quad (28)$$

Depending on the context, we understand $\oint f(\)$ as integral sum or as a contour integral where $N \rightarrow \infty$, $\Delta_{N \rightarrow \infty} = \frac{2 \cdot \pi}{N} \rightarrow 0$. Rewrite (26) omitting dt or $d\omega$ as default given symbols:

$$\begin{cases} \bar{x}(\omega) = \oint_t x(t) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t), \\ x(t) = \oint_\omega \bar{x}(\omega) \cdot \exp(+i \cdot t \cdot \omega). \end{cases} \quad (29)$$

A pair of equations (29) we define as generalized Fourier transforms (GFT). Due to (27), it is clear that GFTs provide one-to-one mapping of the original function $x(t)$ into its spectral image $\bar{x}(\omega)$: $x(\tau) \leftrightarrow \bar{x}(\omega)$ for any finite or infinite number of intervals of partitioning the argument, starting from the value $N = 2$ (solely inaccuracy may occur in approaching trigonometric

functions). The GFT introduced above may have two marginal interpretations – discrete form (if $N > 1$ is finite digital number) and continuous form (if $N \rightarrow \infty$, $\Delta t, \Delta \omega \rightarrow 0$), Fig. 2. In discrete interpretation form, the GPF (29) is equivalent to DFT with special scaling in (8). In continuum interpretation form, we obtain unified transforms which include Fourier series and integrals as particular cases among many other intermediate forms.

Besides, depending on specific spectrum distribution $|\bar{x}(k)|^2$, two extreme typical cases observed (both in the discrete and continuum forms):

1) Prototype of Fourier series (spectrum $|\bar{x}(k)|^2$ concentrated at points of a multiple frequency); when $N \rightarrow \infty$, $\Delta t \rightarrow 0$, we obtain Fourier series;

2) Prototype of Fourier integral (spectrum $|\bar{x}(k)|^2$ distributed fairly evenly); when $N \rightarrow \infty$, $\Delta t \rightarrow 0$, we obtain Fourier integral.

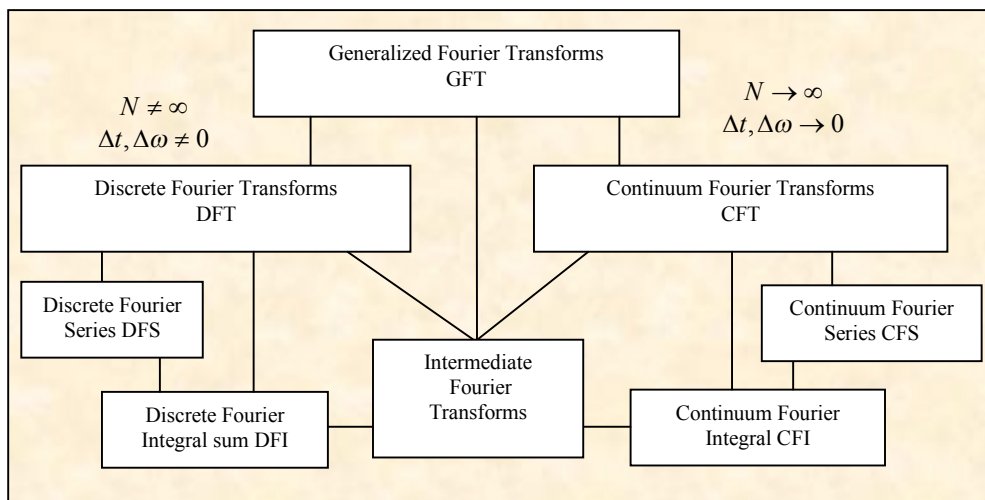


Fig. 2. Interpretation diversity of generalized Fourier transforms

Based on generalized Fourier transforms (GFT), it becomes rather conditional in separation the classes of functions representable by Fourier series or integrals, since many intermediate forms can be observed by GFT. Similarly, no sense to categorize discrete and continuum Fourier transforms, as in limit $N \rightarrow \infty$, the GFT embraces both Fourier series and integrals among the other transitional forms. Given approach seems reasonable for practical applications and theoretical study by engineers.

Conclusion. An adequate utilization of theoretical methods is a non-trivial task in applied researches. The classic approach provides at least three widely known forms of signal representation by trigonometric functions (Fourier series, Fourier integrals and discrete Fourier transforms), as well as variety of application algorithms; this raises methodological issues for

development engineers caused by the lack of clear problem identification for relevant methods, as well as the absence of exact formalized relationships between the three forms of Fourier analysis. In this work, unification of three popular forms of Fourier harmonic analysis introduced based on fundamental physical principle of quantum uncertainty; this principle formulated as quantum uncertainty relation between the time and frequency arguments. Similar to classic Riemann integral, presented a unified summation-integration operator (USO) with symmetrically scaled variables of time and frequency; due to the USO, symmetric forms of generalized direct/inverse Fourier transforms constructed. These observations provide a unified method of harmonic Fourier analysis both in theoretical and empirical planes.

References:

1. Anand. A.V. (2010), *A brief study of discrete and fast Fourier transforms (1. History and introduction)*, available at: <http://www.math.uchicago.edu/~may/VIGRE/VIGRE2010/REUPapers/Anand.pdf>.
2. "E212 – *Institutiones calculi differentialis cum eius usu in analysi finitorum ac doctrina serierum (Foundations of Differential Calculus, with Applications to Finite Analysis and Series)*", available at: <http://eulerarchive.maa.org/pages/E212.html>.
3. Heideman M., Johnson D., and Burrus C. (1985), "Gauss and the history of the fast Fourier transform", *Archive for History of Exact Sciences*, 1985, 34 (3), pp. 265–277.
4. Fourier J. (1988), *Théorie analytique de la chaleur*, A. Paris, Firmin Didot Père et Fils, 1822, 639 p., available at: https://www.irphe.fr/~clanet/otherpaperfile/articles/Fourier/N0029061_PDF_1_676.pdf.
5. Korn G., and Korn T. (1968), *Mathematical handbook for scientists and engineers*, McGraw-Hill Book Co., N.Y., 1097 p.
6. Buhler T., and Salamon D.A. (2017), *Functional Analysis*, ETH Zurich, available at: <https://people.math.ethz.ch/~salamon/PREPRINTS/funcana.pdf>.
7. Osgood B. *Lecture Notes for EE 261. The Fourier Transform and its Applications*, Electrical Engineering Department, Stanford University, 422 p., available at: <https://see.stanford.edu/materials/lsoftae261/book-fall-07.pdf>.
8. Cooley J., and Tukey J. (1965), *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*, Math. Comput., available at: <http://garfield.library.upenn.edu/classics1993/A1993MJ84400001.pdf>.
9. Grafacos L., and Teschl G. (2013), *On Fourier transforms of radial functions and distributions*, available at: <https://arxiv.org/pdf/1112.5469.pdf>.
10. Muller M. (2015), *The Fourier Transform in a Nutshell*, available at: https://www.researchgate.net/publication/290440858_The_Fourier_Transform_in_a_Nutshell.
11. Yao J., Williams C.L., Hussain F., and Kouri D.J. (2017), *Generalized Fourier transform method for nonlinear anomalous diffusion equation*, available at: <https://arxiv.org/pdf/1701.03488.pdf>.
12. McClellan J., and Rader C., (1979), *Number theory in digital signal processing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 288 p.
13. Hizenberg W., (1949), *The physical principles of the quantum theory*, available at: <https://books.google.com.ua/books?id=T9zCAGAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Heisenberg+principl>.
14. Tichonov V.I., (1981), *Umkehraufgaben und Datenbewertung*, Berichte der Mathematisch-Statistischen Sektion im Forschungszentrum Graz, Bericht Nr. 172, 106 p.

The article is presented by doctor of technical sciences, professor, the head of "Radio and Television" depart. of the "Institute of Radio, Television and Information Security" of "O.S. Popov ONAT", Honored Worker of Science and Technology of Ukraine Gofiyzen O.V.

Received 29.05.2017

Tikhonov Victor
Doctor of technical science, associate professor
Laureate of the Ukraine State Prize for Science and Technology,
Professor of Communication Networks department
O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications
1 Kuznechna St., Odessa 65029, Ukraine
Tel.: 067-752-13-90
E-mail: victor.tykhonov@onat.edu.ua

УДК 519.6

Узагальнені перетворення Фур'є на основі принципу квантової невизначеності. / Тіхонов В.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 103 – 116.

У статті розглядається питання гармонійного аналізу функцій, в тому числі рядів Фур'є, інтегралів і дискретних перетворень з точки зору інженерних застосувань. Введено квантове співвідношення невизначеностей для пов'язаних метрик часу частоти у частотному представленні функції часу. Визначені узагальнені перетворення Фур'є на основі уніфікованого оператора сумування-інтегрування. Ил.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: гармонійний аналіз функцій; співвідношення квантової невизначеності; узагальнені перетворення Фур'є.

УДК 519.6

Обобщенные преобразования Фурье на основе принципа квантовой неопределенности / Тихонов В.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 103 – 116.

В статье рассматриваются вопросы гармонического анализа функций, в том числе ряды Фурье, интегралы и дискретные преобразования с точки зрения инженерных приложений. Введено отношение квантовой неопределенности для связанных частотно-временных метрик в частотной представлении функции времени. Определены обобщенные преобразования Фурье на основе унифицированного оператора суммирования-интегрирования. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: гармонический анализ функций; отношение квантовой неопределенности; обобщенные преобразования Фурье.

UDC 519.6

Generalized Fourier transforms based on quantum uncertainty principle / Tikhonov V.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 103 – 116.

In this paper, basic forms of Fourier analysis considered – harmonic series, integrals and discrete transforms with respect to engineering approach. Quantum uncertainty relation introduced for bound time-frequency metrics in harmonic function presentation. Generalized Fourier transforms determined on the basis of unified summation-integration operator. This extends the scope of harmonic analysis application. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: Fourier analysis; quantum uncertainty relation; generalized Fourier transforms; harmonic analysis application.

Ю.С. ШПАКОВИЧ, асп., ХНУРЭ, Харьков,

Т.В. ЖЕМЧУЖКИНА, канд. техн. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков,

Т.В. НОСОВА, канд. техн. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В данной работе с помощью тестов на единичные корни Дики-Фуллера и Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина на стационарность проанализированы электромиографические сигналы для правильного выбора статистических, корреляционных и спектральных методов исследования. Также был определен временной интервал, в течение которого сигналы можно рассматривать как кусочно-стационарные. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: электромиографические сигналы; стационарность; временной интервал, тесты на единичные корни.

Постановка проблемы. В настоящее время для анализа электромиографических (ЭМГ) сигналов используют заимствованные преимущественно из статистической радиофизики и широко используемые физиологами в научной работе методы спектрально-корреляционного анализа [1]. Но стоит отметить, что важным критерием при выборе методов анализа реальных сигналов является определение их стационарности и однородности.

Большинство случайных сигналов на практике имеют в целом нестационарный характер. Для целей измерения и анализа часто удается рассмотреть процесс как кусочно-стационарный. Но существуют ситуации, когда такой подход к сбору и анализу данных нецелесообразен, и индивидуальные реализации процесса приходится рассматривать как нестационарные.

Если статистические свойства случайного процесса не изменяются при переносе начала отсчета времени, такие процессы являются стационарными. Понятие "стационарность" относится к статистическим характеристикам, полученным путем усреднения по ансамблю реализаций. Однако на практике часто говорят о стационарности или нестационарности данных, которые являются одной реализацией случайного процесса. В этом случае стационарность понимают в несколько ином смысле. Если об одной реализации говорят как о стационарной, то обычно имеют в виду, что ее свойства существенно не изменяются от интервала к интервалу [2].

Для проведения статистического и спектрально-корреляционного анализа сигнал ЭМГ с некоторыми допущениями при исследовании считают стационарным сигналом. При таком подходе усреднение по

© Ю.С. Шпакович, Т.В. Жемчужкина, Т.В. Носова, 2017

времени может дать результаты, имеющие смысл для некоторых параметров и по некоторым специфическим условиям, однако в целом дает сильно искаженные оценки. Следовательно, для использования статистических и спектрально-корреляционных методов анализа ЭМГ сигнала представляется необходимым исследовать сигнал на стационарность или определить интервал стационарности для анализа его как кусочно-стационарного.

Анализ литературы. Цифровой сигнал ЭМГ можно рассматривать как временной ряд значений амплитуды биоэлектрической активности мышц от времени. Временным рядом называется последовательность упорядоченных во времени числовых показателей, характеризующих уровень состояния и изменения изучаемого явления.

Временной ряд называется стационарным в узком смысле, если для каждого момента времени случайные величины имеют одинаковые распределения, т.е. справедливо соотношение:

$$\begin{aligned} p_n(U_1, \dots, U_i, \dots, U_N; t_1, \dots, t_i, \dots, t_N) = \\ = p_n(U_1^\tau, \dots, U_i^\tau, \dots, U_N^\tau; t_1 + \tau, \dots, t_i + \tau, \dots, t_N + \tau), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_i^τ – случайная величина, отражающая значение процесса в момент времени $t = t_i + \tau$ (τ – произвольное число).

Очевидно, что из стационарности в узком смысле следует стационарность в широком смысле. Условие стационарности временного ряда необходимо для корректного применения методов спектрально-корреляционного анализа. Таким образом, для анализа нестационарного сигнала проводится его разбиение на стационарные сегменты с их последующим анализом [3 – 5]. Данное условие также является главным при исследовании сигналов энцефалограммы (ЭЭГ), для которых на основе практических исследований было введено такое понятие, как сегментная (кусочная) стационарность – интервал времени, на котором сигнал будет считаться стационарным [6, 7].

Одним из методов для оценки стационарности временных рядов является тест Дики-Фуллера (ADF). Эта методика, которая используется в прикладной статистике и эконометрике для анализа временных рядов, является одним из тестов на единичные корни (Unit root test). Временной ряд имеет единичный корень, или порядок интеграции один, если его первые разности образуют стационарный ряд.

Суть метода заключается в предположении вида процесса, породившего исследуемый временной ряд, для которого строится вспомогательная модель, и проверяются гипотезы о коэффициентах этой

модели. На этом основании делается вывод о стационарности или нестационарности исходного ряда [8].

Еще одним методом для определения стационарности временных рядов является тест Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина (KPSS), который в качестве нулевой берет гипотезу о стационарности временного ряда:

$$y_t = c_t + \delta t + u_{1t},$$

$$c_t = c_{t-1} + u_{2t},$$

где y_t – наблюдаемый временной ряд; c_t – стохастический тренд; δ – коэффициент тренда; t – время; u_{1t} – стационарный процесс; u_{2t} – независимый и равномерно распределенный процесс со средним значением равным нулю и дисперсией σ^2 . Нулевой гипотезой является то, что $\sigma^2 = 0$ и стохастический тренд (c_t) представляется случайным блужданием. Альтернативная гипотеза соответствует предположению о том, что эта дисперсия отлична от нуля, так что анализируемый ряд принадлежит классу нестационарных временных рядов [9].

Цель статьи – исследование ЭМГ сигнала на стационарность и определение интервала стационарности сигнала для его анализа как кусочно-стационарного с помощью разработанного программного средства.

Для достижения поставленной цели используются методы оценки стационарности временных рядов: тест Дики-Фуллера и тест Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина.

Анализ электромиографических (ЭМГ) сигналов на стационарность. Было исследовано 45 ЭМГ сигналов длительностью 51 – 70 с, полученных при исследовании длинного разгибателя туловища на уровне поясничного отдела позвоночника (L4-L5 позвонков). Из них 10 – контрольная группа, 11 – здоровые пациенты с болью, 10 – пациенты с вертебрологическим заболеванием, 14 – пациенты со сколиозом. Сигналы были получены в одинаковых условиях электромиографическим прибором "Нейро-МВП" в лаборатории патофизиологии Института патологии позвоночника и суставов им. М.И. Ситенко АМН Украины [10].

Результаты теста Дики-Фуллера (ADF) для всех сигналов полной длительности дали значение нулевой гипотезы – 1, что подтверждает их нестационарность. Результаты теста Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина (KPSS) также показали, что сигналы нестационарные. При сегментировании сигналов на фрагменты длительностью 60 мс 0% фрагментов сигналов являются стационарными по результатам теста

ADF и от 3% до 8% сегментов являются стационарными по результатам KPSS теста. При уменьшении длительности сегментов до 10 мс количество стационарных сегментов по результатам теста ADF увеличилось до 4 – 23%, по результатам KPSS теста практически не изменилось (4 – 7%). Результаты по всем исследованным длительностям сегментов сведены в таблицу.

Таблица

Результаты исследования стационарности сегментов ЭМГ

Длительность сегмента, мс	% стационарных сегментов по ADF	% стационарных сегментов по KPSS
60	0	3,3 – 8,4
30	0 – 0,2	3,6 – 7,2
20	0 – 5,2	4 – 7,3
10	3,9 – 22,7	4,2 – 6,9

Выводы. В результате исследования методами Дики-Фуллера и Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина был проведен анализ стационарности полной длительности сигналов ЭМГ. Исследуемые сигналы были разделены на определенные интервалы длительностью 10 – 69 мс, для которых также был проведен анализ стационарности. На основе полученных результатов было установлено, что с уменьшением длительности сегмента ЭМГ до значений 15 – 20 мс количество стационарных участков, определяемых методом ADF, по отношению к общему количеству резко увеличивается. На интервалах более 20 мс количество таких участков близко к нулю. При исследовании тестом KPSS было установлено, что значение отношения стационарных участков длительностью 10 – 69 мс к общему количеству составило 3,3 – 8,4% и не имеет тенденции к резкому изменению с уменьшением длительности интервалов. В дальнейшем планируется продолжить работу по анализу зависимости информативных параметров ЭМГ сигнала, полученных методами статистического, спектрального и корреляционного анализа, от длительности исходного сигнала и его фрагментов.

Список литературы: 1. Reaz M.B.I. Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications / M.B.I. Reaz, M.S. Hussain, F. Mohd-Yasin // Biological Procedures Online. – 2006. – Vol. 8. – P. 11-35. 2. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с. 3. Bilodeau M. Normality and stationarity of EMG signals of elbow flexor muscles during ramp and step isometric Contractions / M. Bilodeau, M. Cincera, B. Arsenault, D. Gravel // J. Electromyogr. Kinesiol. – 1997. – Vol. 7. – № 2. – P. 87-96. 4. Osipov A. Method of time-frequency analysis of compound electromyogram in estimation of neurogenic control efficiency in human skeletal muscles / A. Osipov, M. Mezhennaya, N. Davydova, I. Ilyasevich, M. Davydov, E. Soshnikova, V. Kulchitsky // Activitas Nervosa Superior Rediviva. – 2015. –

Vol. 57. – № 4. – P. 105-111. **5.** Istenic R. Analysis of Neuromuscular Disorders Using Statistical and Entropy Metrics on Surface EMG / R. Istenic, A. Prodromos, K. Constantinos, S. Pattichis, D. Zazula // *Wseas Transactions On Signal Processing*. – 2008. – Vol. 4. – P. 28-35. **6.** Каплан А.Я. Нестационарность ЭЭГ: методологический и экспериментальный анализ / А.Я. Каплан // *Успехи физиологических наук*. – М.: МАИК "Наука/Интерпериодика". – 1998. – Т. 29. – № 3. – С. 35-55. **7.** Fein G. EEG power spectra in normal and dyslexic children. I. Reliability during passive conditions / G. Fein, D. Galin, J. Jahnstone // *EEG and Clin. Neurophysiol.* – 1983. – Vol. 55. – P. 399-405. **8.** Магнус Я.Р. Эконометрика. Начальный курс / Я.Р. Магнус, П.К. Камышев, А.А. Пересецкий. – М.: Дело, 2007. – 504 с. **9.** Kwiatkowski D. Testing the Null Hypothesis of Stationarity against the Alternative of a Unit / D. Kwiatkowski, P.C.B. Phillips, P. Schmidt, Y. Shin Root. // *Journal of Econometrics*. – 1992. – Vol. 54. – P. 159-178. **10.** Жемчужкина Т.В. Статистический анализ спектральных характеристик ЭМГ-сигнала с целью дифференцирования поясничных болей / Т.В. Жемчужкина, Т.В. Носова, Я.В. Носова, А.В. Губанов, Д.Р. Дуплий, И.В. Котульский // *Бионика интеллекта*. – 2015. – № 2 (85). – С. 105-108.

References:

1. Reaz M.B I., Hussain M.S., and Mohd-Yasin F. (2006), "Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications". *Biological Procedures Online.*, Vol. 8, pp. 11-35.
2. Bendat, J. (1989), *Prykladnoy analiz slychaynykh dannykh [Applied analysis of random data: transl. from English]*. Mir Publ., Moscow, 540 p.
3. Bilodeau M., Cincera M., Arsenault B., and Gravel D. (1997), "Normality and stationarity of EMG signals of elbow flexor muscles during ramp and step isometric Contractions". *J. Electromyogr. Kinesiol.*, Vol. 7, No. 2, pp. 87-96.
4. Osipov A., Mezhenyaya M., Davydova N., Ilyasevich I., Davydov M., Soshnikova E., and Kulchitsky V. (2015), "Method of time-frequency analysis of compound electromyogram in estimation of neurogenic control efficiency in human skeletal muscles". *Activitas Nervosa Superior Rediviva.*, Vol. 57, No. 4, pp. 105-111.
5. Istenic R., Prodromos A., Constantinos K., Pattichis S., and Zazula D. (2008), "Analysis of Neuromuscular Disorders Using Statistical and Entropy Metrics on Surface EMG". *Wseas Transactions On Signal Processing*, Vol. 4, pp. 28-35.
6. Kaplan A.Y. (1998), Nestatsyonarnost EEG: metodologicheskyy I experementalnyy analiz [Non-stationarity of the EEG: methodological and experimental analysis], *Progress in Physiology.*, Vol. 29, No. 3, pp. 35-55.
7. Fein G., Galin D., and Jahnstone. J. (1983), EEG power spectra in normal and dyslexic children. I. Reliability during passive conditions. *EEG and Clin. Neurophysiol.*, Vol. 55, pp. 399-405.
8. Magnus Y. R., Kartyshev P. K., and Pereseckiy A. A. (2007), *Ekonometrika. Nachalnyy kurs [Econometrics. The initial course]*, Delo Publ., Moscow, 504 p.
9. Kwiatkowski D., Phillips P.C.B., Schmidt P., and Shin, Y. (1992), "Testing the Null Hypothesis of Stationarity against the Alternative of a Unit Root". *Journal of Econometrics.*, Vol. 54, pp. 159-178.
10. Zhemchuzhina T.V., Nosova T.V., Nosova Y.V., Gubanov A.V., Dupliy D.R., and Kotulskiy I.V. (2015), "Statisticheskyy analiz spektralnykh kharakteristik ENG-sygnala s tsel'yu differentsirovaniya poyasnychnykh boley" [Statistical analysis of the spectral characteristics of the EMG signal for the purpose of differentiating lumbar pain], *Bionics of the intellect.*, Vol. 85, No. 2, pp. 105-108.

Поступила (received) 31.03.2017

Статтю представил д-р техн. наук, проф. ХНУРЕ Аврунин О.Г.

Yurii Shpakovych, postgraduate student
Kharkiv National University of Radioelectronics
Av. Nauky, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 702-13-06), e-mail: yurii.shpakovych@nure.ua
ORCID ID: 0000-0003-0207-3329

Tatyana Zhemchuzhkina, PhD Tech, Associate Professor.
Kharkiv National University of Radioelectronics
Av. Nauky, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 702-13-06), e-mail: tatyana.zhemchuzhkina@nure.ua
ORCID ID: 0000-0001-8884-5099

Tatyana Nosova, PhD Tech, Associate Professor.
Kharkiv National University of Radioelectronics
Av. Nauky, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 702-13-06), e-mail: tatyana.nosova@nure.ua
ORCID ID: 0000-0003-4442-8001

УДК 615.47

Щодо застосовності методів аналізу електроміографічних сигналів / Шпакович Ю.С., Жемчужкіна Т.В., Носова Т.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 117 – 123.

В цій роботі за допомогою тестів на поодинокі корені Дікі-Фуллера та Квятківського-Філіпса-Шмідта-Шина на стаціонарність було проаналізовано електроміографічні сигнали для коректного вибору статистичних, кореляційних і спектральних методів дослідження. Також було визначено інтервал часу, на якому сигнал можна вважати кусково-стаціонарним. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: електроміографічні сигнали; стаціонарність; часовий інтервал, тести на одиничні коріння

УДК 615.47

К вопросу о применимости методов анализа электромиографических сигналов / Шпакович Ю.С., Жемчужкина Т.В., Носова Т.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 117 – 123.

В данной работе с помощью тестов на единичные корни Дики-Фуллера и Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина на стационарность проанализированы электромиографические сигналы для правильного выбора статистических, корреляционных и спектральных методов исследования. Также был определен временной интервал, в течение которого сигналы можно рассматривать как кусочно-стационарные. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: электромиографические сигналы; стационарность; временной интервал, тесты на единичные корни.

UDC 615.47

To the problem of application of methods of electromyographic signal analysis / Shpakovych Y.S., Zhemchuzhkina T.V., Nosova T.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 117 – 123.

In this work EMG signal was analyzed with Unit Root Dickey-Fuller (ADF) and Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin (KPSS) tests for stationarity for the correct choice of statistical, correlation and spectral research methods. Also it was determined the time interval at which the signal can be viewed as piecewise stationary. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: electromyographic signals; stationarity; time interval, unit root tests.

***Новые информационные технологии в
медицине и биологии***

И.В. МУКАНОВСКАЯ, студ., Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
О.М. ДАЦОК, канд. техн. наук, доц., Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
О.Н. ВЕЛИЧКО, канд. техн. наук, доц., Харьковский национальный университет радиоэлектроники

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СИГНАЛА В ИСКУССТВЕННОМ ГОЛОСОВОМ АППАРАТЕ

В работе получила дальнейшее развитие модель искусственного голосового аппарата, который базируется на применении электромиографического сигнала поверхностных мышц шеи. Предлагается алгоритм анализа электромиографического сигнала поверхностных мышц шеи для определения моментов переходных сегментов речи. В работе проанализированы математические модели, которые наиболее точно описывают электромиографический и речевой сигналы. Представлены результаты работы предложенного алгоритма. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: искусственный голосовой аппарат; сигнал электромиографический; речевой сигнал; переходные сегменты речи.

Постановка проблемы и анализ последних исследований. По данным ВОЗ, ежегодно рак гортани диагностируется у 1,3 млн. человек в мире. В большинстве случаев его определяют на последних стадиях, при которых прибегают к операции по удалению гортани (ларингэктомии). Существуют различные способы реабилитации больных после операции, такие как обучение пищеводному голосу, голосовое протезирование и применение искусственных голосовых аппаратов. На сегодняшний день основным методом восстановления речи у пациентов после удаления гортани является применение искусственных голосовых аппаратов, так как данный метод не нуждается в проведении дополнительных операционных вмешательств и, в то же время, является достаточно эффективным [1]. Однако, современные искусственные голосовые аппараты имеют ряд недостатков, таких как низкое качество воспроизведения речи из-за наличия в их составе аппаратов вибраторов, которые заглушают речь, и низкая помехоустойчивость, так как динамики улавливают посторонние шумы, что требует постоянного включения/выключения аппарата в моменты речи. Таким образом, существует необходимость разработки новых методов реконструкции голосовой функции, которые не будут включать элементы, являющиеся источниками помех и шумов.

В развитых странах проводится активная работа по разработке новых методов восстановления речевой функции у данной категории

пациентов [2]. В работе получила дальнейшее развитие модель искусственного голосового аппарата, который базируется на использовании электромиографического сигнала (ЭМГ), зарегистрированного с поверхностных мышц шеи пациента [3]. Мышечные волокна активизируются нервной системой, а наложенные электроды на поверхность кожи детектируют сокращения мышц. Полученный ЭМГ-сигнал в дальнейшем анализируется. Наибольший интерес представляет собой выделение переходных моментов (моментов активации) речи и их последующий анализ, что в значительной степени может повысить качество воспроизведения речи в составе искусственного голосового аппарата.

Рассмотрим существующие голосовые аппараты. Голосообразующий аппарат – это прибор, восполняющий утраченные функции голоса вследствие операций по удалению гортани или другим причинам. На сегодняшний день существует большое разнообразие аппаратов, предлагаемых на рынке для таких пациентов.

Голосообразующий аппарат располагается в области шеи, а сигнал возбуждения передается через ее ткани, которые формируют звуковую волну в полости рта. Изменение объема и формы ротовой полости обуславливает формантную структуру сигнала возбуждения [4]. Иными словами, аппарат создает колебания мембраны, которые через шейно-подбородочную область ларингоэктомизированного пациента передаются в полость рта и речевой артикуляцией преобразуется в звуки речи [5].

Данные аппараты имеют два основных недостатка: монотонность и неразборчивость воспроизводимой речи, что связано с постоянной основной частотой возбуждения сигнала [6], кроме этого, пользователь должен все время держать аппарат в руке, прислонив к шее, а также постоянно включать и выключать устройство.

Целью статьи является обоснование возможности формирования речевого сигнала в портативном искусственном голосовом аппарате на основе ЭМГ-сигнала, зарегистрированного с поверхностных мышц шеи пациента.

Для достижения цели необходимо проанализировать математические модели ЭМГ и речевого сигналов, синтезировать функциональную схему портативного искусственного голосового аппарата, сформулировать основные медицинские и технические требования к такому аппарату; предложить способ предварительной обработки сигнала.

Математическая модель сигнала. Выше упоминалось, что главным недостатком обычных систем восстановления голоса является необходимость постоянного контроля со стороны пользователем. Для его

устранения в структуре некоторых из них используется блок анализа ЭМГ с целью определения речевой деятельности.

Электромиография является наиболее распространенным неинвазивным методом, который применяется в медицинской диагностике для измерения потенциалов действия и их суперпозиции. Математическая модель, которая описывает необработанный ЭМГ-сигнал, представлена уравнением (1)

$$x(k) = \sum_{r=0}^{N-1} h(r)e(k-r) + w(k), \quad (1)$$

где $x(k)$ – ЭМГ в момент времени k ; N – число двигающих единиц; $h(r)$ – импульсный отклик; $e(k)$ – импульсы функций Дирака из отдельных подвижных единиц; r – время задержки каждого импульса; $w(k)$ – нулевой средний аддитивный гауссовский шум.

Математическая модель (1) демонстрирует отклик системы и не описывает характеристики тканей [7].

Речевой сигнал является случайным нестационарным процессом, стохастическое описание которого в данный момент неизвестно. Для построения математической модели речевого сигнала в виде некой зависимости от времени был применен подход, основанный на выделении информационной и несущих компонент (теория модуляции). При аппроксимации спектральной плотности речевого сигнала набором постоянных составляющих получим соотношение (2).

$$S(w) = \begin{cases} S_0, f \in \left[0; f_0^{\text{нес}} + \frac{\Pi_0}{2} \right]; \\ S_1, f \in \left[f_1^{\text{нес}} - \frac{\Pi_1}{2}; f_1^{\text{нес}} + \frac{\Pi_1}{2} \right]; \\ \dots \\ S_L, f \in \left[f_L^{\text{нес}} - \frac{\Pi_L}{2}; f_L^{\text{нес}} + \frac{\Pi_L}{2} \right]. \end{cases} \quad (2)$$

где $S(w)$ – спектральная плотность; S_l – постоянные составляющие, $l = 0, \dots, L$; Π_l – ширина полосы частот; $f_l^{\text{нес}}$ – несущие частоты, f – частота; f_l ($l = 0, 1, \dots, L$) – частоты.

Математическая модель речевого сигнала в виде детерминированной функции получена с использованием обратного преобразования Фурье от спектральной плотности.

$$U(t) = \sum_{l=0}^L U_l \sin c(2\pi F_l t) \cos(2\pi f_l^{\text{нес}} t), \quad (3)$$

где $f_l^{\text{нес}}$ – несущие частоты; $U_l = S_l \Pi_l = 2S_l F_l$; $\sin c(x) = \sin(x) / x$.

Из соотношения (3) следует, что математическая модель речевого сигнала является амплитудно-модулированным колебанием $U(t) = U_{\text{мод}}(t) \times U_{\text{нес}}(t)$, в котором возможно выделить $U_{\text{мод}}(t) = \sin c(2\pi F_l t)$ – модулирующее колебание и

$U_{\text{нес}}(t) = \sum_{l=0}^L U_l \cos(2\pi f_l^{\text{нес}} t)$ – несущее колебание.

Точное определение дискретных событий в ЭМГ-сигнале является важным вопросом в анализе двигательной системы. Несколько методов были предложены для определения моментов начала и конца активации мышц [8]. Наиболее распространенным является метод решения мотор-смотрового события из ЭМГ-сигналов с помощью визуального осмотра обученных наблюдателей. Пороговый метод, в котором сравнивают амплитуду ЭМГ с фиксированным порогом – это наиболее интуитивно понятный и распространенный компьютерный метод определения времени начала мышечной активности сокращения. Он базируется на сравнении необработанных сигналов и порогов, амплитуда которых зависит от значения средней мощности шума фона.

Таким образом, была предложена математическая модель, которая дает возможность описать необработанный ЭМГ-сигнал с помощью функции Дирака. Также была предложена математическая модель речевого сигнала, представленная в виде детерминированной функции с использованием обратного преобразования Фурье от спектральной плотности. В ходе анализа показано, что математическая модель речевого сигнала является амплитудно-модулированным колебанием.

Структурная схема портативного искусственного голосового аппарата. Предлагаемый искусственный голосовой аппарат базируется на использовании ЭМГ-сигнала, именно поэтому в структурную схему аппарата необходимо включить датчики, которые будут регистрировать мышечную активность пациента в области шеи. Зарегистрированный низкоамплитудный ЭМГ-сигнал поступает на вход инструментального усилителя [9].

В схему необходимо включить еще один блок, который будет увеличивать коэффициент ослабления синфазного сигнала, тем самым уменьшая помеху на входе системы. Затем сигнал поступает в блок обработки, где усиливается, фильтруется и разбивается на

положительные и отрицательные полуволны. Далее он подвергается однополупериодному выпрямлению и передается на два аналоговых входа микроконтроллера. Применение данного метода позволит добиться наиболее высокой разрешающей способности оцифрованного сигнала.

После аналогово-цифрового преобразования, значение отрицательной составляющей сигнала вычитается из положительной цифровым способом. В результате аналогово-цифрового преобразования ЭМГ-сигнал имеет теоретическое значение разрешающей способности 13 бит.

Учитывая все особенности обработки сигнала в искусственном голосовом аппарате, была предложена структурная схема искусственного голосового аппарата (рис. 1). В данной схеме от электродов, которые накладываются на шею пациента (1), поступает сигнал на вход инструментального усилителя (4). Схема подает сигнал обратно к телу пациента на электрически пассивную точку, для повышения коэффициента ослабления синфазной помехи. Этот метод применяется для регистрации любых электрографических сигналов.

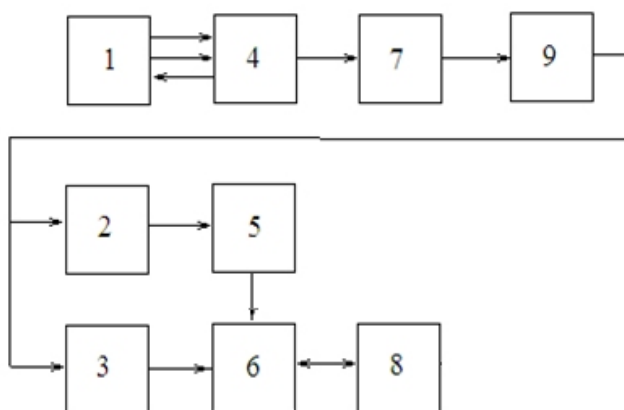


Рис. 1. Структурная схема искусственного голосового аппарата

Фильтр нижних частот (7) выделяет сигнал с частотой $f < 1$ кГц. Выбор данной частоты обусловлен тем, что информативность ЭМГ-сигнала лежит в пределах до 1 кГц, а остальные составляющие, как правило, представляют собой шумы. Блок (9) усиливает поступающий на его входы сигнал. Коэффициент усиления возможно регулировать вручную с помощью резистора с переменным сопротивлением. Далее сигнал разбивается на составляющие: положительные и отрицательные (блоки 3 и 2). Отрицательные составляющие пропускаются через инвертор (5) и становятся положительными. Эти сигналы поступают на аналоговые входы микроконтроллера (6), после чего передаются на модуль формирования акустического сигнала (8). Применяя данный

метод, возможно добиться более высокой разрешающей способности (в битах) оцифрованного сигнала.

Обработку аналогового сигнала предложено реализовать с помощью микросхемы ADSP-2183, фирмы Analog Devices. Это однокристалльный микрокомпьютер, оптимизированный для цифровой обработки сигнала (DSP), который имеет малые энергозатраты и габариты, низкое напряжение питания 3,3 В, что позволяет использовать его в составе портативных искусственных голосовых аппаратов.

Уровень амплитуды ЭМГ-сигнала, который регистрируется во время активации грудинно-ключично-сосцевидной мышцы (наибольшей в области шеи) лежит в диапазоне от 0 до 90 мкВ. Таким образом, это значение является максимально возможным для регистрируемых ЭМГ-сигналов в области шеи. Коэффициент усиления, который обеспечивает электронная схема аппарата, находится в диапазоне 700 – 800 единиц, а максимально возможное напряжение на выходе схемы составляет 10 мВ. Выбор входной частоты обуславливается частотой, на которой речевой сигнал является наиболее информативным.

Таким образом, предложенная структурная схема портативного искусственного голосового аппарата обеспечивает эффективную регистрацию ЭМГ-сигнала поверхностных мышц шеи пациента для последующей обработки и формирования речевого сигнала.

Особенности построения программного обеспечения аппарата.

На рис. 2 представлено демонстрационное окно программы, в котором реализованы функции для выбора отдельного участка сигнала и его анализа, подавления шума, определение моментов активации и сохранение обработанного сигнала [10].

В предложенной программе включены три возможные разновидности голоса для воспроизведения речи: "Мужской", "Женский" и "Детский", что учитывает гендерные различия людей и упрощает применение искусственных голосовых аппаратов в обществе. После выбора разновидности голоса программа автоматически подключает соответствующую библиотеку. Необходимо заранее создать библиотеки, которые в дальнейшем будут применяться в программе. Также возможно создание нескольких библиотек для каждой разновидности голоса, что позволит пациенту выбрать тембр голоса, который ему наиболее импонирует.

Предложенное программное обеспечение ориентировано на реализацию в стационарном исполнении (тестовый вариант).

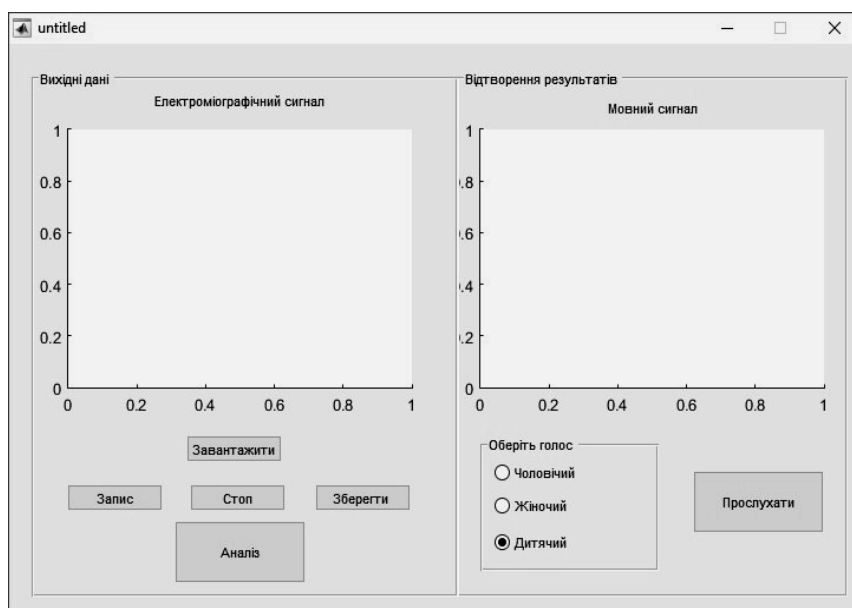


Рис. 2. Главное окно программы

В процессе разработки портативного варианта требуются исследования вопросы, связанные с устранением помех, вызванных естественной мышечной активностью при ходьбе, движениях головы и пр., что накладывает дополнительные требования к системе фильтрации ЭМГ-сигнала [11].

Выводы. Проведен анализ принципов построения современных аппаратов для реконструкции голоса. Показана актуальность разработки голосовых аппаратов, базирующихся на современных методах снятия и обработки сигналов для эффективного воспроизведения речи пациента.

Обоснован способ восстановления речевой функции пациента на основе ЭМГ-сигнала, зарегистрированного с поверхностных мышц шеи пациента с последующей обработкой и определением времени начала мышечной активности.

Сформированы медицинские и технические требования для портативного искусственного голосового аппарата и определены значения основных технических параметров. Предложен принцип построения структурной схемы искусственного голосового аппарата.

Полученные данные являются важной частью исследований по дальнейшему совершенствованию алгоритмов обработки ЭМГ-сигнала голосовых мышц, а их применение обеспечит улучшение существующих и разработку новых портативных искусственных голосовых аппаратов.

Список литературы: 1. Бехин П. Анатомия человека. Системы и органы / П. Бехин. – М.: Харвест, 2007. – 38 с. 2. Andreassi J.L. Psychophysiology: Human Behavior and Physiological Response / J.L. Andreassi. – New York: Psychology Press, 2000. – 565 p. 3. Физиология человека / Под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротко. – 2-е изд. – М.: Медицина, 2003. – 565 с. 4. Конова Т.А. Онкология и терминальная помощь / Т.А. Конова, А.Д. Морозова. – М.: Феникс, 2006. – 320 с. 5. Патент № 2056811 РФ. Голосообразующий аппарат А.Г. Маточкин / Маточкин А.Г. – № 94045830/14, заяв. 22.12.94, опуб. 27.03.96 – 4 с. 6. Пузин С.Н. Обеспечение инвалидов голосообразующими аппаратами. [Электронный ресурс] // http://www.invalidnost.com/publ/sotrudnikam_sluzhby_mseh/obespechenie_invalidov_golosoobrazujushhimi_apparatami/3-1-0-45, 2007. 7. Basmajian J.V. Influence of Gender on the Activity of Agonist-Antagonist Muscles during Maximum Knee and Ankle Contractions / J.V. Basmajian, C.J. De Luca. // Journal of Biomedical Engineering and Technology. – 2016. – № 1. – P. 1-6. 8. Department of Otolaryngology. Electrolaryngeal Speech / Eastern Virginia Medical School. Retrieved 14 March 2013. – 93 p. 9. Yakity Yak. Communication after laryngectomy / South East Coast Laryngectomy Support Groups (UK). March 9, 2011. Retrieved March 14, 2013. – P. 57-65. 10. Мукановская И.В. К вопросу моделирования речевого тракта человека. Материалы интернациональной конференции "Тараповские чтения" / И.В. Мукановская, О.М. Дацок. – Харьков: – 2016 – С. 57. 11. Дацок О.М. Особенности обработки речевого сигнала в искусственных голосовых аппаратах. Тезисы докладов XXIV международной научно-технической конференции MicroCAD / О.М. Дацок, И.В. Мукановская. – Харьков: НТУ "ХПИ" – 2016 – Т. 3. – С. 29.

References:

1. Behin, P. (2007), *Human Anatomy. Systems and organs*, Kharvest, Moscow, 38 p.
2. Andreassi, J.L. (2000), *Psychophysiology: Human Behavior and Physiological Response*, Psychology Press, New York, 565 p.
3. Pokrovskiy, V.M., and Korotko, G.F. (2003), *Human Physiology*, Medicine, Moscow, 565 p.
4. Konova, T.A., and Morozov, A.D. (2006), *Oncology and terminal care*, Feniks, Moscow, 320 p.
5. Matochkin, A.G. (1994), *Voice Apparatus*, Patent RF, №2056811, 4 p.
6. Puzin, S.N. (2007), *The provision of voice services*. [Electronic resource]/http://www.invalidnost.com/publ/sotrudnikam_sluzhby_mseh/obespechenie_invalidov_golosoobrazujushhimi_apparatami/3-1-0-45.
7. Basmajian, J.V., and De Luca, C.J. (2016), "Influence of Gender on the Activity of Agonist-Antagonist Muscles during Maximum Knee and Ankle Contractions", *Journal of Biomedical Engineering and Technology*, No. 1, pp. 1-6.
8. Department of Otolaryngology (2013), *Electrolaryngeal Speech*, Eastern Virginia Medical School, Retrieved 14, March 2013, 93 p.
9. Yakity Yak (2011), "Communication after laryngectomy", *South East Coast Laryngectomy Support Groups (UK)*, 11 p.
10. Mukanovska I.V., and Datsok O.M. (2016), "Modeling of the vocal tract of the person", *Materials of the international conference "Tarapovskii read"*, Kharkov, 57 p.
11. Datsok O.M, and Mukanovska I.V. (2016), "Features of speech signal processing in an artificial voice apparatus". *Abstracts XXIV international scientific conference MicroCAD*, NTU "KhPI", Kharkov, p. 29.

Статью представил д-р техн. наук, проф. ХНУРЭ Аврунин О.Г.

Поступила (received) 31.03.2017

Velychko Olga, PhD Tech., Associate Professor.
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauka Ave, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 70-21-364, e-mail: olga.velycho@nure.ua
ORCID ID:0000-0001-9202-8411

Datsok Oleh, PhD Tech., Associate Professor.
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauka Ave, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 70-21-364, e-mail: oleh.datsok@nure.ua
ORCID ID: 0000-0003-4489-3819

Mukanovska Iryna, master student.
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauka Ave, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (057) 70-21-364, e-mail: iryna.mukanovska@nure.ua
ORCID ID: 0000-0002-2719-9414

УДК 616-71+004.93

Спосіб одержання сигналу у штучному голосовому апараті / Мукановська І.В., Дацок О.М., Величко О.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 125 – 134.

У роботі отримала подальший розвиток модель штучного голосового апарату, який базується на використанні електроміографічного сигналу поверхневих м'язів ший. Пропонується алгоритм аналізу електроміографічного сигналу поверхневих м'язів ший для визначення моментів перехідних сегментів мови. В роботі проаналізовані математичні моделі, що найбільш точно описують електроміографічний та речовий сигнали. Представлені результати роботи запропонованого алгоритму. Іл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: апарат штучний голосовий; сигнал електроміографічний; сегменти перехідні; активації моменти.

УДК 616-71+004.93

Способ получения сигнала в искусственном голосовом аппарате / Мукановская И.В., Дацок О.М., Величко О.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 125 – 134.

В работе получила дальнейшее развитие модель искусственного голосового аппарата, который базируется на применении электромиографического сигнала поверхностных мышц шеи. Предлагается алгоритм анализа электромиографического сигнала поверхностных мышц шеи для определения моментов переходных сегментов речи. В работе проанализированы математические модели, которые наиболее точно описывают электромиографический и речевой сигналы. Представлены результаты работы предложенного алгоритма. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: искусственный голосовой аппарат; сигнал электромиографический; речевой сигнал; переходные сегменты речи.

UDC 616-71+004.93

The method of signal receiving in the artificial voice device / I.V. Mukanovska, O.M. Datsok, O.N. Velychko // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 125 – 134.

The further development of the model of artificial voice apparat, which based on analysis electromyographic signal from neck was made in the article. The algorithm of analysis electromyographic signal of the superficial neck muscles for detections of transitional speech segment had been proposed. The mathematical models, which are the most accurately describe the electromyographic and voice signals were analyzed. Results of proposed algorithm were shown. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: artificial voice apparat; electromyographic signal; transitional speech segment.

К.С. НАВРОЦЬКА, асп., ВНТУ, Вінниця,
Д.Х. ШТОФЕЛЬ, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця,
С.В. КОСТИШИН, канд. техн. наук, ст. викл., ВНТУ, Вінниця,
В.І. МАКОГОН, асис., ВНТУ, Вінниця

АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ ТЕСТУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ КОГНІТИВНИХ ФУНКЦІЙ ЛЮДИНИ

В статті розглянутий процес організації багаторівневого адаптивного тестування для діагностики стану когнітивної сфери респондента в задачах професійного відбору. Розвинутий підхід, який дозволяє організувати ефективне тестування з мінімізацією кількості завдань. Розроблена модель системи адаптивного тестування. Наведено приклад траєкторії тестування для чотирьохрівневого оцінювання когнітивної сфери людини та розроблено узагальнений алгоритм роботи системи адаптивного тестування. Л.: 3. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: алгоритм; тестування; багаторівневе адаптивне тестування; когнітивна сфера; професійний відбір; модель; траєкторія тестування.

Постановка проблеми. У сучасну освіту у спортивний тренувальний процес та професійний відбір широко впроваджуються інформаційні технології, що дають змогу реалізації інноваційних оцінювальних методик [1]. Недолік класичних тестових методик – велика кількість завдань, адже зі збільшенням їх числа знижується ефективність процедури тестування через вплив втоми і нудного характеру багатьох запитань. Надмірне зменшення кількості завдань призводить до зниження діагностичної цінності методики [2].

Найбільш ефективними на сьогодні є методи адаптивного тестування, які передбачають зміну послідовності та кількості завдань залежно від поточних оцінок респондента [2]. Це дозволяє підвищити якість і скоротити час тестування.

Задачі сучасного професійного відбору на відповідальні посади або на роботу, що передбачає підвищене психоемоційне навантаження вимагають контролю когнітивних характеристик респондентів, які визначають можливості людини швидко обробляти інформацію, яка надходить, аналізувати обстановку і за короткий час приймати та реалізовувати правильні рішення.

Система для вирішення таких задач орієнтована на отримання корисного результату у вигляді когнітивного портрету людини. Враховуючи специфіку дослідження когнітивних функцій, система повинна бути адаптивною, тобто передбачати можливість зміни траєкторії тестувального процесу. Ще одним завданням системи є досягнення поставленої мети за мінімальний проміжок часу. При цьому

необхідно дослідити чотири незалежні елементи когнітивної сфери: увагу, пам'ять, сприйняття, психомоторну реакцію [3]. Кожний елемент характеризується власним набором специфічних характеристик, які одержуються в результаті роботи специфічних тестових методик.

Аналіз літератури. У [2] описані принципи організації комп'ютерного адаптивного тестування (КАТ). Історія використання КАТ в психометричних дослідженнях описана в [4], там же визначено широку сферу застосування КАТ для різних задач, в тому числі відбору та розподілу людей за певними вимогами, діагностування їх властивостей, знань та умінь. Визначено можливість багатовимірного КАТ, тобто одночасного оцінювання багатьох функцій. Когнітивне діагностичне КАТ будують на моделях латентних класів [4]. Сучасні тенденції в розвитку КАТ розглянуті в [5], де підтверджено важливість його застосування у фаховій діяльності та відзначено можливість проведення адаптивного комплексу тестів. У навчальному тестуванні перспективним є розвиток зворотного зв'язку до респондента із використанням бази даних неадаптивних опитувань студентів [6] та визначення латентних знань на початку навчального курсу [7]. Значного поширення набули ймовірнісні моделі для вибору наступного запитання [8]. Відомі моделі тестування великого набору навичок на основі оцінювання компонентів знань (з використанням теорії простору навчання) [9]. Багатотактовий алгоритм групового тестування студентів з елементами самонавчання запропонований у [10]. В [1] описана поетапна обробка результатів, а в [11] – збірне багатостадійне адаптивне тестування "на льоту" – підхід, що поєднує переваги КАТ і багатоетапного тестування. Саме такий підхід до тестування найбільше відповідає задачам нашої роботи. Бачимо, що переважна більшість відомих моделей та систем КАТ орієнтовані на оцінку знань в навчальному процесі, а робіт, присвячених КАТ у професійному відборі, обмаль. Існує велика кількість адаптивних моделей для зміни траєкторії в межах одного тесту, однак залишається відкритим питання переходу між тестовими методиками [5].

Відомо, що легкі та середні когнітивні порушення можуть перешкоджати людині виконувати певні професійні функції, відчутно не впливаючи на її повсякденне життя [12]. Тому виявлення і діагностика таких порушень (або невідповідностей встановленим вимогам) при профвідборі – це важлива науково-практична задача.

Мета статті – розробити адаптивну модель системи для професійного відбору на основі індивідуального підходу до тестування респондентів і виявлення професійно важливих характеристик, які формують діагностичний профіль когнітивної сфери респондента.

Розроблення моделі процесу тестування. Вхідними даними для процесу підготовки і проведення тестування є загальний блок тестів та методик BTM і правило формування траєкторії тестування. Блок тестів та методик містить множину питань для дослідження кожної з когнітивних функцій. Підготовка тестування полягає у виборі оператором тесту або методики TM із множини BTM . В результаті на монітор респондента виводиться відповідний тест.

Кожний тест або методика (TM_i) є ітеративними: на кожній ітерації здійснюється вибір і відображення наступного питання (завдання), перевірка отриманої відповіді та формування висновку після завершення дослідження.

Кожна тестова методика описується сукупністю даних і може бути представлена у вигляді

$$TM_i = M [Id(TM_{BTM_i}), ANSW_i, OPB_i], \quad (1)$$

де M – функція підрахунку результатів; $Id(TM_{BTM_i})$ – ідентифікатор питання, що використовується в певному тесті; $ANSW_i$ – відповідь на питання; OPB_i – оцінка відповіді.

Сукупність інформації про сеанс проходження конкретного тесту складає спробу проходження тесту SPT . Така спроба має вигляд

$$SPT = [Id(R), Id(TM_i), BD_{\text{поч}}, TR_i], \quad (2)$$

де $Id(R)$ – ідентифікатор особи респондента; $Id(TM_i)$ – ідентифікатор тесту в блоці тестів і методик; $BD_{\text{поч}}$ – дані до початку тестування; TR_i – траєкторія проходження тесту.

Встановимо чотири основні властивості системи дослідження когнітивних функцій людини в загальному вигляді.

1. Система володіє набором сенсорних даних, що надходять від тестових методик блоків дослідження окремих когнітивних функцій, включених до складу системи: $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, при чому кожен із них є бальною оцінкою параметра, що характеризує стан когнітивної функції. Бальна оцінка визначається шляхом проходження тестової методики та обробки відповідей респондента на поставлені завдання.

2. Система має набір доступних дій, які можуть бути такими: перехід до нового тесту W_1 , повторне проходження тесту W_2 , перехід на новий рівень тестування W_3 , завершення тестування W_4 , множину яких можна представити як $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4\}$.

3. Система володіє визначеним набором логічних правил $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, завдяки яким формується рішення щодо подальшої траєкторії дослідження. Такі логічні правила (закони функціонування системи) опираються на результати тестів та залежать від оцінок, які респондент отримав на попередніх етапах тестування.

4. Система будує профіль когнітивної сфери досліджуваної людини, який має вигляд $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, де P_i – компоненти профілю, підпрофілі кожної когнітивної функції. Такий профіль є кінцевою метою роботи системи, він визначає оцінку стану розвитку психофізіологічної когнітивної сфери особистості респондента.

Враховуючи адаптивність системи (можливість зміни траєкторії проходження тестів), її роботу можна зобразити таким чином:

$$\langle T_1, A, W \rangle \rightarrow \langle T_2, A, W \rangle \rightarrow \dots \rightarrow \langle T_n, A, W \rangle \rightarrow P. \quad (3)$$

Розроблення алгоритму тестування. Тестування розпочинається після ідентифікації респондента. Отримавши інформацію щодо результату проходження тестової методики дослідження когнітивної функції, система порівнює ці дані з набором логічних правил і приймає рішення щодо адаптивної зміни траєкторії тестування. Оскільки досліджуються 4 когнітивні функції, то така конструкція складається з чотирьох рівнів, тобто блоків тестових методик.

Траєкторія проходження тесту TR складається з її елементів TR_i , які містять дані про результати попереднього тесту респондента та історію зміни даних. TR_1 задається системою, а наступні елементи траєкторії формуються після проходження i -го тесту:

$$TR_{i+1} = [TR_i, TM_i], \quad (4)$$

де TM_i – результат попереднього тесту.

На рис. 1 представлена чотирьохрівнева схема тестування.

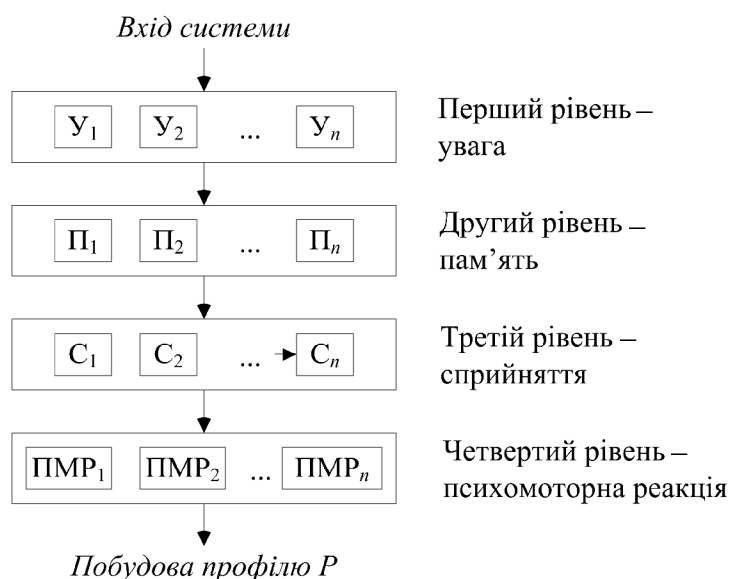


Рис. 1. Схема тестування для діагностики стану когнітивних функцій людини

Перший рівень містить тести на оцінку уваги (Y_n), другий рівень об'єднує тести для дослідження пам'яті (P_n), третій рівень – тести для діагностики процесів сприйняття інформації (C_n), четвертий рівень – дослідження психомоторної реакції ($ПМР_n$), який включає методики простої та складної сенсо-моторної реакції та їх модифікації. Для перевірки результатів тестів використовується метод рівневої адаптації.

Приклад адаптивної траєкторії тестування при дослідженні когнітивних функцій людини наведена на рис. 2. У прикладі розглянуто систему, що містить два тести для оцінювання уваги (Y_i), три тести для оцінювання пам'яті (P_i), два тести для оцінювання сприйняття (C_i) та одну методику для визначення ПМР. Кожна методика має свій діапазон можливих бальних оцінок, і для кожної з них попередньо встановлено порогове значення оцінки, що визначає позитивний результат тесту. Першою оцінюють увагу на основі методики "Таблиці Шульте" (Y_1 на рис. 2). Порогове значення $Y_1 = 1$. У випадку успішного проходження цієї методики (оцінка $Y_1 \leq 1$) відбувається перехід на другий рівень – дослідження пам'яті. У випадку незадовільних результатів ($Y_1 > 1$) передбачено проходження додаткового (більш ґрунтового) тесту "Коректурна проба" (Y_2) для уточнення діагностики і підтвердження або спростування результату попереднього тесту, після чого відбувається перехід до наступного рівня і т. д.

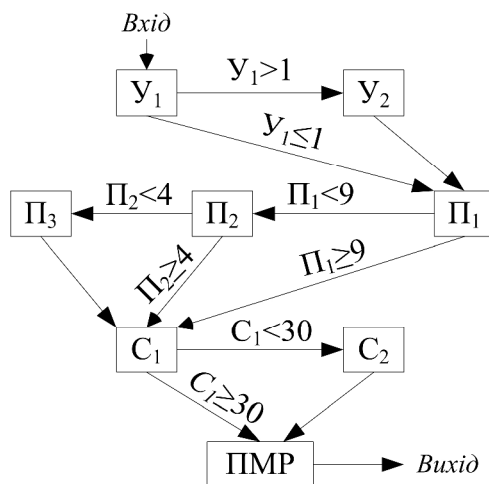


Рис. 2. Приклад схеми адаптивної траєкторії тестування

Узагальнений алгоритм тестування для дослідження когнітивних функцій людини зображений на рис. 3. Сигналом для запуску алгоритму є ініціалізація спроби проходження тестування, що містить ідентифікатор респондента $Id(R)$. Етап "Вибір тесту" передбачає вибір оператором першого тесту та його запуск (за замовчуванням встановлений тест Y_1).

Процедура тестування за кожним тестом має такий вигляд: після підтвердження вибору певного тесту на моніторі відображаються правила проходження тесту, а після підтвердження ознайомлення з ними з'являються запитання або завдання тесту; відповіді респондента і час, затрачений на роздуми, фіксуються. В підсумку в кінці кожного тесту формується результат та оновлюється запис в базі даних. Якщо результати задовільні, то відбувається перехід на наступний рівень. Після завершення дослідження на екран виводиться результат.

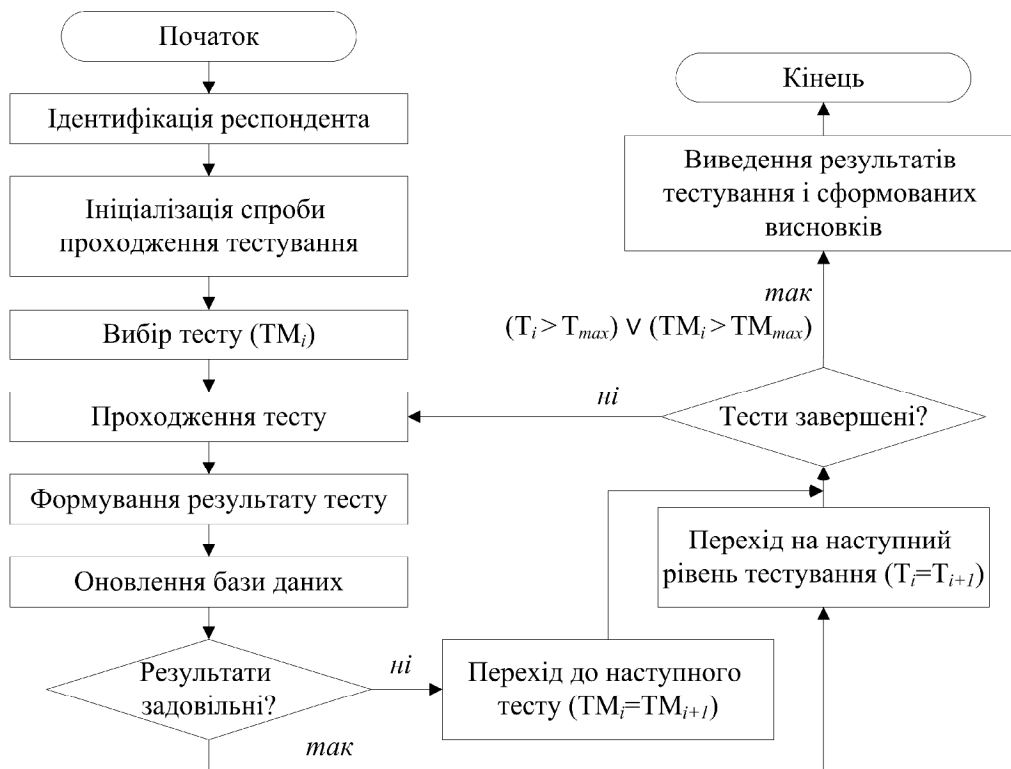


Рис. 3. Узагальнений алгоритм проведення багаторівневого адаптивного тестування

Таким чином, наукова новина роботи полягає у подальшому розвитку методів і засобів психофізіологічного тестування з метою професійного відбору респондентів шляхом вдосконалення моделі та алгоритму проведення тестування за рахунок введення адаптивної технології, що забезпечує гнучкість та оптимізацію процесу дослідження індивідуальних функціональних когнітивних можливостей респондентів.

Висновки. На основі комп'ютеризованої адаптивної багатоетапної технології проведення тестування розроблена модель системи діагностування когнітивних функцій людини для задач професійного

відбору і контролю стану когнітивної психофункціональної сфери респондента. Багаторівневість системи забезпечує діагностику множини компонент когнітивної сфери (когнітивних функцій), а адаптивність дозволяє сформувати оптимальну траєкторію проходження тестування. Принцип функціонування системи відображений в узагальненому алгоритмі її роботи. Запропонована модель забезпечує всебічний аналіз когнітивної сфери з мінімізацією витрат часу і ресурсів, що дозволяє підвищити ефективність процедури професійного відбору на посади, пов'язані з підвищеними вимогами до когнітивних функцій людини.

Список літератури: 1. Сельський П.Р. Алгоритм статистичної обробки та аналізу результатів тестування для оцінки якості тесту / П.Р. Сельський // Медична освіта. – 2015. – № 3. – С. 14-19. 2. Wainer H. Computerized adaptive testing: a primer / H. Wainer, N.J. Dorans, R. Flaugher and other. – London – N.Y.: Routledge, 2000. – 335 p. 3. Постемська К.С. Аналіз існуючих методів для оцінювання фізичної працездатності / К.С. Постемська, С.М. Зленко, Д.Х. Штофель, С.А. Петрушин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: XII міжнар. наук.-техн. конференція. – Одеса-Хмельницький: ХНУ, 2013. – С. 126-127. 4. Chang H.-H. Psychometrics behind computerized adaptive testing / H.-H. Chang // Psychometrika. – 2014. – Vol. 80. – № 1. – P. 1-20. 5. New Horizons in Testing: Latent Trait Test Theory and Computerized Adaptive Testing / Ed. David J. Weiss. – N.Y.: Elsevier, 2014. – 345 p. 6. Vie J.J. A review of recent advances in adaptive assessment / J.J. Vie, F. Popineau, E. Bruillard, Y. Bourda // Learning Analytics: Fundamentals, Applications, and Trends. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – P. 113-142. 7. Lynch D. Real world usage of an adaptive testing algorithm to uncover latent knowledge / D. Lynch, C.P. Howlin // Proceedings of ICERI2014 Conference, Seville, Spain. – 2014. – P. 504-511. 8. Chen S. Computer adaptive testing using the Same-Decision Probability / S. Chen, A. Choi, A. Darwiche // Proceedings of the Twelfth UAI Conference on Bayesian Modeling Applications. – 2015. – Workshop-Volume 1565. – P. 34-43. 9. Vie J.J. A Heuristic Method for Large-Scale Cognitive-Diagnostic Computerized Adaptive Testing [Digital source] / J.J. Vie, F. Popineau, F. Tort and other // Jill-Jënn Vie. – 2017. – Access mode: http://jill-jenn.net/_static/works/a-heuristic-method-for-large-scale-cognitive-diagnosticcomputerized-adaptive-testing.pdf (accessed 27.03.2017). 10. Бессарабов Н.А. Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы тестирования знаний / Н.А. Бессарабов, А.В. Бондаренко, Т.Н. Кондратенко, Д.С. Тимофеев // Программные продукты и системы. – 2016. – № 1 (113). – С. 68-74. 11. Zheng Y. On-the-fly assembled multistage adaptive testing / Y. Zheng, H.H. Chang // Applied Psychological Measurement. – 2015. – Vol. 39 (2). – P. 104-118. 12. Локишина А.Б. Современные представления о недементных когнитивных расстройствах / А.Б. Локишина // Эффективная фармакотерапия. – 2015. – № 1. – С. 36-44.

References:

1. Selskyi, P.R. (2015), "Algorithm for statistical processing and analysis of testing results for test quality evaluation", *Medical education*, Vol. 3, pp. 14-19.
2. Wainer, H., Dorans, N.J., Eignor, D. [et al.] (2000). *Computerized adaptive testing: A primer*, Routledge, London and New York, 335 p.
3. Postemska, K.S., Zlepko, S.M., Shtofel, D.Kh., and Petrushyn, S.A. (2013), "Analysis of existing methods for physical working capacity assessment", *Proceedings of the 12th International Conference Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, Odesa. Ukraine, pp. 126-127.

4. Chang, Hua-Hua (2014), "Psychometrics behind computerized adaptive testing", *Psychometrika*, Vol. 80, No 1, pp. 1-20.
5. Weiss, David J. (ed.) (2014), *New Horizons in Testing: Latent Trait Test Theory and Computerized Adaptive Testing*, Elsevier, New York, 345 p.
6. Vie, J.J., Popineau, F., Bruillard, É., and Bourda, Y. (2017), "A review of recent advances in adaptive assessment", In *Learning Analytics: Fundaments, Applications, and Trends*, Springer International Publishing, Cham, pp. 113-142.
7. Lynch, D., and Howlin, C.P. (2014), "Real world usage of an adaptive testing algorithm to uncover latent knowledge", *Proceedings of ICERI2014 Conference*, Seville, Spain, pp. 504-511.
8. Chen, S., Choi, A., and Darwiche, A. (2015, July), "Computer adaptive testing using the Same-Decision Probability", *Proceedings of the Twelfth UAI Conference on Bayesian Modeling Applications*, Workshop-Volume 1565. pp. 34-43.
9. Vie, J.J., Popineau, F., Tort, F. [et al.] (2017), "A Heuristic Method for Large-Scale Cognitive-Diagnostic Computerized Adaptive Testing", available at: http://jill-jenn.net/_static/works/a-heuristic-method-for-large-scale-cognitive-diagnostic-computerized-adaptive-testing.pdf (accessed 27 March 2017).
10. Bessarabov, N.A., Bondarenko, A.V., Kondratenko, T.N., and Timofeev, D.S. (2016), "Algorythmic software of adaptive system for knowledge testing", *Software & Systems*, Vol. 1 (113), pp. 68-74.
11. Zheng, Y., and Chang, H.H. (2015), "On-the-fly assembled multistage adaptive testing", *Applied Psychological Measurement*, Vol. 39 (2), pp. 104-118.
12. Lokshina, A.B. (2015), "Modern notions of non-demented cognitive impairment", *Effective Pharmacotherapy*, Vol. 1, pp. 36-44.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. ВНТУ Зленко С.М.

Надійшла (received) 00.00.2017

Navrotska Ksenia, Postgraduate
Vinnytsia National Technical University
Str. Khmelnytske Shose 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021
Tel.: (0432) 598-123, e-mail: ksysha33@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8373-6387

Shtofel Dmytro, Ph.D., Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
Str. Khmelnytske Shose 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021
Tel.: (0432) 598-123, e-mail: striks@ukr.net
ORCID: 0000-0002-9807-5179

Kostishyn Sergiy, Ph.D., Senior Lecturer
Vinnytsia National Technical University
Str. Khmelnytske Shose 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021
Tel.: (0432) 598-123, e-mail: seruykost@rambler.ru
ORCID: 0000-0002-4701-8721

Makohon Vitaliy, Assistant
Vinnytsia National Technical University
Str. Khmelnytske Shose 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021
Tel.: (0432) 598-123, e-mail: vim1986@i.ua

УДК 004.9:616-072.8

Адаптивний алгоритм тестування для оцінювання когнітивних функцій людини / Навроцька К.С., Штофель Д.Х., Костишин С.В., Макогон В.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 135 – 143.

В статті розглянутий процес організації багаторівневого адаптивного тестування для діагностики стану когнітивної сфери респондента в задачах професійного відбору. Розвинутий підхід, який дозволяє організувати ефективне тестування з мінімізацією кількості тестів. Розроблена модель системи адаптивного тестування. Наведено приклад траєкторії тестування для чотирьохрівневого оцінювання когнітивної сфери людини та розроблено узагальнений алгоритм роботи системи адаптивного тестування. Ил.: 3. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: алгоритм; тестування; багаторівневе адаптивне тестування; когнітивна сфера; професійний відбір; модель; траєкторія тестування.

УДК 004.9:616-072.8

Адаптивный алгоритм тестирования для оценивания когнитивных функций человека / Навроцкая К.С., Штофель Д.Х., Костишин С.В., Макогон В.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 135 – 143.

В статье рассмотрен процесс организации многоуровневого адаптивного тестирования для диагностики состояния когнитивной сферы респондента в задачах профессионального отбора. Развит подход, который позволяет организовать эффективное тестирование с минимизацией количества тестов. Разработана модель системы адаптивного тестирования. Приведен пример траектории тестирования для четырехуровневого оценивания когнитивной сферы человека и разработан обобщенный алгоритм работы системы адаптивного тестирования. Илл.: 3. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: алгоритм; тестирование; многоуровневое адаптивное тестирование; когнитивная сфера; профессиональный отбор; модель; траектория тестирования.

UDC 004.9:616-072.8

Adaptive testing algorithm for human cognitive functions assessing / Navrotska K.S., Shtofel D.Kh., Kostishyn S.V., Makohon V.I. / Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 135 – 143.

The article deals with the organizing process of multi-level adaptive testing for the respondent's cognitive sphere diagnostics in the tasks of professional selection. An approach that allows to organize effective testing with minimization of tests number is developed. A model of the adaptive testing system is developed. We gave an example of a testing trajectory for a four-level assessment of the human cognitive sphere, and a generalized algorithm of the adaptive testing system is developed. Figs.: 3. Refs.: 12 titles.

Keywords: algorithm; testing; multi-level adaptive testing; cognitive sphere; professional selection; model; testing trajectory.

Л.С. ФАЙНЗИЛЬБЕРГ, д-р техн. наук, доц., Міжнародний науково-учебний центр інформаційних технологій і систем НАН України і МОН України, Київ,

К.Б. ОРИХОВСКАЯ, асп., Міжнародний науково-учебний центр інформаційних технологій і систем НАН України і МОН України, Київ

НОВЫЙ ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АЛЬТЕРНАЦИИ СЕРДЦА ПО ОДНОКАНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЕ

Рассматривается метод обнаружения эффекта электрической альтернации сердца, основанный на анализе перестановочной энтропии, которая вычисляется по массиву показателей одноканальной электрокардиограммы в скользящих окнах. Представлены результаты исследования метода на модельных и реальных данных. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: электрическая альтернация сердца; перестановочная энтропия; электрокардиограмма.

Постановка проблемы. Один из предикторов внезапной сердечной смерти, который в последнее время получил широкую известность в клинических исследованиях, основан на анализе, так называемой, электрической альтернации сердца [1 – 3]. В то же время, по мнению специалистов, существующие компьютерные алгоритмы не обеспечивают требуемую надежность обнаружения этого эффекта в реальных клинических условиях.

Сложность решения задачи обусловлена тем, что реальные сигналы с наличием и отсутствием электрической альтернации внешне практически неразличимы (рис. 1) [4].

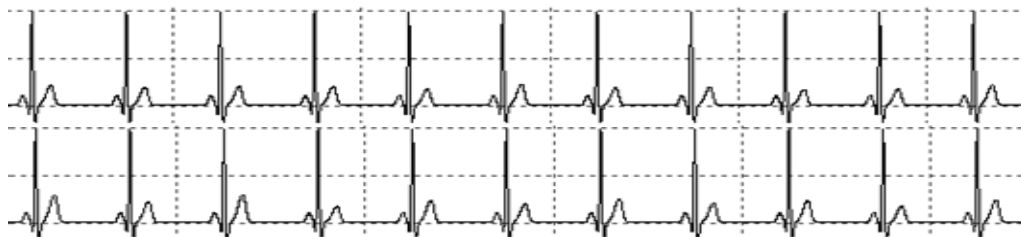


Рис. 1. Электрокардиограмма со случайным искажением (вверху) и альтернатией (внизу) зубца *T*

Согласно [5], диагностически значимый уровень альтернации зубца

T составляет всего 5 – 10 мкВ. Надежное обнаружение таких тонких изменений сигнала на фоне возможных искажений, вызванных случайными возмущениями, требует применения эффективных компьютерных алгоритмов.

Анализ литературы. Один из известных подходов к построению компьютерных алгоритмов анализа альтернации зубца основан на алгоритме быстрого преобразования Фурье и обнаружении характерного пика на частоте, равной половине частоты сердечных сокращений [6]. В то же время такой алгоритм может давать приемлемые результаты лишь в том случае, когда амплитуда зубца T изменяется по синусоидальному закону.

Для повышения достоверности результатов в работе [7] предложено оценивать степень альтернации на основе спектральных составляющих разложения по функциям Уолша. Такой алгоритм позволяет обнаружить эффект альтернации, который проявляется не только в чередовании амплитуд, но и симметрий зубца T .

В клинической практике наблюдаются также другие типы альтернации, в частности, чередование зубцов T с разной продолжительностью [8]. Возможны также сочетания различных типов альтернации на одной электрокардиограмме (ЭКГ).

Практика показывает, что в реальных ситуациях фаза чередования зубцов может изменяться в случайные моменты времени. В таких ситуациях анализ альтернации на основе спектральных разложений приводит к ошибочным результатам.

Кроме того, спектральные методы обладают существенным недостатком: для получения корректных оценок требуется с помощью дополнительных стимулирующих катетеров в течение продолжительного времени (более 5 минут) поддерживать стабильные значения частоты сокращения сердца (ЧСС) на высоких уровнях (не менее 100 уд/мин), что не всегда безопасно для пациента [6].

Поэтому получили известность методы анализа альтернации зубца T , основанные на обработке ЭКГ во временной области, в частности, на оценке усредненных значений амплитуд четных и нечетных зубцов T [5]. Однако такой алгоритм эффективен лишь при четком чередовании зубцов различных типов.

Для расширения возможностей компьютерного обнаружения эффекта электрической альтернации сердца в [9] предложен более совершенный алгоритм, основанный на анализе формы гистограммы, характеризующей распределение параметров зубцов. Признаком альтернации является двумодальность гистограммы и выполнение дополнительных условий, налагаемых на подмножества индексов элементов ЭКГ.

Этот алгоритм основан на предположении, что при электрической альтернации амплитуды зубцов T порождаются двумя случайными величинами Y_A и Y_B , которые с ограниченными дисперсиями варьируют относительно "своих" средних значений $M\{Y_A\} \neq M\{Y_B\}$, причем

$$Y_A \in [Y_A^{\min}, Y_A^{\max}], \quad Y_B \in [Y_B^{\min}, Y_B^{\max}] \quad (1)$$

и

$$Y_A^{\max} < Y_B^{\min} \quad \text{или} \quad Y_B^{\max} < Y_A^{\min}. \quad (2)$$

Однако из-за случайных возмущений в реальных условиях ограничение (2) может не выполняться.

Цель статьи – разработать надежный алгоритм обнаружения эффекта альтернации, основанный на анализе хаотичности последовательностей амплитудно-временных параметров элементов ЭКГ, и оценить эффективность алгоритма на модельных и реальных данных.

Математические основы предлагаемого метода. Пусть

$$a_1, a_2, \dots, a_M \quad (3)$$

– массив значений параметров, наблюдаемых на последовательности сердечных циклов, например, массив значений амплитуд зубцов T .

Разобьем массив (3) на L последовательных окон, в каждом таком l -м окне оценим хаотичность H_l значений исследуемого показателя и вычислим отношение H_l к хаотичности H_1 элементов в первом окне:

$$h_l = \frac{H_l}{H_1} \cdot 100 \%, \quad l = 1, \dots, L, \quad (4)$$

полагая, что $H_1 \neq 0$.

Для оценки H_l будем использовать алгоритм вычисления перестановочной энтропии

$$H_l = - \sum_{j=1}^5 p(\pi_{jl}) \log_2 p(\pi_{jl}), \quad (5)$$

в которой $p(\pi_{jl})$ – частота появления паттерна j -го класса в l -м окне.

Перестановочная энтропия (5) характеризует разнообразие формы пяти классов паттернов (рис. 2), образованных тройкой последовательных значений a_{m-1} , a_m , a_{m+1} массива (3).

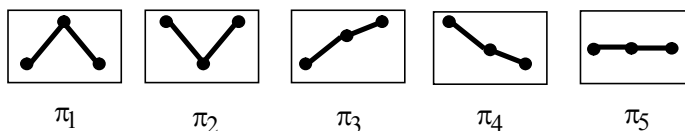


Рис. 2. Классы паттернов перестановочной энтропии

Для обеспечения плавности изменения энтропии процедура (4) реализуется при сдвиге $l+1$ -го окна по отношению l -му на одну точку (режим скользящего окна).

Применение специальных вычислительных процедур позволяет отобразить последовательность H_l на плоскости $h(l), \dot{h}(l)$, где $\dot{h}(l)$ – оценка первой производной $h(l)$ в l -й точке, и определить площадь S выпуклой оболочки, построенного таким образом фазового портрета энтропии (ФПЭ) (рис. 3).

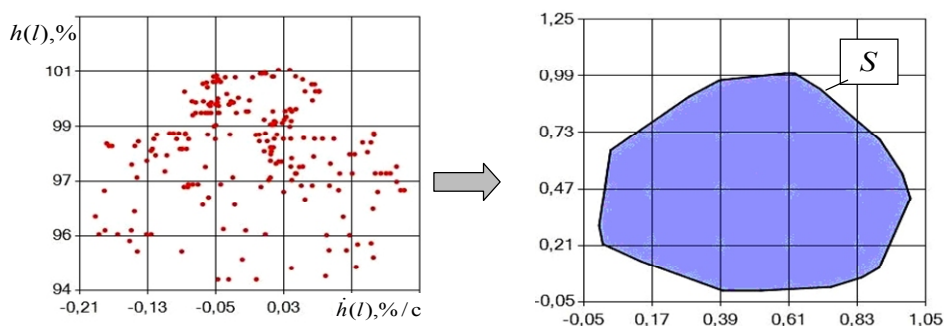


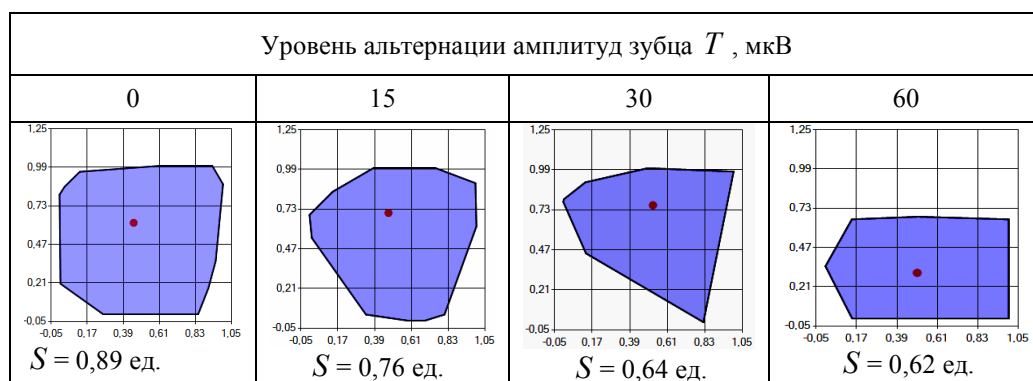
Рис. 3. ФПЭ (слева) и его выпуклая оболочка (справа)

Модельные эксперименты. Для оценки эффективности предложенного подхода использовалась генеративная модель порождения искусственных ЭКГ реалистической формы [10], с помощью которой генерировались тестовые сигналы с различными значениями уровня альтернации амплитуд зубца T на фоне 15 % случайных искажений.

Несмотря на то, что модельные сигналы были практически неразличимы, площадь S выпуклой оболочки фазового портрета энтропии (ФПЭ) монотонно уменьшалась по мере нарастания альтернации зубца T , т.е. по мере увеличения доли регулярной составляющей в изменчивости амплитуд.

При уровне альтернации 60 мкВ площадь S уменьшилась более чем на 30 % (от 0,89 ед. до 0,62 ед.) по сравнению с сигналом без альтернации (табл. 1).

Таблиця 1

Площади S выпуклых оболочек ФПЭ

Адекватные результаты получены также и при обработке реальных ЭКГ. Площадь выпуклой оболочки ФПЭ, вычисленная по ЭКГ пациента с альтернатией продолжительностей RR -интервалов была почти в 4 раза ниже, чем у здорового пациента с внешне похожей ЭКГ.

Выводы. Предложен новый метод обнаружения электрической альтернации сердца, который, в отличие от ранее известных, основан на оценке изменения значения перестановочной энтропии по ходу наблюдения сигнала. Применение специальных вычислительных процедур позволяет оценить первую производную перестановочной энтропии и вычислить площадь выпуклой оболочки ее фазового портрета (ФП).

Проведенные исследования подтвердили, что площадь выпуклой оболочки ФП позволяет надежно обнаружить электрическую альтернацию сердца, в том числе RR -интервалов и симметрии зубца T , и использовать этот показатель в качестве предиктора внезапной сердечной смерти.

Список литературы: 1. Файнзильберг Л.С. Основы фазографии / Л.С. Файнзильберг. – Киев: Освита України, 2017. – 264 с. 2. Sakabe K. Comparison of T-wave alternans and QT interval dispersion to predict ventricular tachyarrhythmia in patients with dilated cardiomyopathy and without antiarrhythmic drugs: a prospective study / K. Sakabe, T. Ikeda, T. Sakata // Japanese Heart Journal. – 2001. – Vol. 42. – №. 4. – P. 451-457. 3. Bloomfield D.M. Microvolt T-Wave Alternans Distinguishes Between Patients Likely and Patients Not Likely to Benefit From Implanted Cardiac Defibrillator Therapy / D.M. Bloomfield, R.S. Steinman // Circulation. – 2004. – №. 110. – P. 1885-1889. 4. Predescu D. Microvolt T wave alternans (MTWA) – a new non-invasive predictor of sudden cardiac death / D. Predescu, P. Mitrut, A. Giuca // Romanian Journal of Internal Medicine. – 2004. – Vol. 42. – №. 3. – P. 647-656. 5. Nearing B.D. Modified moving average analysis of T-wave alternans to predict ventricular fibrillation with high accuracy / B.D. Nearing, R.L. Verrier // Journal of Applied Physiology. – 2002. – Vol. 92. – P. 541-549. 6. Rosenbaum D.S. Electrical alternans and vulnerability to ventricular arrhythmias

/ D.S. Rosenbaum, L.E. Jackson, J.M. Smith // *New England Journal of Medicine*. – 1994. – № 330. – P. 235-241. 7. Мельник О.В. Метод выявления альтернции Т-зубца электрокардиосигнала / О.В. Мельник // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 2008. – № 7. – С. 56-59. 8. Verrier R.L. Median beat analysis of T-wave alternans to predict arrhythmic death after myocardial infarction: results from the Autonomic Tone and Reflexes after Myocardial Infarction Study / R.L. Verrier, B.D. Nearing, M.T. LaRovere, G. Pinna, M.A. Mittleman, J.T. Bigger, P.J. Schwartz // *Circulation*. – 2000. – № 102. – P. 711-713. 9. Файнзильберг Л.С. Спосіб оцінювання електричної альтернації серця / Л.С. Файнзильберг, В.П. Сакун, В.В. Соловйов // Патент України на винахід № 101918. – 2013. – Бюл. № 9. 10. Fainzilberg L.S. T-Wave Alternans Modeling on Artificial Electrocardiogram with Internal and External Perturbation / L.S. Fainzilberg, T.Yu. Bekler // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2012. – Vol. 44. – Issue 7. – P. 1-14.

References:

1. Fainzilberg, L.S. (2017), *Fasegraphy basics*, Osvita Ukrainy, Kyiv, 264 p.
2. Sakabe, K., Ikeda, T. and Sakata, T. (2001), "Comparison of T-wave alternans and QT interval dispersion to predict ventricular tachyarrhythmia in patients with dilated cardiomyopathy and without antiarrhythmic drugs: a prospective study", *Japanese Heart Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 451-457.
3. Bloomfield, D.M. and Steinman, R.S. (2004), "Microvolt T-wave alternans distinguishes between patients likely and patients not likely to benefit from implanted cardiac defibrillator therapy", *Circulation*, Vol. 110, pp. 1885-1889.
4. Predescu, D., Mitrut, P. and Giuca, A. (2004), "Microvolt T wave alternans (MTWA) – a new non-invasive predictor of sudden cardiac death", *Romanian Journal of Internal Medicine*, Vol. 42, No. 3, pp. 647-56.
5. Nearing, B.D. and Verrier, R.L. (2002), "Modified moving average analysis of T-wave alternans to predict ventricular fibrillation with high accuracy", *Journal of Applied Physiology*, Vol. 92, pp. 541-9.
6. Rosenbaum, D.S., Jackson, L.E. and Smith, J.M. (1994), "Electrical alternans and vulnerability to ventricular arrhythmias", *New England Journal of Medicine*, Vol. 330, pp. 235-41.
7. Melnik, O.V. (2008), "The Method for Detection of Electrical Cardiosignal T-Wave Alternation", *Biomedical Radioelectronics*, Vol. 7, pp. 56-9.
8. Verrier, R.L., Nearing, B.D., LaRovere, M.T., Pinna, G., Mittleman, M.A., Bigger, J.T. and Schwartz, P.J. (2000), "Median beat analysis of T-wave alternans to predict arrhythmic death after myocardial infarction: results from the autonomic tone and reflexes after myocardial infarction study", *Circulation*, Vol. 102, pp. 711-713.
9. Fainzilberg L.S., Sakun V.P., Soloviov V.V. (2013), *Method for evaluating the electrical heart alternation*, Patent UA, No. 101918.
10. Fainzilberg, L.S. and Bekler, T.Yu. (2012), "T-Wave alternans modeling on artificial electrocardiogram with internal and external perturbation", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 44, No. 7, pp. 1-14.

Статтю представил д-р техн. наук, проф. каф. ВПІ НТУ "ХПІ" Поворознюк А.И.

Поступила (received) 14.04.2017

Fainzilberg Leonid, Doctor of Technics.
International Research and Training Center for Information Technology
and Systems, NAS and MES of Ukraine
Str. Heroyiv Dnipro, 36-17, Kyiv, Ukraine, 04214

Tel.: (067) 715-15-83, e-mail: fainzilberg@voliacable.com

ORCID ID: 0000-0002-3092-0794

Orikhovska Kseniia, PhD stud.

International Research and Training Center for Information Technology
and Systems, NAS and MES of Ukraine

Str. Borshagivska, 139/141-20, Kyiv, Ukraine, 03056

Tel.: (095) 619-90-03, e-mail: kseniaor@gmail.com

УДК 61.007+004.932.72

Новий підхід до виявлення ефекту електричної альтернації серця по одноканальній електрокардіограмі / Файнзільберг Л.С., Оріховська К.Б. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 144 – 151.

Розглядається метод виявлення ефекту електричної альтернації серця, заснований на аналізі перестановної ентропії, яка обчислюється по масиву показників одноканальної електрокардіограми в ковзних вікнах. Представлені результати дослідження методу на модельних і реальних даних. Іл.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: електрична альтернація серця; електрокардіограма; перестановна ентропія.

УДК 61.007+004.932.72

Новый подход к обнаружению эффекта электрической альтернации сердца по одноканальной электрокардиограмме / Файнзильберг Л.С., Ориховская К.Б. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 144 – 151.

Рассматривается метод обнаружения эффекта электрической альтернации сердца, основанный на анализе перестановочной энтропии, которая вычисляется по массиву показателей одноканальной электрокардиограммы в скользящих окнах. Представлены результаты исследования метода на модельных и реальных данных. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: электрическая альтернация сердца; электрокардиограмма; перестановочная энтропия.

УДК 61.007+004.932.72

A new approach to detecting the electrical alternation effect of the heart on a single-channel electrocardiogram / Fainzilberg L.S., Orikhovska K.B. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 144 – 151.

The method of detecting the electrical alternation effect of the heart, based on the permutation entropy analysis, which is calculated from the array of single-channel electrocardiogram parameters in sliding windows, is considered. The results of the research method on model and real data are presented. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: electric alternation of the heart; electrocardiogram; permutation entropy.

***Проблемы защиты информации в
современных системах***

И.Ю. ГРИШИН, д-р техн. наук, проф., КубГТУ, Краснодар,
Р.Р. ТИМИРГАЛЕЕВА, д-р экон. наук, проф., КубГТУ, Краснодар,
М.В. МИРОНОВ, асп., КубГТУ, Краснодар

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА

Задачей исследования явилась проверка работоспособности программного прототипа модели, а также исследование его функциональных возможностей. Осуществлена оценка правильности работы программного прототипа модели на каждом из этапов: регистрация нового пользователя в системе, формирование на основе статистических данных эталонного профиля пользователя, проведение процедур идентификации и аутентификации пользователя с учётом установленных администратором фильтров, просмотр результата авторизации пользователя. Для проведения исследований разработан программный комплекс, позволяющий провести необходимый перечень экспериментов, а также осуществить статистическую обработку результатов, оценить значения ошибок первого и второго рода при аутентификации. Ил.: 5. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: модель аутентификации пользователя; ошибки первого и второго рода; клавиатурный почерк.

Постановка проблемы. Основу любой информационной системы предприятия составляют компьютерные комплексы, представляющие собой серверы и автоматизированные рабочие места пользователей, предназначенные для обработки информации с целью реализации ключевых бизнес-процессов организации. При работе пользователя на компьютере фиксируется различная информация, связанная с его деятельностью. Эта информация может быть отнесена к критической или чувствительной, несанкционированное раскрытие, модификация или утрата которой может привести к ощутимому убытку или ущербу предприятия и даже государства. Такая информация относится к различным видам информации ограниченного доступа и должна защищаться в соответствии с требованиями действующего в стране законодательства.

Для защиты от несанкционированного доступа к информации ограниченного доступа, в соответствии с требованиями регуляторов в области информационной безопасности, используется процедура аутентификации, от качества и стойкости которой будет зависеть эффективность защиты компьютерной системы. В настоящее время существует множество систем аутентификации, в основе которых лежат самые разнообразные методы: от простой двухфакторной

аутентификации "логин-пароль" до многофакторной аутентификации с применением биометрических методов распознавания. Использование биометрической аутентификации позволяет привязать пароль к субъекту, тем самым делая процедуру аутентификации более эффективной. Основными критериями качества процедуры аутентификации являются её стойкость и надёжность при идентификации субъекта доступа. Поэтому в настоящее время актуальны исследования, связанные с разработкой новых методов аутентификации и повышением качества существующих.

Анализ литературы. Проблемам разработки и исследованиям систем аутентификации посвящены работы отечественных и зарубежных учёных [1 – 4]. В их работах затрагиваются вопросы, связанные с уровнями строгости аутентификации, методами динамической и статической биометрической аутентификации, способами повышения надёжности и стойкости процесса аутентификации в различных системах.

Биометрическая аутентификация личности относится к технологиям, используемым для контроля физических или поведенческих характеристик человека, которые предлагают радикальную альтернативу традиционным методам аутентификации. Поскольку биометрические методы представляют ряд ограничений с точки зрения точности, универсальности, своеобразия и приемлемости, рассматриваемые методы привлекли повышенное внимание исследователей с целью улучшения способности систем для обработки низкокачественных и неполных данных, обеспечения масштабируемости для управления огромными базами данных пользователей, обеспечения совместимости и защиты конфиденциальности пользователей от атак. В работе [2] осуществлён анализ различных методов использования информации, применяемой в биометрической области. Приводится обзор нескольких систем и архитектур, связанных с комплексным использованием биометрических систем, как унимодальных так и мультимодальных, их классификация в соответствии с указанным контекстом. Здесь также обращено внимание на проблему оценки биометрической системы, обсуждены основные подходы к анализу показателей эффективности, предложены некоторые перспективные направления исследований.

В работе [5] рассмотрен новый подход к проблеме биометрической аутентификации, состоящий в применении аппарата нечёткого распознавания образов. Показано, что данный метод позволяет снизить размер базы данных, используемой для аутентификации, однако вычислительная трудоёмкость метода является достаточно высокой, что

не позволяет его применить в низкопроизводительных компьютерных системах.

Ряд работ посвящён проблеме аутентификации пользователей в мобильных устройствах, смарт-устройствах [6, 7], особенностью которых является достаточно низкая вычислительная производительность, что сильно ограничивает возможность использования традиционных подходов решения рассматриваемой задачи.

В работе [8] в качестве идентифицируемого признака используется радужная оболочка глаз. Такой метод аутентификации требует достаточно большой базы исходных изображений для каждого пользователя.

При этом следует отметить, что в рассмотренных работах авторы не уделяли должного внимания исследованию метрик определения аффинности и их влиянию на качество аутентификации пользователей в биометрических системах [9, 10].

Цель статьи состоит в исследовании качества процедуры аутентификации с использованием методов поведенческой биометрии за счёт оценки влияния метрики определения аффинности признаков на точность классификации.

Материалы и методы. При проведении экспериментальных исследований и тестирования разработанного программного комплекса биометрической аутентификации пользователя в компьютерной системе на основе клавиатурного почерка применялось следующее аппаратное и программное обеспечение.

Аппаратное обеспечение: компьютер Intel(R) Core(TM) i7 CPU; процессор i7-2670-QM@ 2.2 ГГц; оперативная память 6 ГБ.

Программное обеспечение: операционная система Windows7, домашняя базовая SP1; Microsoft Visual Studio .Net 2010.

При взаимодействии пользователей с программой использованы следующие элементы управления (ЭУ): стандартные ЭУ окном Windows; кнопки различных размеров и видов; выпадающие списки; поля ввода и вывода цифровых данных.

Для взаимодействия пользователя с ЭУ применяется манипулятор типа "мышь", touchpad, сенсор или др. Также возможно использование для этой цели клавиатуры ЭВМ.

Программный комплекс является 32-разрядным приложением, работающим под управлением ОС WindowsXP/7/8/10. Программа имеет оконный интерфейс. Работа пользователя с ней строится на принципах, принятых в ОС Windows. Программа написана на языке VisualC# 2010 среды разработки Visual Studio, Microsoft .Net, Framework 4.0.

Оценка эффективности модели аутентификации пользователя на основе клавиатурного почерка. Задачами первого эксперимента

является проверка работоспособности программного прототипа модели, исследование его функциональных возможностей и оценка показателя эффективности. Для этого необходимо оценить правильность и адекватность работы программного прототипа модели на следующих этапах [11, 12]:

- 1) регистрация нового пользователя в системе;
 - 2) формирование на основе статистических данных эталонного профиля пользователя;
 - 3) проведение процедур идентификации и аутентификации пользователя с учётом установленных администратором фильтров;
 - 4) просмотр результата авторизации пользователя.
- Результаты первого этапа – регистрации пользователя.

В процессе регистрации пользователя в системе пользователю необходимо ввести свои аутентификационные данные, состоящие из логина и пароля, а также заполнить следующие поля: Ф.И.О, опыт работы, сфера деятельности, электронная почта.

Ожидаемыми результатами данного этапа после прохождения процедуры регистрации будет добавление данных пользователя в анкету и генерирование текста для составления биометрического профиля пользователя на основе парольной фразы.

Следующий этап – формирование на основе статистических данных эталонного профиля пользователя (рис. 1).

В процессе формирования профиля пользователя вводится текст, сгенерированный на основе парольной фразы и осуществляется переход к следующему этапу (кнопка "далее").

Ожидаемым результатом данного шага после процедуры регистрации, формирования эталонного профиля пользователя будет являться создание эталонного профиля пользователя и добавление его во вкладку "пользователи".

Функциональные возможности данной вкладки позволяют также удалять и добавлять новых пользователей информационной системы.

Очередной этап – проведение процедур идентификации и аутентификации пользователя с учётом установленных администратором фильтров (рис. 2).

Осуществлялось моделирование двух попыток входа в систему. В первом случае рассматривался санкционированный пользователь, эталонный профиль которого зарегистрирован в системе. Во втором случае – потенциальный злоумышленник, не имеющий зарегистрированного эталонного профиля в системе и пытающийся войти под учётными данными другого пользователя.

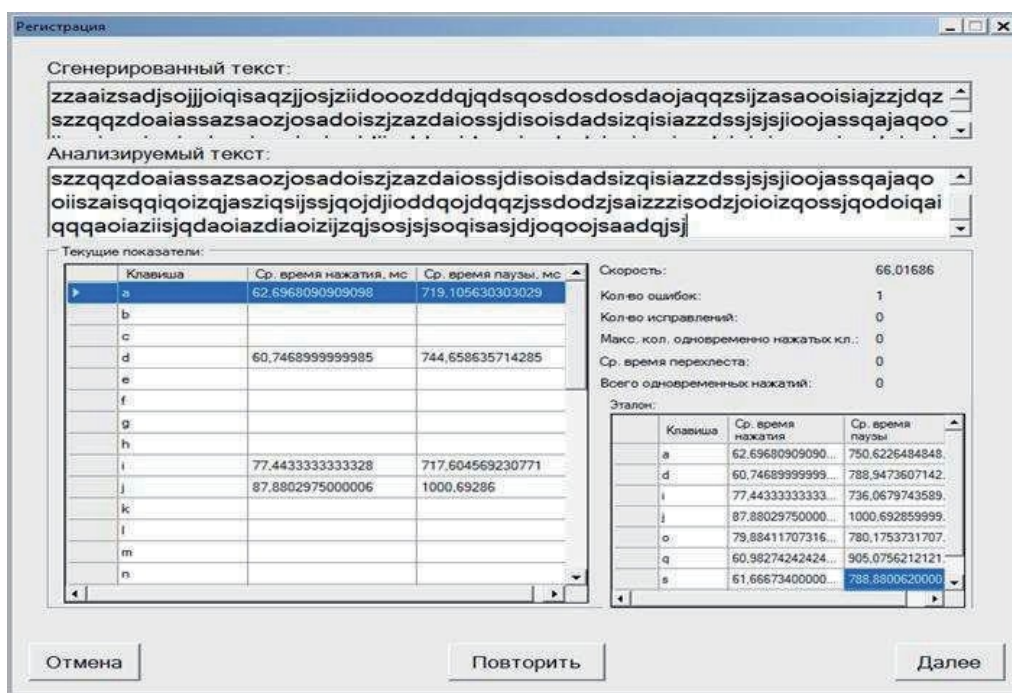


Рис. 1. Вкладка "регистрация", формирование на основе статистических данных эталонного профиля пользователя

Следующий этап – анализ результатов авторизации пользователя. В указанной вкладке администратор имеет возможность посмотреть дату авторизации конкретного пользователя, таблицы с показателями эталона, параметрами авторизации и коэффициентами отклонения.

Ожидаемым результатом данного шага является информация о пользователе, выполнявшем процедуры авторизации.

Под эффективностью разрабатываемой модели аутентификации пользователя на основе клавиатурного почерка будем понимать отношение показателей ошибок первого и второго рода при использовании биометрической аутентификации на основе клавиатурного почерка и при использовании других видов биометрической аутентификации. При расчёте показателя эффективности соответствующие отношения оказались равными 0,99 и 0,87, что говорит об эффективности применения клавиатурного почерка для биометрической аутентификации.

Таким образом, исходя из полученных результатов на каждом шаге данного эксперимента, можно сделать вывод об адекватности результатов и о работоспособности модели аутентификации пользователя в компьютерной системе на основе поведенческой биометрии.

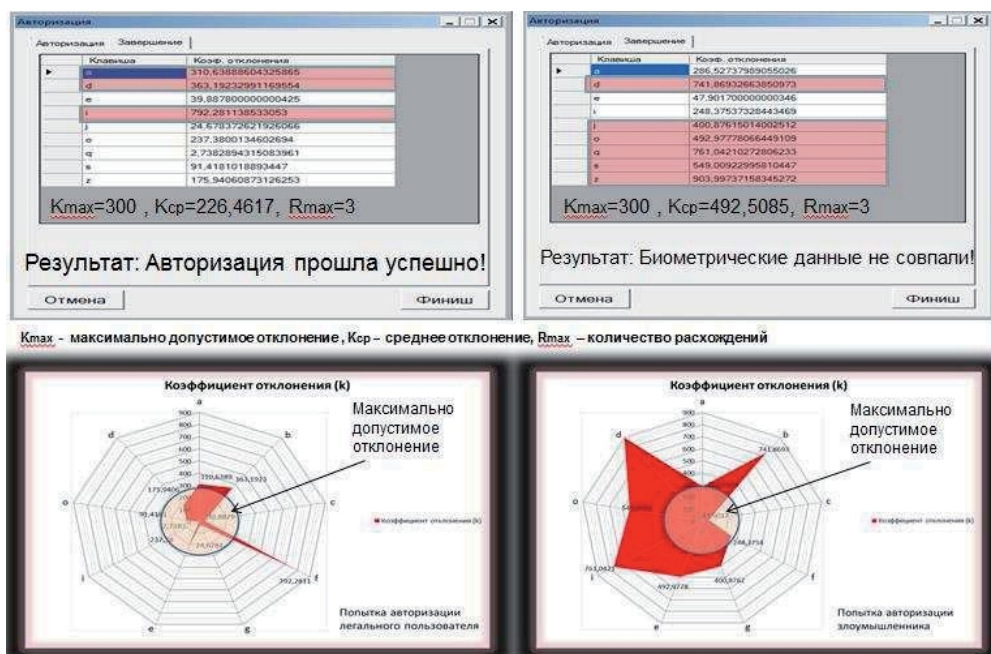


Рис. 2. Результат процедуры идентификации и аутентификации пользователя с учётом установленных администратором фильтров

Выбор метрики для расчёта аффинности эталонных и входящих параметров статистического профиля пользователя. В процессе исследования проведена серия экспериментов, целью которых являлось выявление лучшей метрики для определения аффинности эталонного профиля пользователя, зарегистрированного в системе, и профиля пользователя, пытающегося войти в систему [12].

Для одного и того же пользователя было произведено по 100 попыток входа в систему аутентификации пользователя на основе методов, использующих следующие метрики определения аффинности [1]:

- 1) относительное евклидово расстояние;
- 2) квадратичный индекс нечёткости.

Для каждой попытки входа был произведён расчёт ошибок первого и второго рода. Результаты в виде графиков зависимости ошибок первого и второго рода от количества экспериментов представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что наилучшей метрикой для определения аффинности является метрика "Относительное евклидово расстояние". Поэтому именно она будет использоваться в дальнейшем при проведении экспериментов.

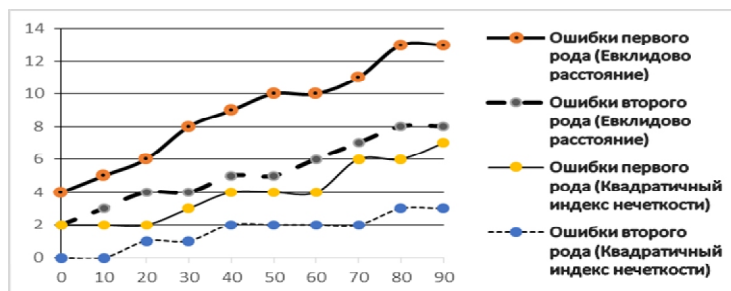


Рис. 3. Графік залежності кількості помилок першого і другого роду від кількості експериментів

Таким образом, можно сделать вывод, что используемая метрика "Относительное евклидово расстояние" повышает эффективность разработанной модели биометрической аутентификации на основе клавиатурного почерка по отношению к другим методам биометрических аутентификаций более чем на 15%.

Оценка степени влияния парольной фразы на точность аутентификации. Была проведена серия экспериментальных исследований, целью которых являлось выявление рациональной длины парольной фразы, при которой количество ошибок первого и второго рода будет наименьшим.

Зависимость длины парольной фразы от показателей ошибок первого и второго рода при проведении N -го количества экспериментов (в данной работе $N = 300$) представлена на рис. 4.



Рис. 4. Залежність довжини парольної фрази від показників помилок першого і другого роду

Анализ полученных результатов показывает, что при использовании длины парольной фразы от тринадцати символов и более показатели ошибок первого и второго рода неизменны. Следовательно, длину пароля в

тринадцять символів можна считать раціональною. В подальших експериментальних дослідженнях буде використовуватися довжина паролівної фрази в тринадцять символів.

Оценка рационального объёма текста для сбора поведенческой статистики. С этой целью осуществлена серия экспериментов ($N = 300$). Рациональной в данной работе будет считаться такая длина текстовой последовательности, которая будет давать наименьшее число ошибок первого и второго рода при аутентификации пользователя.

Зависимость длины текста для сбора поведенческой статистики пользователя от ошибок первого и второго рода представлена на рис. 5.

Анализ полученных результатов показывает, что при использовании длины текста для сбора поведенческой статистики пользователя в 300 символов и более показатели ошибок первого и второго неизменны. Следовательно, длину текста в 300 символов можно считать рациональной.

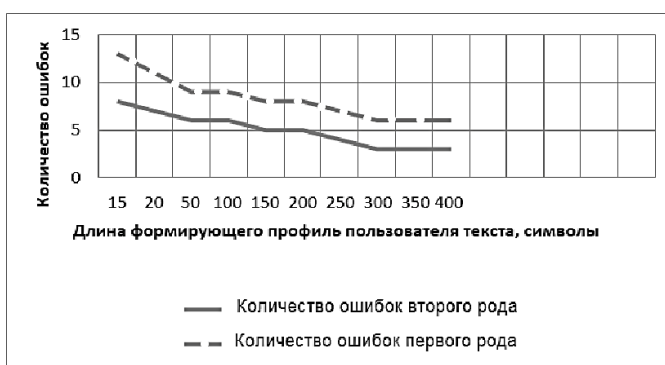


Рис. 5. Зависимость длины текста для сбора поведенческой статистики пользователя от ошибок первого и второго рода

Выводы. В результате проделанной работы описаны цели и задачи экспериментальных исследований разработанной модели аутентификации пользователя на основе поведенческой биометрии – клавиатурного почерка. Были определены требования к программным и вычислительным ресурсам, которые нужны при проведении экспериментов на разработанном программном прототипе, выделены четыре группы экспериментов, направленные на:

- проверку работоспособности программного прототипа и оценку его средней эффективности;
- определение наилучшей метрики для определения аффинности эталонных и входящих параметров статистических характеристик клавиатурного почерка;

- определение влияния парольной фразы на точность аутентификации;
- определение оптимального объема текста для сбора поведенческой статистики.

По результатам проведенных исследований в рамках каждого эксперимента был сделан вывод о работоспособности программного комплекса и возможности применения его в качестве инструментального средства модели аутентификации пользователя в компьютерной системе на основе поведенческой биометрии, позволяющей повысить эффективность процедуры аутентификации, что показывают рассчитанные показатели эффективности (15%).

Кроме того, на эффективность аутентификации оказывают непосредственное влияние длина парольной фразы и длина первоначального текста, который используется для сбора статистики в процессе формирования эталонного профиля пользователя при его регистрации. Наилучшие показатели по ошибкам первого и второго рода (2% и 1% соответственно) в процессе аутентификации пользователя были зафиксированы при длине пароля в 13 символов и длине текста, предназначенного для сбора статистики профиля пользователя в 300 символов, что является нормой для поведенческих динамических систем. Следовательно, можно сделать вывод о достаточности длины формируемого профиля текста и отсутствии необходимости её дальнейшего увеличения.

Практическая значимость разработанной модели заключается в том, что её можно использовать: в качестве инструмента аутентификации пользователя в компьютерной системе; в учебном процессе в качестве лабораторного стенда при обучении студентов в области информационной безопасности. Например, при подготовке студентов кафедры компьютерных технологий и информационной безопасности Кубанского государственного технологического университета, обучающихся по специальности "Информационная безопасность автоматизированных систем" и по направлению подготовки бакалавров "Информационная безопасность".

Работа выполняется при поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края (проект - 16-46-230121).

Список литературы: 1. Миронов М. В. Аутентификация пользователей в компьютерной системе на основе поведенческой биометрии / И.Ю. Гришин, М.В. Миронов // Проблемы інформатики та моделювання. Тези шістнадцятої міжнародної науково-технічної конференції 12-16 сентября 2016 г. – Одесса. – 2016. – С. 28. 2. Lumini A. Overview of the combination of biometric matchers / A. Lumini, L. Nanni // Information Fusion. – Jan. 2017. – Vol. 33. – P. 71-85. 3. Савинов А.Н. Математическая модель механизма распознавания клавиатурного почерка на основе гауссовского распределения / А.Н. Савинов, И.Г. Сидоркина // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. Вып. 1. –

Нальчик: Кабардино-Балкарский научный центр РАН, 2013. – С. 26-32. 4. Шарипов Р.Р. Разработка полигауссового алгоритма аутентификации пользователей в телекоммуникационных системах и сетях по клавиатурному почерку: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева. – Казань, 2006. – 135 с. 5. Сафиуллин Н.Э. Аппаратурный анализ клавиатурного почерка с использованием эталонных гауссовских сигналов / Н.Э. Сафиуллин, Р.Р. Шарипов // Вестник Казанского государственного технического университета. – 2006. – № 2. – С. 21-23. 6. Fakhara K. Fuzzy pattern recognition-based approach to biometric score fusion problem / K. Fakhara, M. Aroussi, M. Saidi, D. Aboutajdine // Fuzzy Sets and Systems. – Dec. 2016. – Vol. 305. – P. 149-159. 7. Blasco J. A Survey of Wearable Biometric Recognition Systems / J. Blasco, T. Chen, J. Tapiador, P. Peris-Lopez // ACM Computing Surveys (CSUR) Surveys Homepage archive. – Dec. 2016. – Vol. 49. – Issue 3. – Article No. 43.– P. 406-408. 8. Ahmad J. Analysis of interaction trace maps for active authentication on smart devices / J. Ahmad, M. Sajjad, Z. Jan, I. Mehmood, S. Rho, S. Baik // Multimedia Tools and Applications. – Feb. 2017. – Vol. 76. – Issue 3. – P. 4069-4087. 9. Czajka A. Verification of Iris Image Authenticity Using Fragile Watermarking / A. Czajka, W. Kasprzak, A. Wilkowski // Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences. – Dec 2016. – Vol. 64. – Issue 4. – P. 807-819. 10. Гришин И.Ю. Анализ перспективных подходов к проектированию систем безопасности распределённых компьютерных сетей / И.Ю. Гришин // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2015. – № 2. – С. 36-40. 11. Тимиргалеева Р.Р. Цифровая экономика: построение и оптимизация бизнес-процессов / Р.Р. Тимиргалеева, И.Ю. Гришин // NovalInfo.Ru. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 176-182. 12. Гришин И.Ю. Проблемы управления зенитными ракетными комплексами / И.Ю. Гришин, М.К. Можар, В.М. Решетник // Наука и оборона. – 1994. – № 3. – С. 27-32. 13. Гришин И.Ю. Особенности применения биометрических методов для аутентификации обучаемого в системе дистанционного образования / И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева, М.В. Миронов, М.Г. Ефимчик // Филологические и социокультурные вопросы науки и образования. Сборник материалов I Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 219-229.

References:

1. Mironov, M.V., and Grishin I.Yu. (2016), "Authentication of users in a computer system based on behavioral biometrics", Problems of Informatics and Modeling. *Theses sixteenth International Scientific Conference*. – September 12-16 2016 year, p. 28.
2. Lumini, A., and Nanni, L. (2017), "Overview of the combination of biometric matchers", *Information Fusion*, Vol. 33, pp. 71-85.
3. Savinov, A.N., and Sidorkina, I.G. (2013), "Mathematical model of the mechanism of recognition of keyboard handwriting based on the Gaussian distribution", *News of the Kabardino-Balkarian Science Center of the Russian Academy of Sciences*, No. 1, pp. 26-32.
4. Sharipov, R.R. (2006), *Development of a polygas algorithm for user authentication in telecommunication systems and networks using keyboard handwriting: dissertation*, Kazan, 135 p.
5. Safiullin, N.E., and Sharipov, R.R. (2006), "Hardware analysis of the keyboard handwriting using standard Gaussian signals", *Bulletin of the Kazan State Technical University*, No. 2, pp. 21-23.
6. Fakhara, K., Aroussi, M., Saidi, M., and Aboutajdine, D. (2016), "Fuzzy pattern recognition-based approach to biometric score fusion problem", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 305, pp. 149-159.

7. Blasco, J., Chen, T., Tapiador, J., and Peris-Lopez, P. (2016), "A Survey of Wearable Biometric Recognition Systems", *ACM Computing Surveys (CSUR) Surveys Homepage archive*, Vol. 49, Issue 3, Article No. 43, pp. 406-408.
8. Ahmad, J., Sajjad, M., Jan, Z., Mehmood, I., Rho, S., and Baik, S. (2017), "Analysis of interaction trace maps for active authentication on smart devices", *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 76, Issue 3, pp. 4069-4087.
9. Czajka, A., Kasprzak, W., and Wilkowski, A. (2016), "Verification of Iris Image Authenticity Using Fragile Watermarking", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, Vol. 64, Issue 4, pp. 807-819. DOI: 10.1515/bpasts-2016-0090.
10. Grishin, I.Yu. (2015), "Analysis of prospective approaches to the design of security systems for distributed computer networks", *Bulletin of the Russian New University. Series: Complex systems: models, analysis and management*, No. 2, pp. 36-40.
11. Timirgaleeva, R.R., and Grishin, I.Yu. (2016), "Digital Economy: Building and Optimizing Business Processes", *NovalInfo.Ru*, Vol.1, No. 1, pp. 176-182.
12. Grishin, I.Yu., Mozhar, M.K., and Reshetnik, V.M. (1994), "The problems of control of anti-aircraft missile systems", *Science and defense*. No. 3. pp. 27- 32.
13. Grishin, I.Yu., Timirgaleeva, R.R., Mironov, M.V., and Efimchik, M.G. (2016), "Features of application of biometric methods for student authentication in the system of distance education", *Philological and sociocultural issues of science and education. Collection of materials of the First International Scientific and Practical Conference*. pp. 219-229.

Статью представил д-р техн. наук, профессор НТУ "ХПИ" Леонов С.Ю.

Поступила (received) 18.11.2016

Igor Yu. Grishin, Dr. Sci. Tech., Professor
Professor at the Department of Computer Technology and Information Security
Kuban State Technological University
Str. Krasnaya, 91, Krasnodar, Russia, 350000
Tel.: +7 (989) 140-57-55, e-mail: igugri@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5839-1858

Rena R. Timirgaleeva, Dr.Sci. Econ., Professor
Professor at the Department of Computer Technology and Information Security
Kuban State Technological University
Str. Krasnaya, 91, Krasnodar, Russia, 350000
Tel.: +7 (989) 805-47-96, e-mail: renatimir@gmail.com

Maksim V. Mironov, aspirant
Aspirant at the Department of Computer Technology and Information Security
Kuban State Technological University
Str. Krasnaya, 91, Krasnodar, Russia, 350000
Tel.: +7 (989) 140-57-55, e-mail: igugri@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5839-1858

УДК 004.056.53

Аналіз ефективності моделей аутентифікації користувачів на основі клавіатурний почерку / Гришин І.Ю., Тиміргалєєва Р.Р., Міронов М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 153 – 164.

Завданням дослідження була перевірка працездатності програмного прототипу моделі, а також дослідження його функціональних можливостей. Здійснено оцінку правильності роботи програмного прототипу моделі на кожному з етапів: реєстрація нового користувача в системі, формування на основі статистичних даних еталонного профілю користувача, проведення процедур ідентифікації й аутентифікації користувача з урахуванням встановлених адміністратором фільтрів, перегляд результату авторизації користувача. Для проведення експериментальних досліджень розроблений програмний комплекс, що дозволяє провести необхідний перелік експериментів, а також здійснити статистичну обробку результатів, оцінити значення помилок першого і другого роду при аутентифікації. Іл.: 5. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: модель аутентифікації користувача; клавіатурний почерк; авторизація користувача; помилки першого та другого роду.

УДК 004.056.53

Анализ эффективности моделей аутентификации пользователя на основе клавиатурного почерка / Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р., Мironov M.B. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 153 – 164.

Задачей исследования явилась проверка работоспособности программного прототипа модели, а также исследование его функциональных возможностей. Осуществлена оценка правильности работы программного прототипа модели на каждом из этапов: регистрация нового пользователя в системе, формирование на основе статистических данных эталонного профиля пользователя, проведение процедур идентификации и аутентификации пользователя с учётом установленных администратором фильтров, просмотр результата авторизации пользователя. Для проведения исследований разработан программный комплекс, позволяющий провести необходимый перечень экспериментов, а также осуществить статистическую обработку результатов, оценить значения ошибок первого и второго рода при аутентификации. Ил.: 5. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: модель аутентификации пользователя; клавиатурный почерк; авторизация пользователя; ошибки первого и второго рода.

UDC 004.056.53

The analysis of the effectiveness of user authentication models based on keyboard handwriting / Grishin I.Yu., Timirgaleeva R.R., Mironov M.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 153 – 164.

The tasks of the experimental study were to test the working capacity of the software prototype of the model, as well as to study its functional capabilities. The evaluation of the correctness of the software prototype of the model at each stage was carried out: registration of a new user in the system, generation of a user's reference profile based on statistical data, conducting user identification and authentication procedures taking into account the filters set by the administrator, and viewing the user's authorization result. For carrying out studies, a software package has been developed that makes it possible to carry out the necessary list of experiments, as well as to perform statistical processing of results, to estimate the values of errors of the first and second kind for authentication. Figs.: 5. Refs.: 13 titles.

Keywords: user authentication model; keyboard handwriting; biometric authentication methods; errors of the first and second kind.

***Обучение на основе
интеллектуальных технологий***

Г.А. САМИГУЛИНА, д-р техн. наук, зав. лаб. "Интеллектуальные системы управления и прогнозирования", Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан,

З.И. САМИГУЛИНА, вед. научн. сотр., Ph.D, лаб. "Интеллектуальные системы управления и прогнозирования", Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ ИНЖЕНЕРОВ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Исследования посвящены разработке инновационной интеллектуальной системы дистанционного обучения инженеров. В связи с бурным развитием техники и новых технологий остро стоит проблема подготовки квалифицированных инженерных кадров. Перспективным направлением является дистанционное обучение специалистов технических специальностей на современном оборудовании в лабораториях коллективного пользования. Обработка персональных данных обучающихся с целью выбора индивидуального плана обучения для каждого студента осуществляется на основе иммунносетевого моделирования. Ил.: 1. Библиогр.: 21 назв.

Ключевые слова: дистанционное обучение; обучение инженеров; интеллектуальные технологии; иммунносетовое моделирование; лаборатории коллективного пользования.

Постановка проблемы. В настоящее время актуальной является проблема организации качественного инженерного образования с целью обучения специалистов современным наукоёмким технологиям на новейшем промышленном оборудовании. Как правило, высшее и послевузовское образование недоступно действующим специалистам, так как очная форма обучения не позволяет повышать квалификацию без отрыва от производства. Еще одной проблемой является географическая удаленность потенциальных студентов от высших учебных заведений, что существенно затрудняет обучение. В мировой практике используются различные формы организации процесса обучения, в том числе хорошо зарекомендовало себя дистанционное обучение (ДО). Данный вид обучения объединяет различные виды обучения с использованием современных информационных интеллектуальных технологий и позволяет дистанционно подключаться к лабораториям коллективного пользования для изучения современного дорогостоящего оборудования.

Анализ литературы. В настоящее время ведущие мировые

© Г.А. Самигулина, З.И. Самигулина, 2017

университеты такие как: Университет Южной Африки (University of South Africa), Британский Открытый Университет, Ферн Университет (Fern Universität in Hagen), Национальный Университет Дистанционного образования (National Distance Education University, UNED) в Испании, Балтийский университет (BU) и др. практикуют дистанционное обучение.

Опубликовано много статей по данной теме. Представлены исследования по внедрению дистанционного обучения в различных странах, таких как Россия, Австралия, Турция, Саудовская Аравия и проведен сравнительный анализ эффективности использования ДО в работах [1, 2]. Работа [3] посвящена разработке специальных методик использования различных симуляторов в ДО. В статье [4] предлагаются современные подходы искусственного интеллекта (ИИ) и когнитивные технологии для улучшения традиционных методов преподавания в онлайн режиме. В работе [5] представлены новейшие разработки в области ДО, в которых с успехом используются онтологические модели, рассматривается создание виртуальных лабораторий и т.д. Помимо обучающих технологий в настоящее время ведутся разработки дистанционных образовательных сред для доступа к лабораториям коллективного пользования. В работе [6] описана экспериментальная система, позволяющая студентам проводить дистанционные исследования на фотоэлектрическом модуле. Широко используются следующие подходы ИИ: нейронные сети (НС) [7, 8], генетические алгоритмы (ГА) [9, 10], искусственные иммунные системы (ИИС) [11] и др.

Актуально дистанционное обучение людей с ограниченными возможностями, особенно по зрению. Люди с ограниченными возможностями зрения (ЛОВЗ) нуждаются в адаптации к обучающей среде с помощью специального программного обеспечения и создания новых принципов функционирования ДО [12]. Исследования [13, 14] посвящены разработке smart-системы ДО на основе применения совокупности интеллектуальных и статистических методов для обработки многомерных данных при учете психофизиологических особенностей восприятия и осознания обучающей информации людьми с ограниченными возможностями зрения.

В настоящее время разработано огромное количество образовательных платформ, которые предлагают свои курсы ДО, такие как: Coursera, EDX; Udacity; Open Yale Courses; Teamtreehouse и т.д. Организация ДО осуществляется в среде Интернет с использованием специального программного обеспечения (оболочек). Наиболее распространенными оболочками являются: Sharepointlms, JoomlaLMS, OpenNet и MOODLE (Modular Object-Oriented Dynamic Learning

Environment). За счет открытого программного кода MOODLE получила широкую известность, система переведена на более чем 75 языков и используется почти в 50 тысячах организаций из 200 стран мира.

Таким образом, для решения проблемы подготовки высококвалифицированных инженерных кадров и организации дистанционных курсов повышения квалификации актуально использование подходов ИИ, которые применяются при обработке персональных данных обучающихся, составлении индивидуальных планов обучения, обработке многомерных данных, прогнозе результатов и оперативной корректировке процесса получения знаний.

Цель статьи – исследования в области разработки инновационной интеллектуальной системы дистанционного обучения специалистов технических специальностей (инженеров) с использованием современного дорогостоящего оборудования в лабораториях коллективного пользования на основе искусственных иммунных систем.

Интеллектуальная система дистанционного обучения и обработка персональных данных обучающихся на основе ИИС. В связи с тем, что система ДО во многом является автоматизированным автономным ресурсом целесообразно использование современных интеллектуальных подходов создания индивидуальной траектории и оперативной корректировки учебного процесса. Разработана интеллектуальная система дистанционного обучения (ИСДО) на основе искусственных иммунных систем [15 – 17].

Далее рассмотрим более детально алгоритм 1 обработки персональных данных студентов на основе иммунносетевой технологии.

Алгоритм 1:

1. Тестирование и определение персональных данных. Осуществляется базовое тестирование обучающихся по изучаемым дисциплинам с использованием когнитивных технологий. Формируется психологический портрет обучающихся с набором персональных характеристик, начиная от способности восприятия информации, до наличия базовых знаний по изучаемой дисциплине. На основе результатов тестирования определяются индивидуальные признаки (ИП) каждого обучающегося.

2. База данных и база знаний. Далее формируется база данных на основе ИП студентов и с помощью экспертов создаются базы знаний.

3. Предобработка данных. Информация в базах данных ИП представлена в виде временных рядов и может иметь избыточный характер, поэтому перед началом анализа данных проводится ее предварительная обработка с помощью различных методов. Для выделения информативных признаков используется

мультиалгоритмический подход [17], в основе которого лежит идея применения различных методов ИИ. С помощью нейронных сетей и программного обеспечения NeuroShell можно выделить показатель относительной меры важности параметра в общей совокупности данных. Применяя алгоритм RANDOM FOREST в среде RStudio можно ранжировать признаки по степени значимости. Также возможно использование методов роевого интеллекта [18]. Выбирается тот метод ИИ, который дает минимальную ошибку обобщения при иммунносетевом моделировании.

4. *Оптимальная структура иммунной сети.* Здесь осуществляется построение оптимальной структуры иммунной сети по весовым коэффициентам информативных признаков, а также производится редукция малоинформативных признаков.

5. *Классификация студентов.* Далее осуществляется классификация обучающихся по уровням знаний, практическим навыкам, творческим способностям, логическому мышлению на основе мнений экспертов, а также определяется требуемый инженерный профиль обучения.

6. *Распознавание образов на основе иммунносетевого моделирования.* Осуществляется формирование матриц эталонов (антигенов) $\mathfrak{R} = \{\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_K\}$, где K – это количество классов, для каждого класса по информативным признакам обучающихся формируются матрицы с оптимальной структурой, выполняется сингулярное разложение данных матриц и определение правых и левых сингулярных векторов: $\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\}, \dots, \{x_n, y_n\}$, где n – количество матриц эталонов [19 – 21]. Производится обучение системы по эталонам с помощью учителя. Далее формируются матрицы образов (антигены) по индивидуальным признакам обучающихся: $\mathfrak{Z} = \{\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \dots, \mathfrak{Z}_n\}$, где n – количество образов. Рассчитывается значение минимальной энергии связи между формальными пептидами (антигенами и антителами) и решается задача распознавания образов: $\varpi_1 = -x_1^T \mathfrak{Z}_1 y_1, \varpi_2 = -x_2^T \mathfrak{Z}_2 y_2,$

$\varpi_n = -x_n^T \mathfrak{Z}_n y_n$. Минимальное значение ϖ показывает класс, к которому принадлежит данный образ: $K: \varpi_n = \min \{\varpi_1, \varpi_2, \varpi_r\}$. Затем осуществляется оценка энергетических погрешностей [17]. В качестве технической реализации используется авторское программное обеспечение в пакете прикладных программ MATLAB [16].

7. *Принятие решений и построение индивидуального плана обучения.* После обработки персональных данных обучающихся осуществляется комплексная оценка знаний, группировка обучающихся по классам, прогноз качества получаемого образования каждым

обучающимся и оперативное управление процессом дистанционного обучения в среде Интернет. Осуществляется построение индивидуального плана обучения студента на базе комбинирования готовых моделей дисциплин.

Структурная схема интеллектуальной информационной системы дистанционного обучения приведена на рис. 1.

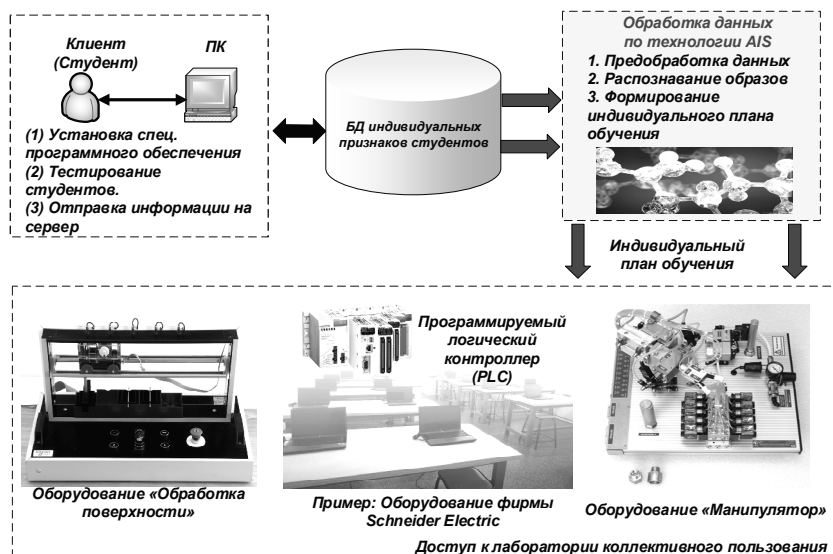


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной информационной системы ДО

Доступ к лаборатории коллективного пользования. Интеллектуальная информационная система ДО подключается к лаборатории коллективного пользования "Казахстанско-Французского образовательного центра (КазФЭЦ)" при КазНУТУ им. К.И. Сатпаева. В данной лаборатории представлено современное промышленное оборудование на основе микропроцессорной техники фирмы Schneider Electric. Программное обеспечение (ПО) и оборудование располагает возможностями организации ДО через OPC сервер для считывания данных с реального контроллера. Использование ПО Unity Pro L и OPC Factory Server позволяют организовывать работу в режиме симулятора.

Симулятор программы *Unity Pro L* позволяет осуществлять поиск ошибок в проекте без связи с реальным программируемым логическим контроллером (ПЛК). Все задачи проекта (*Mast*, *Fast*, *AUX* и *Event*), которые выполняются на настоящем ПЛК, также доступны в симуляторе. Наряду с программой *Unity Pro L* программа *OPC Factory Server (OFS)* также может функционировать в режиме симулятора. Существует три варианта доступа к серверу *OPC*: чисто в локальном режиме, доступ через классическую настройку *DCOM* сети, доступ через *INTERNET*

интерфейс HTTP. Используется модель "клиент – сервер". При дистанционном обучении через сервер OPC с реальным оборудованием предлагается следующий алгоритм 2, в котором описан доступ к лаборатории коллективного пользования на базе КазФЭЦ.

Алгоритм 2:

1. Клиент получает доступ к серверу, который связан с базой данных.
2. Загружается специальное программное обеспечение и клиент получает определенное задание для выполнения на свой компьютер.
3. Осуществляется настройка симуляторов.
4. Клиентом выполняется задание в режиме симулятора.
5. Осуществляется тестирование выполненного задания.
6. В случае правильного выполнения упражнений клиент получает доступ к реальному оборудованию через INTERNET для тестирования своей программы в режиме стандартного соединения.

Выводы. Предложенная технология открывает широкий спектр возможностей по организации многостороннего информационного обмена между интеллектуальной системой ДО на основе ИИС и реальным дорогостоящим оборудованием в лабораториях коллективного пользования. Обучающиеся различных целевых групп, в том числе и действующие сотрудники предприятий, имеют возможность ДО без отрыва от производства. Анализ персональных данных с помощью ИИС позволяет составить индивидуальную траекторию обучения на основе модульных образовательных курсов. Удаленный доступ к современному оборудованию дает возможность получения уникальных практических навыков, необходимых для качественного профессионального обучения в режиме реального времени.

Исследования проводятся по гранту № ГР 0215РК01472 КН МОН РК по теме: "Разработка информационной технологии, алгоритмов и программно-аппаратного обеспечения для интеллектуальных систем управления сложными объектами в условиях параметрической неопределенности" (2015 – 2017 гг.).

Список литературы: 1. *Zawacki-Richter O.* The Development of Distance Education Systems in Turkey, the Russian Federation and Saudi Arabia / *O. Zawacki-Richter, S. Bedenlier, U. Alturki, A. Aldraiweesh, D. Püplichhuysen* // *European Journal of Open, Distance and e-Learning.* – 2015. – № 18 (2). – P. 113-129. 2. *Zhang L.* Scale and scope economies of distance education in Australian universities / *L. Zhang, A.C. Worthington* // *Studies in Higher Education.* – 2016. – P. 14-17. 3. *Khan M.S.* Embodied head gesture and distance education / *M.S. Khan, S. Rahman* // *Proceedings 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences.* – 2015. – № 3. – P. 2034-2041. 4. *Vasilenko E.A.* The development of information-education materials for systems of distance learning: Protection of Intellectual Property, an example of a course of study / *E.A. Vasilenko, T.V. Meshcheryakova, E.M. Kol'tsova, E.A. Dikaya*

- // Scientific and Technical Information Processing. – 2011. – № 38 (3). – P. 193-200.
- 5.** *Różewski P.* Intelligent Open Learning Systems / *P. Różewski, E. Kusztna, R. Tadeusiewicz, O. Zaikin.* – 2011. – P. 87-92.
- 6.** *Axaopoulos P.J.* Photovoltaic engineering e-learning applications developed for remote laboratory experimentation systems / *P.J. Axaopoulos, E.D. Fylladitakis* // International Journal of Energy and Environmental Engineering. – 2014. – № 78 (5). – P. 1-10.
- 7.** *Luo Q.* Emotion Recognition in Modern Distant Education System by Using Neural Networks and SVM / *Q. Luo* // Applied Computing, Computer Science, and Advanced Communication. – 2009. – № 34. – P. 240-247.
- 8.** *Salsedo P.L.* Knowledge-Based Systems: A Tool for Distance Education / *P.L. Salsedo., M.A. Pinninghoff, R.A. Contreras* // Lecture Notes in Computer Science. – 2009. – № 5601. – P. 87-96.
- 9.** *Crespo R.M.* An Algorithm for Peer Review Matching Using Student Profiles Based on Fuzzy Classification and Genetic Algorithms / *R.M. Crespo, A. Pardo, J.P. Perez, C.D. Kloos* // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – № 3533. – P. 685-694.
- 10.** *Márquez-Vera C.* Predicting student failure at school using genetic programming and different data mining approaches with high dimensional and imbalanced data / *C. Márquez-Vera, A. Cano, C. Romero, S. Ventura* // Applied Intelligence. – 2013. – № 38 (3). – P. 315-330.
- 11.** *Samigulina G.A.* The Information System of Distance Learning for People with Impaired Vision on the Basis of Artificial Intelligence Approaches / *G.A. Samigulina, A.S. Shayakhmetova* // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2015. – № 41. – P. 255-263.
- 12.** *Samigulina G.A.* Intelligent System of Distance Education of Engineers, based on Modern innovative Technologies / *G.A. Samigulina, Z.I. Samigulina* // Proceedings of the II International Conference on Higher Education Advances, HEAd'16. Procedia-Social and Behavioral Sciences. – Valencia, Spain: Elsevier, 21-23 June 2016. – № 228. – P. 229-236.
- 13.** *Nikashina N.* Particular of development people with confined eyesight / *N. Nikashina* // Vector of science. – 2012. – Vol. 2 (9). – P. 223-226.
- 14.** *Samigulina G.A.* Smart-system of distance learning of visually impaired people based on approaches of artificial intelligence / *G.A. Samigulina, S.A. Shayakhmetova* // J. Open Engineering. – 2016. – № 6. – P. 359-366.
- 15.** *Самигулина Г.А.* Моделирование технологии дистанционного обучения на основе искусственных иммунных систем / *Г.А. Самигулина* // Информатика. – 2010. – № 4 (28). – P. 105-111.
- 16.** *Самигулина, Г.А.* Разработка интеллектуальной системы управления дистанционным образованием на основе иммунносетевого моделирования / *Г.А. Самигулина, З.И. Самигулина.* – Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права в Комитете по правам интеллектуальной собственности МЮ РК. – 2010. – № 1882. – 19 с.
- 17.** *Samigulina G.A.* Intellectual systems of forecasting and control of complex objects based on artificial immune systems / *G.A. Samigulina., Z.I. Samigulina.* – Science Book Publishing House. – 2014. – 189 p.
- 18.** *Олейник Ан.А.* Агентные технологии для отбора информативных признаков / *Ан.А. Олейник, Ал.А. Олейник, С.А. Субботин* // Кибернетика и системный анализ. – 2012. – № 2. – С. 113-125.
- 19.** *Tarakanov A.O.* Formal peptide as a basic of agent of immune networks: from natural prototype to mathematical theory and applications / *Tarakanov A.O.* // Proc. 1st Int. workshop of central and Eastern Europe on Multi-Agent Systems (CEEMAS'99). – 1999. – P. 281-292.
- 20.** *Tarakanov A.O.* Formal Immune Networks: Self-Organization and Real-World Applications / *A.O. Tarakanov, A.V. Borisova* // Advances in Applied Self-organizing Systems. – 2013. – P. 321-341.
- 21.** *Tarakanov A.* Foundations of immunocomputing / *A. Tarakanov, G. Nicosia* // In: Proceedings of the 1-st IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI'07). – 2007. – P. 503-508.

References

1. Zawacki-Richter, O., Bedenlier, S., Alturki U., Aldraiweesh, A., and Pülplichhuysen, D. (2015), "The Development of Distance Education Systems in Turkey, the Russian Federation and Saudi Arabia". *European Journal of Open, Distance and e-Learning*, No. 18 (2), pp. 113-129.
2. Zhang, L., and Worthington, A.C. (2016), "Scale and scope economies of distance education in Australian universities. Scale and scope economies of distance education in Australian universities". *Studies in Higher Education*, pp. 14-17.
3. Khan, M.S., and Rahman, S. (2015), "Embodied head gesture and distance education". *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences*, AHFE 2015, No. 3, pp. 2034-2041.
4. Vasilenko, E.A., Meshcheryakova, T.V., Koltsova, E.M., and Dikaya E.A. (2011), "The development of information-education materials for systems of distance learning: "Protection of Intellectual Property", an example of a course of study". *Scientific and Technical Information Processing*, No. 38 (3), pp. 193-200.
5. Różewski, P., Kusztna, E., Tadeusiewicz, R., and Zaikin, O. (2011), *Intelligent Open Learning Systems*, pp. 87-92.
6. Axaopoulos, P.J., and Fylladitakis, E.D. (2014), "Photovoltaic engineering e-learning applications developed for remote laboratory experimentation systems". *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, No. 78 (5), pp. 1-10.
7. Luo, Q. (2009). "Emotion Recognition in Modern Distant Education System by Using Neural Networks and SVM". *Applied Computing, Computer Science, and Advanced Communication*, No. 34, pp. 240-247.
8. Salsedo, P.L., Pinninghoff, M.A., and Contreras, R.A. (2009), "Knowledge-Based Systems: A Tool for Distance Education". *Lecture Notes in Computer Science*, No. 5601, pp. 87-96.
9. Crespo, R.M., Pardo, A., Perez, J.P., and Kloos, C.D. (2005), "An Algorithm for Peer Review Matching Using Student Profiles Based on Fuzzy Classification and Genetic Algorithms". *Lecture Notes in Computer Science*, No. 3533, pp. 685-694.
10. Márquez-Vera, C., Cano, A., Romero C., and Ventura, S. (2013), "Predicting student failure at school using genetic programming and different data mining approaches with high dimensional and imbalanced data". *Applied Intelligence*, No. 38 (3), pp. 315-330.
11. Samigulina, G., and Shayakhmetova, A. (2015), "The Information System of Distance Learning for People with Impaired Vision on the Basis of Artificial Intelligence Approaches". *Smart Innovation, Systems and Technologies*, No. 41, pp. 255-263.
12. Samigulina, G.A., and Samigulina, Z.I. (2016), "Intelligent System of Distance Education of Engineers, based on Modern innovative Technologies". In *Proc. of the II International Conference on Higher Education Advances*, HEAd'16. Procedia- Social and Behavioral Sciences. Valencia, Spain: Elsevier, No. 228, pp. 229-236.
13. Nikashina, N. (2012), "Particular of development people with confined eyesight". *Vector of science*. Vol. 2 (9), pp. 223-226.
14. Samigulina G.A., and Shayakhmetova A.S. (2016), "Smart-system of distance learning of visually impaired people based on approaches of artificial intelligence". *Journal Open Engineering*, No. 6, pp. 359-366.
15. Samigulina G.A. (2010), "Modeling of distance learning technology based on artificial immune systems". *Computer science*, No. 4 (28), pp. 105-111.
16. Samigulina G.A., and Samigulina, Z.I. (2010), "Development of an intelligent remote education management system based on immune-network modeling". Certificate of state registration of rights to the object of copyright In the Committee on Intellectual Property Rights MYu RK, No. 1882, 19 p.

17. Samigulina, G.A., and Samigulina, Z.I. (2014), "Intellectual systems of forecasting and control of complex objects based on artificial immune systems". *Science Book Publishing House*, 189 p.
18. Oleynik Ahn. And., Oleynik Al. And., and Subbotin S.A. (2012), *Agentny technologies for selection of informative signs. Cybernetics and system analysis*, No. 2, pp. 113-125.
19. Tarakanov, A.O. (1999), "Formal peptide as a basic of agent of immune networks: from natural prototype to mathematical theory and applications". *In Proc. 1st Int. workshop of central and Eastern Europe on Multi-Agent Systems (CEEMAS'99)*, pp. 281-292.
20. Tarakanov, A.O., and Borisova, A.V. (2013), "Formal Immune Networks: Self-Organization and Real-World Applications". *Advances in Applied Self-organizing Systems*, pp. 321-341.
21. Tarakanov, A., and Nicosia, G. (2007), "Foundations of immunocomputing". *In: Proceedings of the 1-st IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI'07)*, pp. 503-508.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Леонов С.Ю.

Поступила (received) 11.04.2017

Samigulina Galina, Dr. Sci. Tech,
Institute of Information and Computing Technologies,
Str. Pushkeen, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010,
Tel:+7(777)244-43-67, e-mail: galinasamigulina@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-1798-9161

Samigulina Zarina, Ph.D,
Institute of Information and Computing Technologies
Str. Pushkeen, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010,
Tel:+7(702)218-97-73, e-mail: zarinasamigulina@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-5862-6415

УДК 004.89:043

Дистанційне навчання інженерів на основі сучасних інноваційних інтелектуальних технологій / Самігуліна Г.А., Самігуліна З.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 166 – 175.

Дослідження присвячені розробці інноваційної інтелектуальної системи дистанційного навчання інженерів. У зв'язку з бурхливим розвитком техніки і нових технологій гостро стоїть проблема підготовки кваліфікованих інженерних кадрів. Перспективним напрямком є дистанційне навчання фахівців технічних спеціальностей на сучасному обладнанні в лабораторіях колективного користування. Обробка персональних даних учнів з метою вибору індивідуального плану навчання для кожного студента здійснюється на основі імунорежевого моделювання. Іл.: 1. Бібліогр.: 21 назв.

Ключові слова: навчання інженерів, дистанційне навчання; інтелектуальні технології; імуносетевое моделювання; лабораторії колективного користування.

УДК 004.89:043

Дистанционное обучение инженеров на основе современных инновационных интеллектуальных технологий / Самигулина Г.А., Самигулина З.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 166 – 175.

Исследования посвящены разработке инновационной интеллектуальной системы дистанционного обучения инженеров. В связи с бурным развитием техники и новых технологий остро стоит проблема подготовки квалифицированных инженерных кадров. Перспективным направлением является дистанционное обучение специалистов технических специальностей на современном оборудовании в лабораториях коллективного пользования. Обработка персональных данных обучающихся с целью выбора индивидуального плана обучения для каждого студента осуществляется на основе иммунорежевого моделирования. Ил.: 1. Библиогр.: 21 назв.

Ключевые слова: обучение инженеров; дистанционное обучение; интеллектуальные технологии; иммуносетевое моделирование; лаборатории коллективного пользования.

УДК 004.89:043

Distance education of the engineers on the basis of the modern innovative intellectual technologies / Samigulina G.A., Samigulina Z.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – № 21 (1243). – P. 166 – 175.

The research is devoted to the development of an innovative intelligent distance education system for engineers. Due to the rapid development of the technology and new technologies acute problem of the training qualified engineering staff. Promising direction is the remote training of the technical specialties specialists on the basis of modern equipment in the laboratories for common use. Processing of the student's personal data with the purpose of choosing an individual education plan for each student realize on the basis of immune net modeling. Figs.: 1. Refs.: 21 titles.

Keywords: education system for engineers; distance education; intellectual technologies; immune net modeling; laboratories for common use.

ЗМІСТ

<i>Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах</i>	3
---	---

Математические методы и модели

<i>Антонова И.В., Чикина Н.А.</i> Применение характеристик квазициклов фазовых портретов в предпрогножном анализе временных рядов	5
<i>Sağlam Doğan, Sevim Barış</i> The effects of lead rubber bearing (LRB) systems on the earthquake response of high-rise building	14
<i>Базілевич К.О., Мазорчук М.С., Парфенюк Ю.Л.</i> Моделювання фінансових потоків недержавного пенсійного фонду для групи учасників з урахуванням їх платоспроможності	28
<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Главчев Д.М.</i> Линеаризация математической модели, описывающей процессы управления подвижным составом, методами дифференциальной геометрии	38
<i>Ерохин А.Л., Леднёв С.Н.</i> Методы распознавания жестов на основе данных трехосевых акселерометров Android устройств	54
<i>Иванов Д.Е.</i> Алгоритм моделирования отжига оценки пикового рассеивания тепла цифровых схем	65
<i>Кузьмин В.В., Носков В.И., Шпащенко В.С., Гейко Г.В.</i> Анализ гармонического состава напряжения синхронных генераторов	81
<i>Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Тавровский И.И.</i> Матричные неравенства в синтезе управления ростовыми установками	92
<i>Tikhonov V.I.</i> Generalized fourier transforms based on quantum uncertainty principle	103
<i>Шпакович Ю.С., Жемчужкина Т.В., Носова Т.В.</i> К вопросу о применимости методов анализа электромиографических сигналов	117

Новые информационные технологии в медицине и биологии

<i>Мукановская И.В., Дацок О.М., Величко О.Н.</i> Способ получения сигнала в искусственном голосовом аппарате	125
<i>Навроцька К.С., Штофель Д.Х., Костішин С.В., Макогон В.І.</i> Адаптивний алгоритм тестування для оцінювання когнітивних функцій людини	135

Файнзильберг Л.С., Ориховская К.Б. Новый подход к обнаружению эффекта электрической альтернации сердца по одноканальной электрокардиограмме 144

Проблемы защиты информации в современных системах

Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р., Миронов М.В. Анализ эффективности моделей аутентификации пользователя на основе клавиатурного почерка 153

Обучение на основе интеллектуальных технологий

Самигулина Г.А., Самигулина З.И. Дистанционное обучение инженеров на основе современных инновационных интеллектуальных технологий 166

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць
Серія
Інформатика та моделювання
№ 21 (1243)

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор д.т.н. Леонов С.Ю.
Відповідальний за випуск к.т.н. Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2, НТУ "ХПІ".
Кафедра обчислювальної техніки та програмування,
тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Обл. вид. № 14 – 17

Підп. до друку 05.06.2017 р. Формат 70х100/16. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік. вид. арк. 10,0.
Наклад 300 прим.
Ціна договірна

НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2,

Видавничий центр НТУ "ХПІ"
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Виготовлено у ТОВ ВПП "Контраст".
Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 40, оф. 221.
Св-во: ДК №1778 від 05.05.2004