

ми словами. Це полегшує реалізацію процесу управління комерційним контентом.

2 МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ КОМЕРЦІЙНИМ КОНТЕНТОМ

Завдання підсистеми управління контентом: формування, ротація баз даних і забезпечення доступу до неї; формування оперативних і ретроспективних баз даних; персоналізація роботи користувачів, збереження персональних запитів користувачів і джерел, ведення статистики роботи; забезпечення пошуку в базах даних; генерація вихідних форм; інформаційна взаємодія з іншими базами даних; формування інформаційного ресурсу.

Процес управління контентом описано функцією вигляду

$$z_w = Management(q_d, c_r, h_k, t_p), \quad (22)$$

де $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n_z}\}$ – множина інформаційних ресурсів, $Management$ – оператор управління комерційним контентом, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_c}\}$ – множина комерційного контенту, $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{n_q}\}$ – множина запитів користувачів, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_t}\}$ – час транзакцій управління контентом, множина комерційного контенту, h_k – множина умов управління контентом, тобто $h_k = \{h_1(x_i, q_d), \dots, h_{n_H}(x_i, q_d)\}$.

На рис. 2 подана класифікація моделей управління комерційним контентом.

Управління контентом подано як

$$c_j = \left\{ \bigcup_{m_k} \left((q_i \in Q) \wedge (\exists u_{m_k} \in U_M) \right), U_M = U_{M_q} \vee U_{Fq}, i = \overline{1, m}, k = \overline{1, n} \right\}. \quad (23)$$

1. **Генерація сторінок за запитом** реалізується відношенням

Модератор → *редагування контенту* → *база даних* → *подання контенту* → *інформаційний ресурс*.

Формальна модель етапу генерації сторінок за запитом подано як

$$Management_Q = \langle X, H, C, Q, Presentation, Edit, T, Z \rangle, \quad (24)$$

де $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_x}\}$ – множина вхідних даних; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_c}\}$ – множина контенту;



Рис. 2. Особливості підсистеми управління комерційним контентом

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n_z}\}$ – множина сформованих сторінок; $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{n_q}\}$ – множина запитів; $Presentation$ – оператор формування та подання сторінки; $Edit$ – оператор редагування та модифікації контенту; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_t}\}$ – час транзакцій управління контентом; $h_k = \{h_1(x_i, q_d), \dots, h_{n_H}(x_i, q_d)\}$ – множина умов управління контентом.

Етап редагування та модифікації контенту подано функцією вигляду

$$c_j(x_i, t_r) = Edit(c_j, x_i, t_r). \quad (25)$$

Етап формування множини сторінок описано функцією вигляду

$$Z(t_r + \Delta t) = Presentation(q_i, C, Weight(C), t_r, \Delta t), \quad (26)$$

де $Weight(C)$ – загальна вага контентного блоку, тобто

$$z_i = \left\{ \bigcup c_j \left((\forall c_j \in C_q) \wedge (\exists q_i \in C_q) \right), C = C_q \vee C_{\bar{q}}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n} \right\}. \quad (27)$$

Вагу блоку визначають як суму коефіцієнтів, які характеризують контент:

$$\Delta c = \|C\| = Weight(C, Location, KeyWords, Static, Addterm, Preferences), \quad (28)$$

де $Location(c_j)$ – коефіцієнт розташування блоку у контенті, $KeyWords(c_j)$ – коефіцієнт ключових слів в блоці, $Static(c_j)$ – коефіцієнт статистичної важливості термів, $Addterm(c_j)$ – коефіцієнт наявності додаткових термів, $Preferences(c_j)$ – коефіцієнт наявності та обсягу термів із запиту користувача [7–8].

2. **Генерація сторінок при редагуванні** полягає у створенні набору статичних сторінок при внесенні змін до контенту інформаційного ресурсу, тобто

Модератор → *редагування контенту (інформаційного ресурсу)* → *база даних* → *інформаційний ресурс*.

В моделі не враховується інтерактивність між відвідувачем і ресурсом.

Формальна модель етапу генерації сторінок при редагуванні має вигляд

$$Management_E = \langle C, H, Edit, T, Z \rangle, \quad (29)$$

де $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_c}\}$ – множина контенту;

$h_k = \{h_1, h_2, \dots, h_{n_H}\}$ – множина умов управління контентом, $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n_z}\}$ – множина статичних сторінок; $Edit$ – оператор редагування/модифікації контенту інформаційного ресурсу.

Етап формування сторінок описано оператором вигляду

$$Z(t) = Edit(C, Weight, H, t). \quad (30)$$

3. **Змішаний тип** поєднує в собі переваги перших двох типів:

Модератор → *редагування контенту* → *база даних* → *збирання блоків* → *кеш* → *подання контенту* → *інформаційний ресурс*.

Формальна модель етапу управління контентом подано як

$$Management_M = \langle X, C, Q, H, Presentation, Edit, Caching, T, Z \rangle, \quad (31)$$

де $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_X}\}$ – множина вхідних даних;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_C}\}$ – множина контенту;

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n_Z}\}$ – множина сформованих сторінок;

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{n_Q}\}$ – множина запитів;

$h_k = \{h_1(x_i, q_d), \dots, h_{n_H}(x_i, q_d)\}$ – множина умов управління контентом, *Presentation* – оператор формування та подання сторінки; *Edit* – оператор редагування та модифікації контенту; *Caching* – оператор формування кешу або інформаційних блоків, де кеш

$$Cache = Caching(Z, Weight, t, \Delta t), \quad (32)$$

тобто

$$Cache = \left\{ \bigcup z_i \mid z_i \in Z, t = t + \Delta t, i = \overline{1, n} \right\}. \quad (33)$$

Підсистема управління комерційним контентом реалізована шляхом кешування (підсистема подання генерує сторінку один раз, надалі вона в декілька разів швидше завантажується з кешу, який оновлюється автоматично по закінченню деякого терміну часу або при внесенні змін до певних розділів інформаційного ресурсу, або вручну по команді адміністратора) або формуванням інформаційних блоків (збереження блоків на етапі редагування інформаційного ресурсу і збирання сторінки з цих блоків при запиті відповідної сторінки користувачем).

3 МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУПРОВОДУ КОМЕРЦІЙНОГО КОНТЕНТУ

Підсистема супроводу контенту забезпечує формування інформаційних портретів; виявлення тематичних сюжетів контенту; побудову таблиць взаємозв'язку контенту; розрахунок рейтингів контенту, виявлення нових подій в контентних потоках, їхнє відстеження й кластеризацію.

Підсистема супроводу контенту *Support* описана як

$$y(t_p + \Delta t) = Support(v_l, h_k, c_r, z_w, t_p, \Delta t), \quad (34)$$

де v_l – множина умов супроводу контенту та зовнішніх впливів середовища на систему, тобто $v_l = (v_1(q_i, t_p), \dots, v_{n_V}(q_i, t_p))$. Вихідна інформація реалізована як

$$y_j = \left\{ \bigcup_l v_l \mid (q_d \in X) \wedge (\exists v_l \in V), V = V_{q_d} \vee V_{q_d}^-, d = \overline{1, m}, l = \overline{1, n} \right\}. \quad (35)$$

Формальна модель супроводу комерційного контенту має вигляд

$$Support = \left\langle X, Q, C, H, V, T, BuInfPort, IdThemTop, ConCorrTablConc, CalRankConc, Z, Y \right\rangle, \quad (36)$$

де величини моделі подані в табл. 4.

Множина комерційного контенту C подано як

$$C = \langle C_P, C_T, C_C, C_R \rangle, \quad (37)$$

де C_P – підмножина інформаційних портретів, C_T – підмножина тематичних сюжетів комерційного контенту, C_C – підмножина таблиць взаємозв'язку комерційного контенту, C_R – підмножина рейтингів комерційного контенту.

Таблиця 4. Величини моделі супроводу комерційного контенту

Назва	Позначення	Діапазон	Множина
Вхідні дані від модераторів/користувачів	$x_i \in X$	$i = \overline{1, n_X}$	$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_X}\}$
Множина запитів користувачів	$q_d \in Q$	$d = \overline{1, n_Q}$	$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{n_Q}\}$
Множина комерційного контенту	$c_r \in C$	$r = \overline{1, n_C}$	$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_C}\}$
Оператор формування портретів	<i>BuInfPort</i>	–	–
Оператор виявлення тематичних сюжетів	<i>IdThemTop</i>	–	–
Оператор побудови взаємозв'язку контенту	<i>ConCorrTablConc</i>	–	–
Оператор розрахунку рейтингів контенту	<i>CalRankConc</i>	–	–
Множина внутрішніх параметрів системи	$h_k \in H$	$k = \overline{1, n_H}$	$H = \{h_1, h_2, \dots, h_{n_H}\}$
Множина параметрів впливу середовища	$v_l \in V$	$l = \overline{1, n_V}$	$V = \{v_1, v_2, \dots, v_{n_V}\}$
Множина сторінок інформаційного ресурсу	$z_w \in Z$	$z = \overline{1, n_Z}$	$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n_Z}\}$
Час транзакції опрацювання ресурсів	$t_p \in T$	$p = \overline{1, n_T}$	$T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_T}\}$
Множина статистичних даних роботи системи	$y_j \in Y$	$j = \overline{1, n_Y}$	$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n_Y}\}$

Множина інформаційних портретів C_P подано як

$$C_P = BuInfPortr(X, U_P, C_P), \quad (38)$$

де U_P – множина умов формування інформаційних портретів, $BuInfPortr$ – оператор формування інформаційних портретів.

Множина тематичних сюжетів комерційного контенту C_T подано як

$$C_T = IdThemTop(X, C_T, U_T), \quad (39)$$

де U_T – множина умов виявлення тематичних сюжетів комерційного контенту, $IdThemTop$ – оператор визначення тематичних сюжетів комерційного контенту C_T .

Множина таблиць взаємозв'язку комерційного контенту C_C подано як

$$C_C = ConCorrTablConc(C, U_C), \quad (40)$$

де U_C – множина умов побудови таблиць взаємозв'язку комерційного контенту, $ConCorrTablConc$ – оператор побудови таблиць взаємозв'язку комерційного контенту.

Множина рейтингів комерційного контенту C_R подано як

$$C_R = CalRankConc(C_C, Tonality, U_R, Spam), \quad (41)$$

де U_R – множина параметрів розрахунку рейтингів комерційного контенту, $Tonality$ – критерій тональності контенту, $Spam$ – функція визначення спаму, $CalRankConc$ – оператор визначення рейтингів комерційного контенту C_R .

Множина вихідних статистичних даних Y подано як

$$Y = Support(C) = Support(C_P, C_T, C_C, C_R), \quad (42)$$

де C_P – підмножина інформаційних портретів, C_T – підмножина тематичних сюжетів комерційного контенту, C_C – підмножина таблиць взаємозв'язку комерційного контенту, C_R – підмножина рейтингів комерційного контенту, $Support$ – оператор супроводу комерційного контенту.

Модель СЕКК є універсальною та простою для опису процесу функціонування типових систем. Моделі процесів опрацювання інформаційних ресурсів дають змогу уніфікувати основні функції системи як формування, управління та реалізація контенту. На основі розроблених моделей, зокрема, розв'язують задачі побудови типової архітектури систем електронної контент-комерції, формують специфікацію функціональних та нефункціо-

нальних вимог щодо СЕКК та їх складових таких як засоби взаємодії з кінцевим користувачем, реалізують процедури аналізу контенту та збору і опрацювання статистичних даних відвідування інформаційних ресурсів. Моделі процесів формування, управління та реалізація контенту дають змогу спростити процеси проектування СЕКК шляхом уніфікації та стандартизації методів опрацювання інформаційних ресурсів.

ВИСНОВКИ

У статті вибрано підходи та моделі послідовності опрацювання інформаційних ресурсів в системах електронної контент-комерції для проектування та створення таких систем, що дало змогу виділити основні закономірності переходу від процесів формування комерційного контенту до його супроводу. Побудовано формальну модель систем електронної комерції для реалізації етапів життєвого циклу комерційного контенту, що дало змогу визначити основні компоненти системи електронної контент-комерції та їх зв'язки між собою.

Розроблено формальні моделі опрацювання інформаційних ресурсів в системах електронної контент-комерції для реалізації формування, управління та супроводу комерційного контенту, що дало змогу створити узагальнену архітектуру системи електронної контент-комерції. Розроблено узагальнену архітектуру системи електронної контент-комерції для спрощення етапів розроблення таких систем, що дало змогу реалізувати процеси формування, управління та супроводу комерційного контенту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Береза, А. Електронна комерція / А. Береза, І. Козак, Ф. Левченко. – К. : КНЕУ, 2002. – 326 с.
2. Берко, А. Системи електронної контент-комерції / А. Берко, В. Висоцька, В. Пасічник. – Л. : НУЛП, 2009. – 612 с.
3. Советов, Б. Моделирование систем / Б. Советов, С. Яковлев. – М. : ВШ, 1998. – 319 с.
4. Клифтон, Б. Google Analytics: профессиональный анализ посещаемости веб-сайтов / Б. Клифтон. – М. : Вильямс, 2009. – 400 с.
5. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика / [Е. Большакова, Д. Ландэ, А. Носков и др.]. – М. : МИЭМ, 2011. – 272 с.
6. Брайчевский, С. Современные информационные потоки / С. Брайчевский, Д. Ландэ // Научно-техническая информация. – 2005. – № 11. – С. 21–33.
7. Корнеев, В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В. Корнеев, А. Гареев, С. Васютин, В. Райх. – М. : Нолидж, 2000. – 352 с.
8. Основы моделирования и оценки электронных информационных потоков / [Ландэ Д., Фурашев В., Брайчевский С., Григорьев О.]. – К. : Інжиніринг, 2006. – 348 с.
9. Ландэ, Д. Основы интеграции информационных потоков: монография / Д. Ландэ. – К. : Інжиніринг, 2006. – 240 с.
10. Математична лінгвістика / [Висоцька В., Пасічник В., Щербина Ю., Шестакевич Т.] – Л. : «Новий Світ-2000», 2012. – 359 с.

11. Федорчук, А. Г. Контент-мониторинг информационных потоков [Электронный ресурс] / А. Г. Федорчук // Б-ки Нац. акад. наук: пробл. функционирования, тенденции развития. – К.,

2005. – Вып. 3. – Режим доступа: <http://www.nbuv.gov.ua/articles/2005/05fagmip.html>. – Загол. с экрана.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2013.
Після доробки 07.03.2014.

Высоцкая В. А.¹, Чирун Л. В.²

¹Ассистент, Национальный университет «Львовская политехника», Украина

²Канд. техн. наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника», Украина

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНТЕНТ-КОММЕРЦИИ

В статье предложена формальная модель системы электронной контент-коммерции и формальные модели обработки информационных ресурсов. Описана разработанная общая архитектура систем электронной контент-коммерции для облегчения этапов реализации жизненного цикла коммерческого контента. Предложенные общие принципы проектирования архитектуры систем электронной контент-коммерции дают возможность реализовывать процесс обработки информационных ресурсов для сокращения цикла производства, экономии времени и расширения возможностей ведения электронной коммерции.

Ключевые слова: информационный ресурс, коммерческий контент, контент-анализ, контент-мониторинг, контентный поиск, система электронной контент-коммерции.

Vysotska V.¹, Chyrun L.²

¹Assistant, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine

²Ph.D, Associate Professor, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine

CONCEPTUAL MODEL OF ELECTRONIC CONTENT COMMERCE SYSTEMS

The given article is devoted to the development of standardized methods and software of Web content processing in e-business systems. The model of electronic content commerce systems is developed. The article is devoted to the development of unified methods and software tools for processing information resources in the electronic content commerce systems. A new detailed classification of electronic commerce systems and electronic content commerce systems is proposed. A formal model and generalized typical architecture of electronic content commerce systems are declared. Architecture and models of electronic content commerce systems are built. A new approach to application and implementation of business processes is formulated for the construction of systems of electronic content commerce. A complex method of content forming, the operational method of content management and complex method of content support are developed. Software tools of content formation, management and support are developed. Methods of designing and implementation of electronic content commerce systems on the example of online newspapers, which reflects the results of theoretical research, are developed.

Keywords: information resources, commercial content, content analysis, content monitoring, content search, electronic content commerce systems.

REFERENCES

- Bereza A., Kozak I., Levchenko F. Elektronna komertsiya. Kiev, KNEU, 2002, 326 p.
- Berko A., Vysotska V., Pasichnyk V. Systemy elektronnoyi kontent-komertsyi. Leningrad, NULP, 2009, 612 p.
- Sovetov B., Yakovlev S. Modelirovanie sistem. Moscow, VS, 1998.
- Clifton B. Google Analytics: professionalny analiz poseschaemosti web-saytov. Moscow, Vilyams, 2009, 400 p.
- Bolshakova E., Lande D., Noskov A., Klyshinsky E., Peskova O., Yagunova E. Avtomaticheskaya obrabotka tekstov na estestvennom yazyke i kompyuternaya lingvistika. Moscow, MIEM 2011, 272 p.
- Braychevsky S., Lande D. Sovremennye informatsionnye potoki, *Nauchno-tehnicheskaya informatsiya*, 2005, No. 11, pp. 21–33.
- Korneev V., Gareev A., Vasyutin S., Freiham V. Bazy dannyh. Intellektualnaya obrabotka informatsii. Moscow, Nolidzh, 2000, 352 p.
- Lande D., Furashev V., Braychevsky S., Grigorev O. Osnovy modelirovaniya i otsenki elektronnyh informatsionnyh potokov. Kiev, Inzhiniring, 2006, 348 p.
- Lande D. Osnovy integratsii informatsionnyh potokov: monografiya. Kiev, Inzhiniring, 2006, 240 p.
- Pasichnyk V., Pasichnyk V., Scherbyna J., Shestakevych T. Matematychna linhvistyka / V. Vysotska, V. Pasichnyk, J. Scherbyna, T. Shestakevych. Leningrad, Novyy Svit-2000, 2012, 359 p.
- Fedorchuk A. G. Kontent-monitoring informatsionnyh potokov, B-ky nats. akad. nauk: probl. funktsionirovaniya, tendentsii razvitiya, Kyiv, 2005, No. 3, Mode of access: <http://www.nbuv.gov.ua/articles/2005/05fagmip.html>

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОИСКА ГРАФ-ПОДГРАФ ИЗОМОРФИЗМА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ОРГАНИЗАЦИИ

В работе представлен граф-аналитический подход к распределению ресурсов организации. Он основан на алгоритме поиска граф-подграф изоморфизма для взвешенных и помеченных графов и является развитием алгоритма поиска граф-подграф изоморфизма для взвешенных графов.

Ключевые слова: резервирование ресурсов, граф-подграф изоморфизм, взвешенные графы, помеченные графы, граф-аналитический подход.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс разработки программного обеспечения при создании сложных систем осуществляется в кооперации участников, включающей в себя непосредственно сотрудников организации, закрепленных за определенными отделами, сторонних организаций-подрядчиков и партнеров, консультантов, обслуживающих организации. Эти участники, как правило, распределены географически (представительства в нескольких городах, работа с удаленными партнерами) и во времени, поскольку цикл разработки современного комплексного программного обеспечения достаточно длительный.

Перспективным направлением оптимизации работы подобных сложных организационных структур является создание распределенной компьютерной системы поддержки производственных процессов, выделения и распределения ресурсов организации для решения каждого из этапов производственного процесса, многие из которых выполняются повторно в силу итерационного характера процессов разработки программного обеспечения.

Разработка подобной системы распределения ресурсов организации позволит, прежде всего, сократить время и стоимость взаимодействия между участниками производственного процесса, совместно использовать аппаратные, информационные и программные ресурсы организации, а так же систематизировать и упорядочить управленческие действия, направленные на нахождение и выделение разнородных ресурсов в рамках организации для решения формируемых руководством организации задач.

В данной статье рассматривается граф-аналитический подход для поиска комплексного набора ресурсов организации, предоставляемых участникам кооперации для обеспечения необходимых производственных процессов. Этот подход является одним из перспективных направлений резервирования ресурсов различных типов [1, 2], уже доказавший свою эффективность при решении задач большой размерности [3].

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в рамках организации необходимо осуществить один из подпроцессов, для которого необходим определенный набор человеческих, аппаратных и программных ресурсов.

Временная и пространственная распределенность участников производственного процесса, большое количество участников подразумевают неоднородную, структурированную организацию ресурсов. Задача состоит в поиске необходимого набора ресурсов организации, как человеческих, так и программно-аппаратных.

Представим организацию, как граф, вершинами которого являются имеющиеся в наличии ресурсы, а ребра графа отражают возможность совместного их использования.

Эта возможность может выражаться, например, в правах доступа к серверам или базам данных со стороны конкретного участника организации или права удаленного доступа к локальным ресурсам организации, наличие возможности прямого взаимодействия между участниками процесса и другие подобные отношения доступности и взаимосвязанности ресурсов.

В этом случае каждая вершина графа организации будет помечена и взвешена, где метка отражает тип ресурсов, описываемых вершиной графа (например, наличие установленного специфического программного обеспечения на компьютерной станции), а набор приписанных весов отражает объективные числовые характеристики ресурсов (объем оперативной памяти, размер дискового пространства, число вычислительных узлов и т. п.).

Введем также второй граф, который будет представлять описание ресурсов, необходимых для выполнения технологического процесса. Для описания ресурсов в этом графе будем использовать ту же нотацию, что и для графа ресурсов организации, т. е. вершины описывают отдельные типы необходимых ресурсов, метки вершин - тип ресурса, набор весов - числовые характеристики ресурсов, ребра между вершинами - потребность в совместном использовании различных ресурсов.

При таком однородном описании ресурсов организации и потребности в ресурсах со стороны участников производственного процесса становится возможной постановка задачи поиска необходимого набора ресурсов как поиск граф-подграф изоморфизма на взвешенных и помеченных графах.

2 АЛГОРИТМ УСТАНОВЛЕНИЯ ГРАФ-ПОДГРАФ ИЗОМОРФИЗМА ДЛЯ ГРАФОВ ВЗВЕШЕННЫХ И ПОМЕЧЕННЫХ ПО ВЕРШИНАМ

Постановка задачи установления граф-подграф изоморфизма для помеченных графов. Пусть даны графы $G_1 = (V_1, E_1, L_1, R_1)$ и $G_2 = (V_2, E_2, L_2, R_2)$, где V – множество вершин графа, E – множество ребер графа, L – метки, приписанные вершинам графов и R – набор весов, приписанных вершинам графов. Граф G_1 изоморфен подграфу графа G_2 (обозначается, как $G_1 \cong S_2 \subseteq G_2$), если существует подстановка $\varphi: V_2 \rightarrow V_1$, такая, что для каждой пары вершин $v_i, v_j \in V_2$, если $(v_i, v_j) \in E_2$, то $(\varphi(v_i), \varphi(v_j)) \in E_1$ и для всех $l_i \in L_2$ выполняется $l_i \in L_2 = \varphi(l_i) \in L_1$ и для всех $r_i \in R_2$ выполняется $r_i \leq \varphi(r_i)$, где $\varphi(r_i) \in R_1$.

Алгоритм установления граф-подграф изоморфизма для взвешенных и помеченных графов является развитием и продолжением алгоритма установления изоморфности [4].

Алгоритм установления изоморфизма удобно описывать в терминах поиска в пространстве состояний. Каждое состояние s процесса совмещения вершин соответствует частичной подстановке $\varphi(s)$, которая содержит лишь часть вершин полной подстановки. Каждому состоянию также соответствуют подграфы $G_1(s)$ и $G_2(s)$, полученные из вершин графов G_1 и G_2 , вошедших в частичную подстановку $\varphi(s)$, и ребер, соединяющих эти вершины. В дальнейшем обозначим через $\varphi_1(s)$ и $\varphi_2(s)$ проекции подстановки $\varphi(s)$ на V_1 и V_2 .

Алгоритм состоит из предварительной и основной части. В предварительной части выполняются операции упорядочивания вершин графов и формируются граничные условия для однократно выполняемых, по ходу алгоритма, операций, призванные сократить область поиска основной, переборной части алгоритма.

2.1 Предварительная часть алгоритма

Основные действия, выполняемые в предварительной части алгоритма – сортировка вершин графов и формирование матрицы возможных совмещений. Идея предварительной перенумерации вершин графов при установлении их изоморфности с помощью back-tracking алгоритма была предложена в работе [5].

Матрица возможных совмещений $M_{i,j}$ – это таблица размером $|V_1| \times |V_2|$. Каждому элементу таблицы соответствует пара вершин исходных графов $V_{1,i}$ и $V_{2,j}$. Значения матрицы формируются следующим образом:

- $M_{i,j} = 0$, если на основании предварительных проверок вершины $V_{1,i}$ и $V_{2,j}$ совместить нельзя;
- $M_{i,j} = 1$, в противном случае.

Смысл матрицы возможных совмещений в том, чтобы выполнить однократно в рамках предварительной части алгоритма все проверки, не основанные на информации, полученной в процессе совмещения вершин, тем самым, ускорить обработку соответствующих ограничений, сведя ее к одной операции сравнения.

В программе реализованы следующие предварительные проверки:

1. $M_{i,j} = 0$, если $|V_{1,i}| < |V_{2,j}|$, где $|V_{X,Y}|$ – степень вершины Y графа X ;

2. $M_{i,j} = 0$, если $|V_{1,i}^{in}| < |V_{2,j}^{in}|$, где $|V_{X,Y}^{in}|$ – число входящих ребер вершины Y графа X ;

3. $M_{i,j} = 0$, если $|V_{1,i}^{out}| < |V_{2,j}^{out}|$, где $|V_{X,Y}^{out}|$ – число исходящих ребер вершины Y графа X ;

4. $M_{i,j} = 0$, если $W_{1,i}^{vertex} < W_{2,j}^{vertex}$, где $W_{X,Y}^{vertex}$ – число вершин в первых 4-х волнах волнового разложения подграфа окружения вершины Y графа X ;

5. $M_{i,j} = 0$, если $\sum_{m=1}^n W_{1,i,m}^{vertex} < \sum_{m=1}^n W_{2,j,m}^{vertex}, n = 1..|W_{2,j}^{vertex}|, m = 1..4$, где $W_{X,Y,m}^{vertex}$ – число вершин в m -ой волне волнового разложения графа X , начиная с вершины Y ;

6. $M_{i,j} = 0$, если $W_{1,i}^{ribes} < W_{2,j}^{ribes}$, где $W_{X,Y}^{ribes}$ – число ребер в первых 4-х волнах волнового разложения подграфа окружения вершины Y графа X ;

7. $M_{i,j} = 0$, если $\sum_{m=1}^n W_{1,i,m}^{ribes} < \sum_{m=1}^n W_{2,j,m}^{ribes}, n = 1..|W_{2,j}^{ribes}|, m = 1..4$, где $W_{X,Y,m}^{ribes}$ – число ребер в m -ой волне волнового разложения графа X , начиная с вершины Y .

8. $M_{i,j} = 0$, если $L_{1,i} \neq L_{2,j}$, где $L_{X,Y}$ – метка вершины Y графа X .

9. $M_{i,j} = 0$, если $R_{1,i} \leq R_{2,j}$, где $R_{X,Y}$ – вес вершины Y графа X .

Возможно использование и других критериев для оценки возможности совмещения вершин графов. Разработка таких критериев основана на волновом разложении графов, начиная с заданной вершины [6]. По мере

распространения волны получают подграфы окружения каждой вершины. Сравнивая параметры соответствующих подграфов окружения вершин графов, которые предполагается совмещать, делается вывод о потенциальной возможности или принципиальной невозможности такого совмещения. В приведенных критериях для этого использовались количество вершин и ребер в подграфах окружения сравниваемых вершин для всех этапов распространения волны.

Сортировка вершин графов производится с целью ускорения нахождения изоморфной подстановки, в случае, если такая подстановка существует. В переборной части алгоритма переставляются только вершины большего графа, в то время, как порядок вершин меньшего графа не меняется. Порядок следования вершин меньшего графа определяется в предварительной части алгоритма.

Пусть $T_{2,i}$ – количество ребер инцидентных верши-

нам с меньшими номерами и $P_{2,i} = \sum_{j=1}^{|V_1|} M_{j,i}$ – суммар-

ное количество вариантов совмещения вершины i графа G_2 с вершинами графа G_1 . Тогда порядок сортировки вершин графа G_2 следующий:

$$V_{2,i} = V_{2,k}, \text{ где } T_{2,k} = \min_{j=i+1}^{|V_2|} (T_{2,j}).$$

Если $T_{2,i} = T_{2,j}$, то $V_{2,i} = V_{2,k}$, где $P_{2,k} = \min(P_{2,i}, P_{2,j})$.

Т. е. вершины графа G_2 сортируются в порядке убывания количества связей с вершинами, имеющими меньшие номера или в порядке убывания количества вариантов совмещения вершин, если количество связей одинаково. Такой порядок следования вершин обусловлен тем, что чем больше связей, с уже совмещенными, имеет вершина, тем жестче будет ограничивающее условие, включающее эту вершину, и, соответственно, меньше общее количество совмещений, которые необходимо перебрать.

2.2 Основная часть алгоритма

Основная часть алгоритма представляет собой последовательное наложение вершин с возвратом, описывать которое удобно в терминах метода поиска в пространстве состояний.

Вершины графа G_2 остаются нетронутыми и каждой из них ставится в соответствие одна из вершин графа G_1 . При этом проверяется допустимость такого совмещения. Если удастся найти соответствие всем вершинам графа G_2 , при этом выполнено условие изоморфизма, то найденное состояние возвращается как искомая подстановка.

Пусть $T_{1,i}$ – количество связей вершины i графа G_1 с вершинами $V_{1,j} \in \Phi_1(s)$, а $T_{2,i}$ – количество связей вершины i графа G_2 с вершинами $V_{2,j} \in \Phi_2(s)$.

Начальному состоянию $\Phi(s)_0 = 0$ соответствует состояние, при котором не совмещено еще ни одной пары вершин.

Для получения i -го состояния для вершины $V_{2,i}$ ищется соответствие среди вершин $V_{1,j}$, таких что:

1. $M_{i,j} = 1$, т. е. вершины совместимы на основании предварительных проверок.
2. $T_{1,i} \geq T_{2,j}$
3. Для $k = 1..i$, если $(v_i, v_k) \in E_1$, то $(\Phi(v_i), \Phi(v_k)) \in E_2$.

Если выполнены все условия, из которых третье является прямым следствием определения граф-подграф изоморфизма, то соответствующая пара вершин входит в частичную подстановку и формируется новое состояние $\Phi(s)_i$.

Перебор состояний производится методом поиска в глубину.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АЛГОРИТМА

В зависимости от решаемых задач, организационной структуры и географической распределенности различные организации на различных этапах своего существования могут иметь совершенно разные соответствующие им графы, отражающие набор имеющихся в наличии ресурсов и возможностей их совместного использования. Однако очевидно, что чем меньше организация, тем больше плотность реберного заполнения соответствующего графа, поскольку между меньшим числом участников, в условиях ограниченных возможностей коммуникации, существует большее число связей. В то же время с ростом масштабов организации, плотность реберного заполнения соответствующего графа будет падать, поскольку участники производственного процесса с ростом масштабов деятельности не могут взаимодействовать все со всеми и иметь потребности в использовании всех ресурсов организации.

Подобная ситуация наблюдается и для графа задачи, которую необходимо решить в рамках организации. Для небольших задач характерно интенсивное использование ограниченного набора ресурсов и, как следствие, наличие большего числа связей в графе задачи. Вместе с ростом масштабов задачи, в ее решение вовлекается все больше ресурсов, которые естественным образом структурируются и образуют менее плотный граф задачи в терминах этой работы.

Поэтому для исследования характеристик алгоритма использовались случайно сгенерированные графы с заданной плотностью реберного заполнения. Такие графы могут представлять в грубом приближении описанные выше предоставляемые организацией ресурсы и потребности в них со стороны решаемых задач.

Для исследования формировались организации произвольной структуры, содержащие ресурсы различных типов (метки, приписываемые вершинам графов) и объема (веса, приписываемые вершинам графа). Для задан-

ного набора ресурсов формировалась сеть, отражающая возможность их совместного использования с заданной плотностью реберного заполнения.

Вершинам графов приписывались метки трех типов, соответствующие возможности использования CPU, RAM и HDD, а так же условный доступный объем соответствующих ресурсов скорректированный в одном масштабе от 200 до 3000 условных единиц соответствующих ресурсов.

Задачи генерировались случайным образом из графа сети, путем удаления части вершин и ребер графа сети и уменьшения приписанных весов. Параметрами являлись величины:

- k_{nv} – коэффициент уменьшения числа вершин для графа задачи;
- k_r – коэффициент числа ребер графа;
- k_w – коэффициент уменьшения весов графа.

Метки, приписанные вершинам графов, сохранялись.

Для оценки производительности алгоритма в случае когда необходимые для задачи ресурсы не могут быть выделены в рамках организации (граф задачи не является строгим подграфом графа организации) в графе задачи заменялось случайное количество ребер, таким образом что он переставал быть строгим подграфом организации, но общее число вершин и ребер графа задачи сохранялось таким же как и для случая строгого граф-подграф изоморфизма.

Исследования проводились на компьютере Athlon 64 x2 5400+, использовалось только одно ядро процессора (однопоточная реализация представленных алгоритмов). Каждое значение на графике получено путем усреднения времени вычислений на 1000 случайно сгенерированных парах графов.

Некоторые характерные результаты исследований представлены на рис. 1, 2.

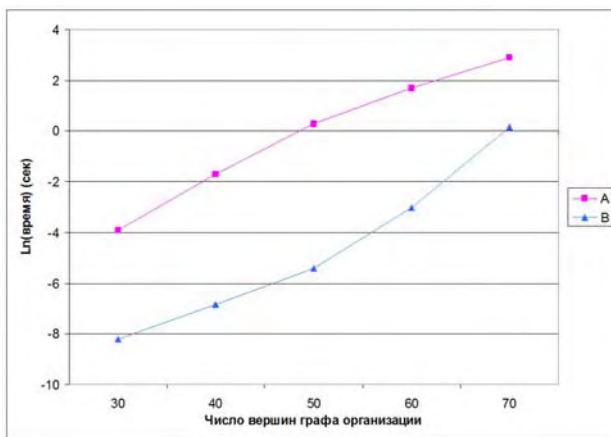


Рис. 1. Среднее время нахождения размещения задачи в сети при параметрах: $k_{nv} = 0,2$, $k_r = 0,5$, $k_w = 0,2$, при плотности реберного заполнения характеристических графов сети 50 % (*A* – граф задачи не является подграфом графа организации; *B* – граф задачи является подграфом графа организации)

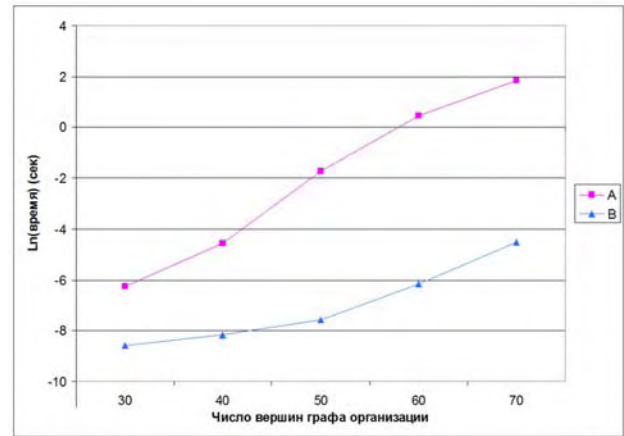


Рис. 2. Среднее время нахождения размещения задачи в сети при параметрах: $k_{nv} = 0,1$, $k_r = 0,5$, $k_w = 0,2$, при плотности реберного заполнения характеристических графов сети 30 % (*A* – граф задачи не является подграфом графа организации; *B* – граф задачи является подграфом графа организации)

Как видно из рисунков, алгоритм имеет в общем случае не полиномиальную вычислительную сложность, но при уменьшении числа вершин в графах или плотности реберного заполнения, большую роль играют предварительные проверки, уменьшающие количество вариантов совмещения вершин в переборной части, поэтому алгоритм имеет высокую производительность на многих значимых для практических задач конфигурациях графов, характеризующихся низкой плотностью реберного заполнения.

4 ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА

В изложении задачи поиска граф-подграф изоморфизма применительно к области поиска ресурсов организации для решения комплексных задач имеется ряд факторов, каждый из которых ведет к повышению производительности алгоритма применительно к ожидаемым практическим конфигурациям графов самой организации и задачи, для которой ищутся ресурсы. К таким факторам относятся:

1. Метки, приписываемые вершинам. При решении задачи поиска граф-подграф изоморфизма для поиска ресурсов в рамках организации каждый из типов ресурсов имеет свою метку, приписываемую всем вершинам графов. Приписанные метки являются дополнительными условиями, ограничивающими рекурсию при переборе возможности совмещения вершин графов, тем самым, сужая область поиска возможных решений и повышая производительность алгоритма. Чем больше различных типов ресурсов используется в рамках организации, тем сильнее влияние ограничивающего условия, основанного на метках. В реальных условиях ресурсы организации гораздо более разнообразны и для их классификации понадобится гораздо большая номенклатура меток, чем упрощенная модель, содержащая три вида меток, рассмотренная в качестве примера в данной работе.

2. Плотность реберного заполнения графа организации и графа задачи. В проведенном исследовании допускалось, что плотность реберного заполнения графов может быть сравнима с 50 % (т. е. наихудший вариант, с наибольшей плотностью реберного заполнения, сверх которой задачу выгоднее решать на графах, дополнительных к исходным, которые будут иметь меньшую плотность реберного заполнения и, соответственно, большую производительность алгоритма). В реальных организациях с множеством узлов и различных типов ресурсов высокая плотность реберного заполнения не достижима, как в следствие ограниченного доступа к ресурсам различных членов кооперации, так и в виду разнородности ресурсов и невозможности совместного использования ресурсов совершенно различных типов.

3. Размер графа задачи. Во многих случаях для решения задачи необходимо использовать лишь часть, имеющихся в распоряжении организации ресурсов (как человеческих, так и аппаратно-программных), часть ресурсов никак не могут использоваться совместно ввиду их несовместимости, и т. д. Это все факторы приводящие к тому, что во многих случаях размер графа задачи многократно меньше размера графа сети, что так же является фактором приводящим к повышению реальной производительности алгоритма.

В рамках современных организаций производительность алгоритма поиска ресурсов порядка сотен вершин графа вполне достаточна и позволяет решать реальные задачи поиска и управления ресурсами в современных организациях, решающих комплексные задачи как разработки сложного программного обеспечения, так и других областей деятельности.

ВЫВОДЫ

В работе представлен граф-аналитический подход к решению задачи поиска и резервирования ресурсов

организации для решения комплексных задач, основанный на поиске граф-подграф изоморфизма для графов, взвешенных и помеченных по вершинам.

В работе представлен точный алгоритм решения задачи поиска граф-подграф изоморфизма для графов, взвешенных и помеченных по вершинам, описана структура алгоритма и приведены результаты оценки его производительности на тестовых графах, показывающие возможность его практического применения для решения реальных задач поиска и управления ресурсами организации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Haijun, Zhang*. Research on co-reservation in the manufacturing grid system / Haijun Zhang, Yefa Hu, Zude Zhou // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. – Volume 47, Issue 5–8. – P. 699–717.
2. *Christoph, Langguth*. Optimizing resource allocation for scientific workflows using advance reservations / Christoph Langguth, Heiko Schuldt // Proceeding SSDBM'10 Proceedings of the 22nd international conference on Scientific and statistical database management. – Springer-Verlag. – 2010. – P. 434–451.
3. *Ильяшенко, М. Б.* Алгоритм нахождения графподграф изоморфизма для взвешенных графов и его применение / Ильяшенко М. Б. // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2007. – № 1. – С. 62–68.
4. *Ильяшенко, М. Б.* Разработка и исследование параллельного алгоритма проверки граф-подграф изоморфизма / Ильяшенко М. Б. // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2006. – № 1. – С. 63–69.
5. *Пинчук, В. П.* Распознавание изоморфности графов: ПНВ-алгоритм / В. П. Пинчук // Складні системи і процеси. – 2002. – № 1. – С. 4–11.
6. *Пинчук, В. П.* Основанная на волновом разложении система инвариантов для простых графов и алгоритм распознавания изоморфности / В. П. Пинчук // Киев, 1995. – Деп. в ГНТБ Украины 10.05.95, N 1002 – Ук 95.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2013.

Після доробки 25.03.2014.

Ильяшенко М. Б.

Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

ВИРШЕННЯ ЗАДАЧІ ПОШУКУ ГРАФ-ПОДГРАФ ІЗОМОРФІЗМУ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕННЯ РЕСУРСІВ ОРГАНІЗАЦІЇ

У роботі запропоновано граф-аналітичний підхід для розподілу ресурсів організації. Він базується на алгоритмі пошуку граф-підграф ізоморфізму для зважених та помічених графів і є розвитком алгоритму пошуку граф-підграф ізоморфізму для зважених графів.

Ключові слова: резервування ресурсів, граф-підграф ізоморфізм, зважені графи, помічені графи, граф-аналітичний підхід.

Ilyashenko M.

Doctor of Philisiphy, Associate Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

GRAPH-SUBGRAPH ISOMORPHISM PROBLEM SOLVING FOR ORGANIZATION RESOURCES DISTRIBUTION

The paper presents graph-analytical approach for organizations resources distribution. It based on graph-subgraph isomorphism algorithm for weighted and labeled graphs and can be considered as development of graph-subgraph isomorphism algorithm for weighted graphs proposed before.

Paper describes requirements and specifics of human and technical resources reservation in modern distributed organizations, that can have rather complicated structure, taking into account relations between available resources, and specifics of requirements in resources provided by complicated tasks that need to be solved by organizations. All types of resources considered as weighted and labeled graphs.

Next presented advanced version of graph-subgraph isomorphism algorithm enhanced to work with graphs both weighted and labeled by vertexes. Provided full set of preliminary conditions aim to narrow main combinatorial part of algorithm, where branch and bound method used to find final substitution.

Finally presented numerical results of algorithm benchmarking on randomly generated sets of graphs represented most severe possible conditions for realistic graphs organization in possible practical applications and grounded developed algorithm productivity being enough for solving real scale resources distribution problems on existed hardware.

Keywords: resources reservation, graph-subgraph isomorphism, weighted graphs, labeled graphs, graph-analytical approach.

REFERENCES

1. Haijun Zhang, Yefa Hu, Zude Zhou Research on co-reservation in the manufacturing grid system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, Volume 47, Issue 5–8, pp. 699–717.
2. Christoph Langguth, Heiko Schuldt Optimizing resource allocation for scientific workflows using advance reservations, *Proceeding SSDBM'10 Proceedings of the 22nd international conference on Scientific and statistical database management*, Springer-Verlag, 2010, pp. 434–451.
3. Il'yashenko M. B. Algoritm naxozhdeniya grafpodgraf izomorfizma dlya vzveshenny'x grafov i ego primenenie, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2007, No. 1, pp. 62–68.
4. Il'yashenko M. B. Razrabotka i issledovanie parallel'nogo algoritma proverki graf-podgraf izomorfizma / M.B. Il'yashenko, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2006, No. 1, pp. 63–69.
5. Pinchuk V. P. Raspoznavanie izomorfnosti grafov: PNV-algoritm, *Skladni sistemi i procesi*, 2002, No. 1, pp. 4–11.
6. Pinchuk V. P. Osnovannaya na volnovom razlozhenii sistema invariantov dlya prosty'x grafov i algoritm raspoznavaniya izomorfnosti. Kiev, 1995, Dep. v GNTB Ukrainy' 10.05.95, N 1002 – Uk 95.

UDC 519.766.4

Karayuz I. V.¹, Bidyuk P. I.²¹Postgraduate student, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Institute for Applied System Analysis, E-mail: afanasievaiv@ya.ru, Ukraine²Doctor of Science, Professor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Institute for Applied System Analysis, Ukraine

SHORT-TERM FORECASTING OF COAL AND OIL PRODUCTION IN UKRAINE

In this study the problem of short-term forecasting for coal and crude oil production in Ukraine within the period of 2008–2012 is considered. Linear autoregressive and autoregressive moving average models as well as optimal filtering algorithm for linear systems (Kalman filter) based upon autoregressive model of second order were constructed for short term forecasting. The Kalman filter was successfully applied for generating optimal estimates of states and short-term forecasts. The state noise covariances were estimated recursively with new data coming what corresponds to the general ideology of adaptation. The best forecasting results for coal and crude oil production were received for autoregressive models with optimal filter and for ARMA models.

Keywords: Autoregressive model, autoregressive moving average model, Kalman filter, coal and crude oil production, short-term forecasting.

INTRODUCTION

Safety of Ukraine in the sphere of energy production highly depends on import of gas and oil. Production of coal, oil and gas in Ukraine itself, their transporting and use results in intensive contamination of environment. One of the first priority tasks is development and implementation of energy saving policy and maximum possible transition to non-traditional and renewable sources of energy. To solve effectively such problems it is necessary to develop and forecast fuel-and energy balance for Ukraine with taking into consideration production of coal and crude oil on Ukrainian territory. To increase quality of managerial decisions and risk management, quality of automatic control for engineering systems and technology it is necessary to develop and apply to solving practical problems new forecasting techniques directed towards further improvement of short- and medium term forecasting. Existing today forecasting methods that are based on various analytical procedures, logical rules and rational expert reasoning cannot provide in many cases desirable quality of forecasting results what requires from researchers new efforts to enhance quality of forecast estimates [1, 2]. Quality of the forecast estimates depends highly on quality of data itself, preliminary data processing directed on improvement of their statistical characteristics, correct application of structure and parameters estimation procedures as well as techniques of generating forecasts themselves. Very often substantial improvement of forecasts can be reached with optimal Kalman filter (KF) application that takes into consideration state and measurement noise covariances. KF algorithm also generates one-step ahead forecasts that are usually of acceptable quality.

Besides there exists a possibility for combining forecasts estimates generated by ideologically different techniques, what results very often in better forecasts than quality of

separate estimates generated by each technique [3]. At any rate such approach to forecasting may lead to substantial decreasing of forecasting errors variance if applied correctly.

PROBLEM STATEMENT

The purposes of the study are as follows: – to develop adaptive model development and forecasting system based on the modern system analysis approach; – to construct linear autoregression models with moving average (ARMA) for the process of coal and crude oil production and to compute short-term forecasts on their basis; – to apply Kalman filter (KF) for optimal estimation of the coal and crude oil production state and for short-term forecasting of the variables; – to perform comparative analysis of forecasts estimates computed with the models constructed and Kalman filter.

SOME MODERN FORECASTING TECHNIQUES

Adaptive Regression Analysis Approach. Correct application of modern modeling and adaptive estimation techniques, probabilistic and statistical data analysis provide a possibility for organizing computing process in such a way so that to get higher quality of forecast estimates in conditions of structural, parametric and statistical uncertainties. Such uncertainties arise due to availability of nonstationary and nonlinear process under study, incomplete data records, noisy measurements, extreme values and short samples. One of the possibilities for adaptation provide Kalman filtering techniques that generate optimal state estimates together with short term forecasts in conditions of influence of external stochastic disturbances and measurement noise. However, such techniques require estimates of statistical parameters for stochastic disturbances and measurement noise in real time what creates extra burden and errors for forecasting procedures.

We propose a concept of a model adaptation for dynamic processes forecasting based on modern system analysis ideas that supposes hierarchical approach to modeling and forecasting procedures, taking into consideration of possible structural, parametric and statistical uncertainties, adaptation of mathematical models to possible changes in the processes under study and the use of alternative parameter estimation techniques aiming to model and forecast estimates improvement. The functional layout of adaptive forecasting system is given in Fig. 1. Here each step of data processing is controlled by appropriate set of statistical parameters each of which characterizes specific features of data, model as a whole, model parameters and finally quality of the forecast estimates generated.

We propose the new adaptive scheme that is distinguished with several possibilities for adaptation using a complex quality criterion. The data collected should be correctly prepared for model structure and parameter estimation. The model structure estimation is a key element for reaching necessary quality of forecasts. It is proposed to define a model structure as follows:

$$S = \{r, p, m, n, d, z, l\},$$

where r is model dimensionality (number of equations); p is model order (maximum order of differential or difference equation in a model); m is a number of independent variables in the right hand side; n is a nonlinearity and its type; d is a lag or output reaction delay time; z is external disturbance and its type; l are possible restrictions for parameters and variables. For automatic search of the «best» model it is proposed to use the following criteria:

$$V_N(\theta, D_N) = e^{|1-R^2|} + \ln(1 + \frac{SSE}{N}) + e^{|2-DW|} + \ln(1 + MSE) + \ln(MAPE) + e^U, \quad (1)$$

where θ is a vector of model parameters; N is a power of time series (sample) used; R^2 is a determination coefficient; DW is Durbin-Watson statistic; MSE is mean square error; $MAPE$ is mean absolute percentage error; U is Theil coefficient. The power of the criterion was tested experimentally and proved with a wide set of models and statistical data. The criteria helps to search automatically for the best model in particular application.

There are several possibilities for adaptive model structure estimation (Fig. 1): 1) automatic analysis of partial autocorrelation for determining order of autoregression; 2) automatic search for the lags estimates of exogeneous variables (detection of leading indicators); 3) automatic analysis of residual properties (value of autocorrelation, type of distribution); 4) analysis of data distribution type and its use for selecting correct model estimation method; 5) adaptive model parameter estimation with hiring extra data; 7) optimal selection of weighting coefficients for exponential smoothing, nearest neighbor and some other techniques; 8) the use of adaptive approach to model type selection.

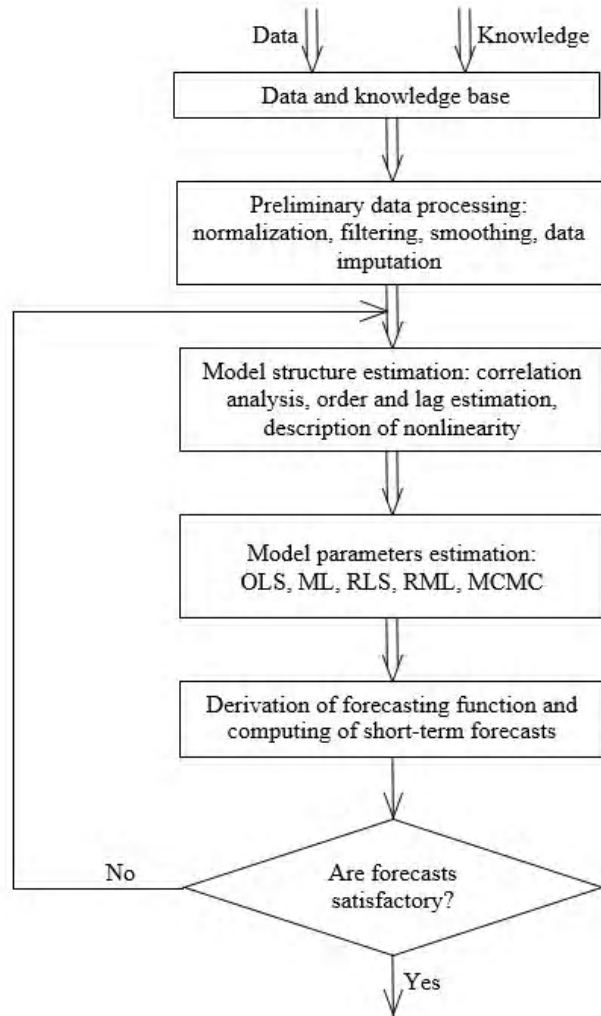


Fig. 1. Adaptive model estimation and process forecasting procedure

The use of a specific adaptation scheme depends on the volume and quality of data, specific problem statement, requirements to forecast estimates, etc. In some cases we used successfully logistic regression together with linear regression to describe the data mathematically. These models as well as classification trees and Bayesian networks have been used successfully to forecast direction of stock price movement and some macroeconomic processes.

Application of the concept described provides the following advantages: 1) take into consideration some statistical and parametric uncertainties; 2) automatic search for the «best» model reduces the search time for many times; 3) it is possible to analyze much wider set of candidate models than manually; 4) the search is optimized thanks to the use of complex quality criterion; 5) derivation of forecasting functions on the basis of estimated AR and ARIMA models; 6) in the frames of computer system developed it is possible to integrate ideologically different methods of modeling and forecasting and compute combined forecasts estimates that are distinguished with better quality. Testing of the system with stock price and macroeconomic data showed that it is possible to reach a value of absolute percentage error of about 3–4 % for short term forecasting.

Kalman filtering. Kalman filtering algorithms could be easily hired for solving short term forecasting problems in the frames of adaptation procedure given above. The models constructed according to the adaptation scheme considered should be transformed into state space representation form that makes it possible further application of the Kalman type optimal filtering algorithm. An advantage of the approach is in the possibility of model adjusting to random external disturbances and taking into consideration possible measurement errors. In most cases of application such approach provides for high quality of short term forecasts thanks to availability of optimal state estimates computed by the filtering algorithm.

Bayesian networks. Bayesian networks (BN) or Bayesian belief networks are probabilistic models in the form of a directed graph the vertices of which represent selected variables, and arcs reflect existing cause and effect relations between the variables [4]. BN find quickly expanding applications in various areas of human activities such as computer based medical and engineering diagnostic systems, process forecasting, classification problems, risk management, and many others. BN provides a possibility for discovering existing dependences between variables and for determining new conditional probabilities for states and situations after receiving new information by any node of a graph. Success of application of the approach depends on correctness of a problem statement, appropriate variables selection, availability of necessary data and/or expert estimates for the structure and parameter learning. General problem statement touching upon application of Bayesian networks includes the following steps: 1) thorough studying of a process being modeled; 2) data and expert estimates collecting; 3) selection of known or development of a new method for model structure estimation (learning); 4) BN parameter learning (construction of conditional probability tables); 5) development of a new or selection of known inference method (final result); 6) testing the BN constructed using actual and generated data; 7) application of the model to practical problem solving, i.e. state forecasting, classification etc. In spite of the fact that general theory of BN has been developed quite well as of today, usually many questions arise when a specific practical problem is solved. This is especially true regarding the problems of forecasting because the quality requirements to forecasts estimates are continuously increasing what results in further refinement of computing methods and algorithms.

Group Method for Data Handling. The group method for data handling (GMDH) is a powerful modern instrument for process modeling and forecasting developed at the Ukrainian National Academy of Sciences (NAS) in the second half of last century by O. G. Ivakhnenko [5]. It generates the forecasting model in the form of the Kolmogorov-Gabor polynomial that could be used for describing linear and nonlinear systems. The main positive feature of the method is that it selects automatically the best model structure in the class of preselected linear or nonlinear structures. The latest versions of the fuzzy GMDH

techniques provide better possibilities for increasing the quality of forecasts estimates.

The problem statement for application of the technique should include the following elements: 1) selection of partial descriptions that create a basis for the possible final model; 2) selection and adaptation of the model parameters membership functions for a particular application; 3) development of a new or application of known model parameter estimation technique; 4) selection of a model quality criteria for the use at intermediate computation steps and for the final model selection. The models constructed with appropriately developed and tuned GMDH approach usually provide medium or high quality of short term forecasts.

Generalized Linear Models. Generalized linear models (GLM) is a class of models that extend the idea of linear modeling and forecasting to the cases when pure linear approach to establishing relations between process variables cannot be applied [6]. The GLM approach also extends the possibilities for mathematical modeling in cases when statistical data exhibit distribution different from normal. GLM constructing can be considered from classical statistics or a Bayesian perspective. Usually the problem statement regarding such type of model construction is touching upon the following elements: type of prior distribution for model parameters; a method for parameters estimation using appropriate simulations techniques; necessity for hierarchical modeling, posterior simulation etc. GLM could be successfully applied to solving the problems of classification and nonlinear process prediction. For example, they are used widely in scoring systems for predicting solvency of bank clients.

Combination of the forecasts. The problem of forecasts combination arises in the cases when one selected technique is not enough for achieving desirable quality of forecasting. In such cases it is necessary to select two or more ideologically different forecasting techniques and to compute combined estimate using appropriately selected weights. In a simple case equal weights are assigned to the individual forecasts. Other approaches to computing these weights are based on previously found prediction errors for each method or on optimization procedures. Especially good results of combination are achieved in the cases when the error variances for individual forecasting techniques do not differ substantially from each other.

THE MODELS CONSTRUCTED

To describe coal and oil production in Ukraine several models had been constructed and tested. The first one was linear AP(p) model of the form:

$$y(k) = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i y(k-i) + \varepsilon(k), \quad k=0,1,2,\dots,$$

where p is autoregression order; $y(k)$ is a measurement at k -th moment of (discrete) time; $\varepsilon(k)$ – is a normal disturbance;

a_i is i -th parameter of the model. The autoregressive moving average model (ARMA(p, q)) and ARIMA(p, d, q) is defined as follows:

$$y(k) = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i y(k-i) + \sum_{j=0}^q b_j \varepsilon(k-j) + \varepsilon(k).$$

where q is moving average order; a_i, b_j – model parameters.

The models developed have been used to construct forecasting functions allowing to generate multistep forecasts. As an example below is given forecasting function (for three steps) constructed for the process ARMA(2, 1):

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+3) &= E_k[y(k+3)] = a_0 + a_1 E_k[y(k+2)] + \\ &+ a_2 E_k[y(k+1)] = a_0(1 + a_1 + a_1^2 + a_2) + (a_1^3 + 2a_1 a_2)y(k) + \\ &+ (a_1^2 a_2 + a_2^2)y(k-1) + \beta_1(a_1^2 + a_2)\varepsilon(k). \end{aligned}$$

And recursive expression for arbitrary s steps forecasting can be written in the form:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+s) &= E_k[y(k+s)] = a_0 + a_1 E_k[y(k+s-1)] + \\ &+ a_2 E_k[y(k+s-2)]. \end{aligned}$$

Kalman filter application. The linear Kalman filter was applied for computing optimal estimates of states and short-term forecasting based on ARMA-type models. The state filtering and forecasting process includes the steps given below.

Step 1. Formulation of mathematical model of the process under study:

$$\begin{aligned} x(k) &= F(k)x(k-1) + w(k-1); \\ z(k) &= H(k)x(k) + v(k), \end{aligned}$$

where $x(k) = \begin{pmatrix} y(k) \\ y(k-1) \end{pmatrix}$ is 2-dimensional state vector;

$F(k) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ is state transition matrix for AR(2) model;

$w(k) \sim N(0, Q(k))$ is random disturbance that is supposed to be normal; $H(k)$ is measurements matrix; $v(k) \sim N(0, R(k))$ is a measurement (sensor) noise; initial state and respective covariances are as in the standard problem statement for optimal filtering:

$$E\{x_0\} = \hat{x}_0, \quad E\{\hat{x}_0, \hat{x}_0^T\} = P_0 = P'_0;$$

$$E\{w(k), v^T(k)\} = 0, \quad E\{w(k), x_0^T(0)\} = 0, \quad E\{v(k), x_0^T(0)\} = 0.$$

Step 2. State extrapolation (one-step ahead projection of a state):

$$\hat{x}(k) = F(k)\hat{x}(k-1).$$

Step 3. Extrapolation for the estimation errors covariance matrix:

$$P'(k) = F(k)P(k-1)F^T(k) + Q(k-1).$$

Step 4. Compute matrix filter gain:

$$K(k) = P'(k)H^T(k) \left\{ H(k)P'(k)H^T(k) + R(k) \right\}^{-1}.$$

Step 5. Optimal state estimation with taking into consideration the last measurement $z(k)$:

$$\hat{x}(k) = F(k)\hat{x}(k-1) + K(k)[z(k) - H(k)\hat{x}(k)].$$

Step 6. Compute errors covariance matrix for the next iteration:

$$P(k) = [I - K(k)H(k)]P'(k).$$

Step 7. Go to step 2.

MODELS CONSTRUCTION AND THEIR APPLICATIONS

To select the best models constructed the following statistical criteria were used: determination coefficient (R^2) with ideal value equal 1; Durbin-Watson statistic (DW) with ideal value equal 2; Fisher F -statistic; and Akaike information criterion (AIC). The forecasts quality was estimated with making use of the following criteria: mean squared error (MSE); mean absolute percentage error (MAPE), and Theil inequality coefficient (U) with its ideal value approaching zero.

The data characterizing coal and crude oil production in Ukraine were taken from the site of State Statistical Service of Ukraine [7]. The time graphs for the process are given in Fig. 2.

Thus, the best results of coal production forecasting (Table 1) were received for the models with Kalman filter (one- and two-step predictions), and three-step prediction was the best for ARMA(2,1). The graphic forms of the results are shown in Fig. 3.

Thus, the best result of one-step and two-step forecasting for crude oil production (Table 2) was received with Kalman filter + AR(2) model (with 0,2% and 2,43% errors). The Kalman filter also showed the best value of MAPE = 2,97%. The graphic forms of results are shown in Fig. 4.

Further improvements of the forecasts were achieved with application of the adaption scheme given in Fig. 1 and complex quality criterion (1). An average improvement of the forecasts was in the range between 0,5–1,2 %, what justifies advantages of the approach proposed. Combination of forecasts generated with different forecasting techniques helped to further decrease mean absolute percentage forecasting error for about 0,3–0,8 % in this particular case.

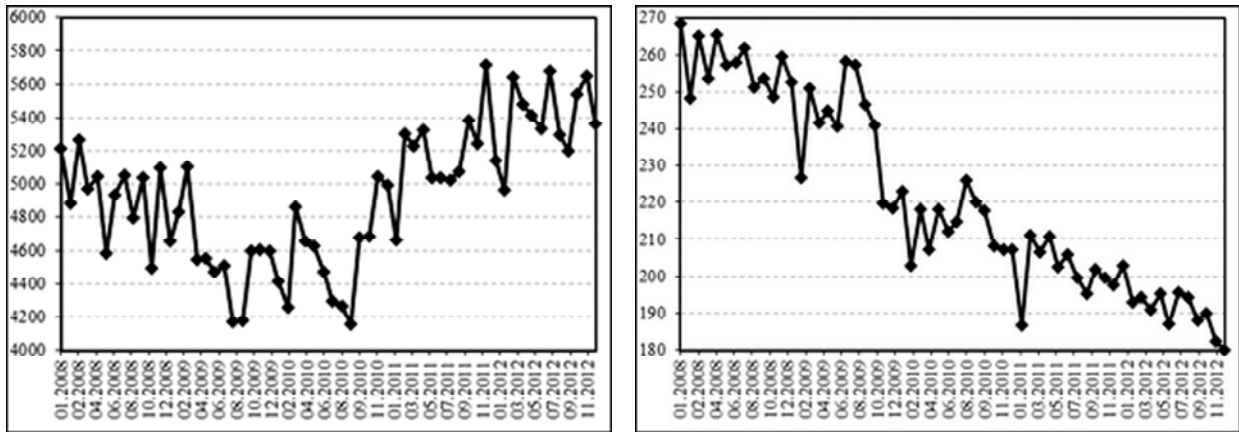


Fig. 2. Production of coal (left fig.) and crude oil (right fig.) in Ukraine, thousand tons

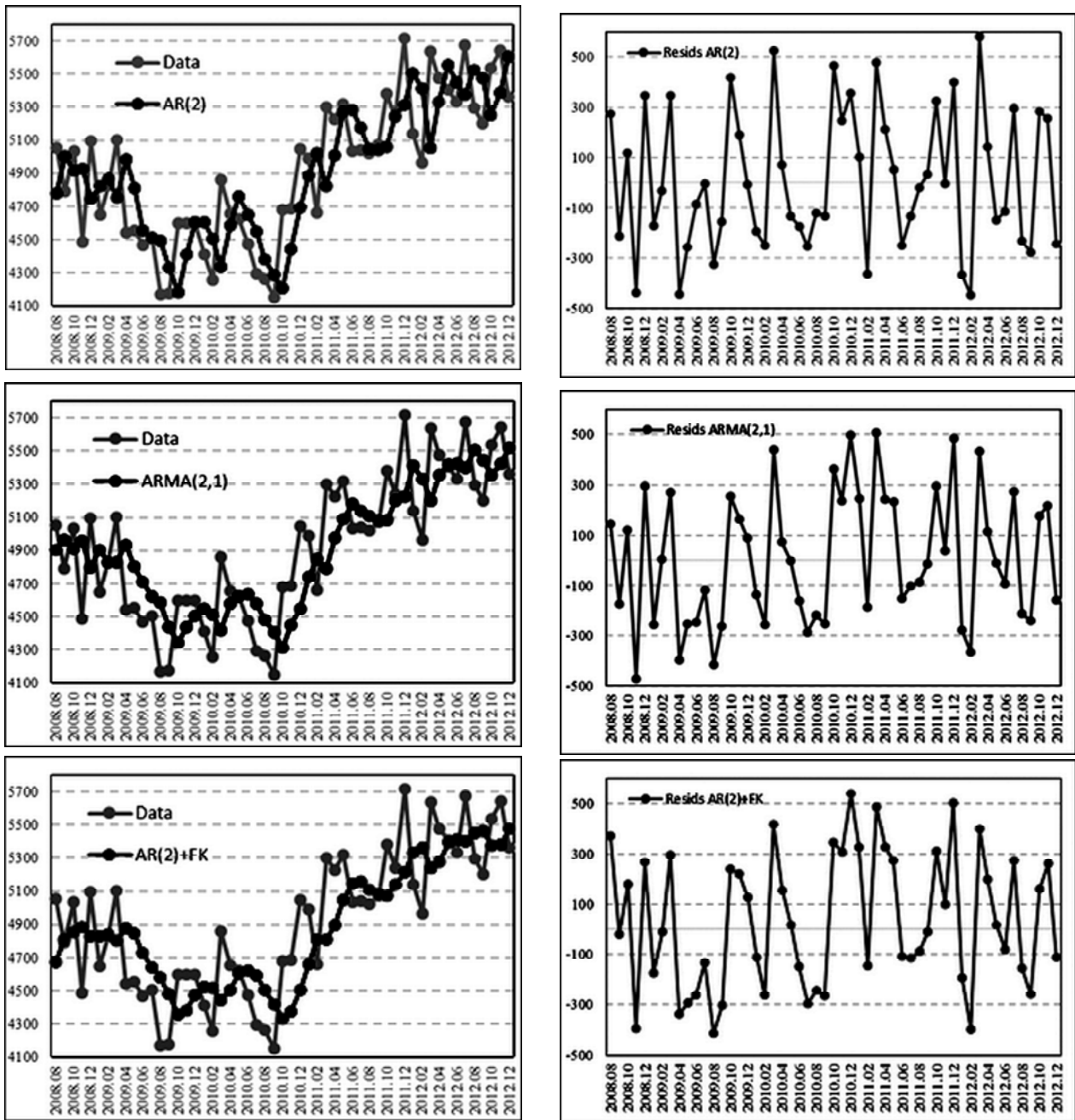


Fig. 3. Coal forecasting results in graphic form, thousand tons

Table 1. The model for coal production

Ready for use coal						
Model quality						
Model type	R^2		$\sum e^2(k)$		DW	
AR(2)	0,56		4346371		2,17	
ARMA(2,1)	0,61		3955251		1,96	
AR(2) + KF	0,56		4346371		2,17	
Quality of predictions						
Model type	MSE		MAPE		U	
AR(2)	4276086		4,85		0,039	
ARMA(2,1)	3955251		4,58		0,037	
AR(2) + KF	3959098		4,82		0,038	
Three-steps forecasts (January, February, March 2013)						
Model type	1		2		3	
		%		%		%
AR(2)	5502	9,23	5446	8,24	5480	0,94
ARMA(2,1)	5476	8,70	5480	8,92	5489	0,78
AR(2) + KF	5473	8,64	5423	7,79	5394	2,49
Data sample	5037		5031		5532	

Table 2. Models for crude oil production

Crude oil						
Model quality						
Model type	R^2		$\sum e^2(k)$		DW	
AR(2)	0,89		4243		1,94	
ARMA(2,1)	0,89		4220		1,96	
AR(2) + KF	0,89		4243		1,94	
Prediction quality						
Model type	MSE		MAPE		U	
AR(2)	4058		2,92		0,028	
ARMA(2,1)	4220		2,88		0,027	
AR(2) + KF	4348		2,97		0,029	
Three-steps forecasts (January, February, March 2013)						
Model type	1		2		3	
		%		%		%
AR(2)	180	2,80	178	7,11	177	5,13
ARMA(2,1)	180	2,70	178	7,25	178	4,91
AR(2) + KF	185	0,20	183	10,24	182	2,43
Data sample	185		166		187	

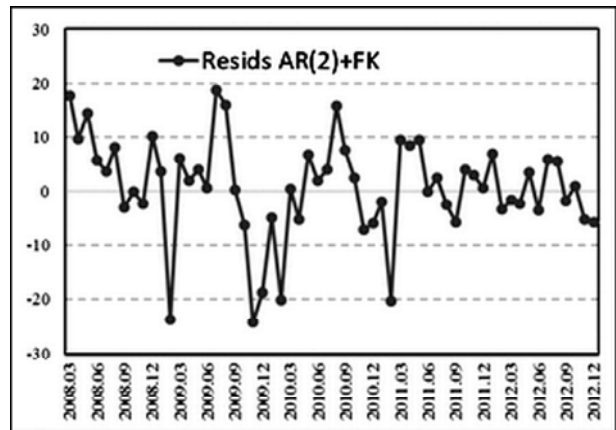
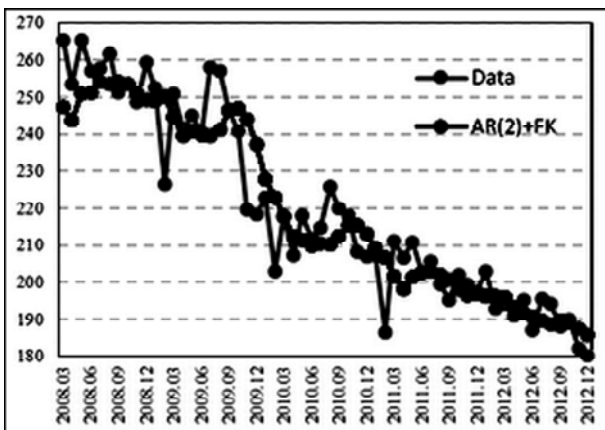
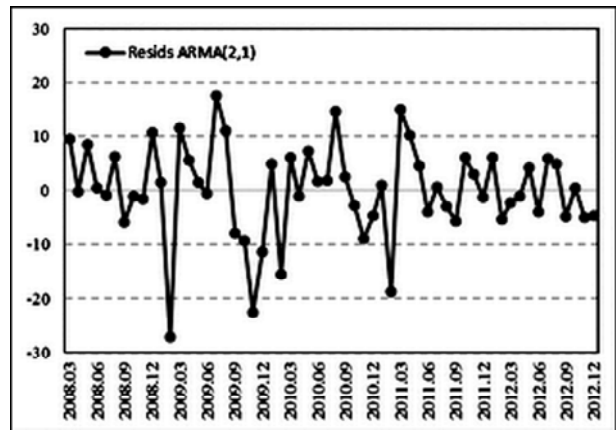
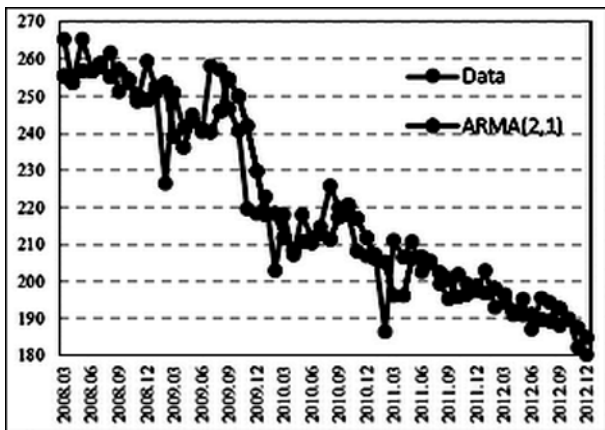
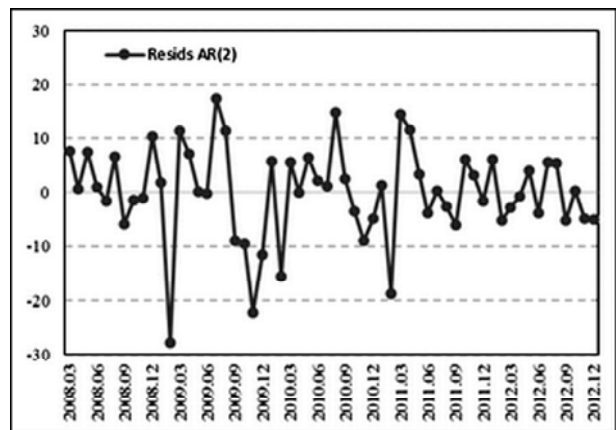
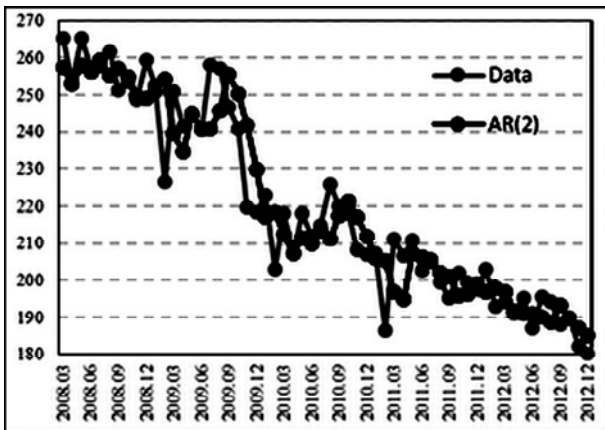


Fig. 4. Results for the crude oil production forecasting, thousand tons

CONCLUSIONS

The forecasting methodology based on application of adaptation scheme proposed, including structural and parametric adaption, proved to be useful for forecasting crude oil and coal production using the data for Ukraine. The methodology has also been applied successfully to forecasting macroeconomic processes. The basic positive features of the approach proposed are as follows: testing data quality with a set of statistical parameters; continuous analysis of data directed towards identification of forecasting model structure and its parameters; generation of candidate models and selection of the best one with another set of model quality parameters; and generation of a set of forecasts estimates on the basis of candidate models. The best forecast estimate is selected with a set of statistical forecasts quality parameters. Thus, the whole computational process is controlled with the three sets of quality parameters mentioned what guaranties acceptable quality of final result.

The linear Kalman filter was successfully applied for generating optimal estimated of states and short-term forecasts for the model selected. The state noise covariances were estimated recursively with new data coming what corresponds to the general ideology of adaptation. The best results of coal production forecasting were received for the models with Kalman filter (one- and two-step predictions), and three-step prediction was the best with ARMA(2,1). The best results for one-step and two-step forecasting for crude oil production was received with Kalman filter + AR(2) model (with 0,2 % and 2,43 % errors). The linear Kalman filter also showed the best value of MAPE = 2,97 %. Further improvements of the forecast estimates were achieved with application of the adaption scheme given in Fig. 1. An

average improvement of the forecasts was in the range between 0,5–1,2 %, what justifies advantages of the approach proposed. Combination of forecasts generated with different forecasting techniques helped to further decrease mean absolute percentage forecasting error for about 0,3–0,8 % in this particular case.

The future research should be directed towards expanding of the adaptive forecasting scheme with new methods for adaptive model parameters estimation, and alternative forecasting techniques based on intellectual data processing schemes.

SPISOK LITERATURY

1. *Shumway, R. H.* Time Series Analysis and its Applications / R. H. Shumway, D. S. Stoffer– New York: Springer Verlag, 2006. – 588 p.
2. *Бідюк, П. І.* Аналіз часових рядів / П. І. Бідюк, В. Д. Романенко, О. Л. Тимошук. – К. : Політехніка, НТУУ «КПІ», 2013. – 601 с.
3. *Harris, R.* Applied Time Series Modelling and Forecasting / R. Harris, R. Sollis– West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2005. – 313 p.
4. *Jensen F. V., Bayesian Networks and Decision Graphs / F. V. Jensen, Th. Nielsen. – New York: Spinger-Verlag, 2009. – 457 p.*
5. *Згуровский, М. З.* Основы вычислительного интеллекта: монография / М. З. Згуровский, Ю. П. Зайченко ; НАН Украины, ИПСА НТУУ «КПИ». – К. : Наукова думка, 2013. – 406 с.
6. *Dobson, A.* An Introduction to Generalized Linear Models / A. Dobson. – New York : CRC Press Company, 2013. – 407 p.
7. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. – Електрон. дані. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>, вільний. – Заголовок з екрану. – мова укр., рос., англ.

Стаття надійшла до редакції 1.04.2014.

Караюз І. В.¹, Бідюк П. І.²

¹Аспірантка, Інститут прикладного системного аналізу НТУУ «КПІ», Україна

²Д-р техн. наук, професор, Інститут прикладного системного аналізу НТУУ «КПІ», Україна

КОРОТКОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ВУГІЛЛЯ І НАФТИ В УКРАЇНІ

У статті розглядається задача короткострокового прогнозування виробництва вугілля та нафти в Україні у часовому діапазоні 2008–2012 рр. Для розв'язання задачі короткострокового прогнозування побудовано моделі авторегресії, авторегресії з ковзним середнім, а також використано алгоритм фільтрації лінійних систем (фільтр Калмана), що ґрунтується на моделі авторегресії другого порядку. Фільтр Калмана успішно використано для оптимального оцінювання станів та короткострокового прогнозування. При цьому коваріації збурень станів оцінювались рекурсивно з надходженням нових даних, що узгоджується із загальною ідеологією адаптації. Кращі результати прогнозування виробництва вугілля і сирої нафти отримано за допомогою оптимального фільтра (на основі авторегресії) і моделі авторегресії з ковзним середнім.

Ключові слова: авторегресія, авторегресія з ковзним середнім, фільтр Калмана, видобуток вугілля і сирої нафти, короткострокове прогнозування.

Караюз И. В.¹, Бидюк П. И.²

¹Аспирантка, Институт прикладного системного анализа НТУУ «КПИ», Украина

²Д-р техн. наук, профессор, Институт прикладного системного анализа НТУУ «КПИ», Украина

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЯ И НЕФТИ В УКРАИНЕ

В статье рассматривается задача краткосрочного прогнозирования производства угля и нефти в Украине во временном диапазоне 2008–2012 гг. Для решения задачи краткосрочного прогнозирования построены модели авторегрессии, авторегрессии со скользящим средним, а также использован алгоритм фильтрации линейных систем (фильтр Калмана), основанный на модели авторегрессии второго порядка. Фильтр Калмана успешно использован для оптимального оценивания состояний и

краткосрочного прогнозирования. При этом ковариации возмущений состояний оценивались рекурсивно с поступлением новых данных, что согласуется с общей идеологией адаптации. Лучшие результаты прогнозирования производства угля и сырой нефти получены с помощью оптимального фильтра (на основе авторегрессии) и модели авторегрессии со скользящим средним.

Ключевые слова: авторегрессия, авторегрессия со скользящим средним, фильтр Калмана, добыча угля и сырой нефти, краткосрочное прогнозирование.

REFERENCES

1. Shumway R. H., Stoffer D. S. Time Series Analysis and its Applications. New York, Springer Verlag, 2006, 588 p.
2. Bidiuk P. I., Romanenko V. D., Timoshchuk O. L. Time Series Analysis. Kyiv, Polytechnika, NTUU «KPI», 2013, 601 p.
3. Harris R., Sollis R. Applied Time Series Modelling and Forecasting, West Sussex, John Wiley & Sons Ltd., 2005, 313 p.
4. Jensen F. V., Nielsen Th. Bayesian Networks and Decision Graphs. New York, Spinger-Verlag, 2009, 457 p.
5. Zgurovsky M. Z., Zaichenko Yu. P. Basics of Computing Intelligence. Kyiv, Naukova Dumka, 2013, 406 p.
6. Dobson A. An Introduction to Generalized Linear Models. New York, CRC Press Company, 2013, 407 p.
7. The State Statistics Service of Ukraine. – Electronic data. – Available from: <http://www.ukrstat.gov.ua/>, free, Title from the screen, Lang. ukr, rus, eng.

FUZZY MODELS IN PROBLEMS OF COMPLEX SYSTEMS CONTROL

An analytical review of existing models and methods of applied problem solving is performed. The necessity of developing of fuzzy models of mobile objects is shown. A new formal model of mobile objects control as minimization of the control error is developed. It is shown that the problem of optimal mobile objects control is to find the optimal (or suboptimal) function of mobile objects control. Depending on the values of certain external parameters, this function returns a value that determines the future direction of the mobile object movement.

One of the most perspective approaches to the control function optimization is development and adjustment of fuzzy model of mobile object movement. Development of a model based on fuzzy rules will provide its flexibility. The fuzzy model as a set of production rules has been further developed. This model, unlike the existing ones, allows minimizing the error of mobile objects control. The adequacy of the developed models has been confirmed. It was shown that these models provide good mobile objects control.

Keywords: mobile object, fuzzy model, movement control, production rules, model adequacy, track, trajectory.

INTRODUCTION

Seeing the necessity of exact description of operating systems and increasing demands for solving the problems of intelligent control, there is a need to develop the theory of mathematical modeling. In the framework of the theory of mathematical modeling the formal procedures are used. These formal procedures take into account information heterogeneity, multicriteriality, dynamics of the quality and efficiency, and also uncertainties, which can be either stochastic or fuzzy.

Selecting the model type of a complex system and mathematical modeling tools to use depend largely on information quality and uncertainty type. Fuzzy approach is usually used when the system is so complex that it's impossible to build its mathematical model in traditional sense, or when the model exists, but to calculate it, significant computational resources are needed [1].

Complex system modeling in the form of fuzzy systems doesn't usually require knowledge of the system structure. However, in problems related to quality assessment of operation of the system consisting of a number of subsystems, or in problems of evaluating the degree of achievement of interacting goals, fuzzy model should take into account the system structure [2].

In this case the modeling tool is fuzzy logics and, in particular, one of its basic concepts – that is, function of fuzzy variables. However, existing algorithms for operating with such functions are not oriented to practical use.

The purpose of this research is increasing the quality of process control under uncertainty of objects operating. In this paper we also explore approaches of optimizing the complex objects control as a criterion for increasing the control adequacy.

1 RESEARCH PROBLEM STATEMENT

Let the production area be a rectangular field divided into unit cells. There are L loads and K mobile objects in this area. Mobile objects can move the loads.

Because of delivery of L_1 new loads it is required to move $L_2 \subseteq L$ loads to other cells, using mobile objects. The total time to perform this task should not exceed the time limit:

$$\tau \leq \tau^*, \quad (1)$$

where τ^* is the time remaining before new loads arrival. If the time of moving the loads $\tau > \tau^*$, the task should be modified to meet the requirement (1).

In paper [3] the model of mobile objects transportation in the production area is proposed. According to this model, mobile objects move discretely, from the center of one cell to the center of another one. To solve a number of practical problems, we need to modify the model, because mobile object is usually represented as a physical agent, which has a certain size and moves continuously.

The problem of optimal mobile objects system control is to find a certain optimal (or suboptimal) function of mobile object control. Depending on the values of certain external parameters, this function takes a value which determines the further direction of the mobile object [4].

One of the most perspective approaches to the control function optimization is development and adjustment of fuzzy model of mobile object movement [5]. Development of a model based on fuzzy rules will provide its flexibility, because even under changing environmental parameters (for example, unforeseen obstacles to the mobile object) the rules don't change.

Thus, our tasks are:

- to analyze existing models and methods for solving similar problems;
- to develop the formal model of mobile object movement along given trajectory;
- to review and analyze different approaches to mobile objects control optimization;
- to develop and adjust the fuzzy model of mobile object movement;
- to verify the adequacy of resulting model.

2 ANALYSIS OF EXISTING SOLUTIONS

Recently, the use of automated systems in different areas of life becomes more and more popular. Therefore, development of models and methods for mobile objects movement is a subject of many works. Let's consider and analyze the main approaches that offered in these works.

In paper [5] the automaton model of adaptive mobile objects control based on fuzzy logics is considered. To adjust the fuzzy control system, it is proposed to use a probabilistic automaton with training.

The proposed model is rather perspective, it has several disadvantages. Firstly, in this model it is assumed that the mobile object always can bypass the obstacle. In our model being developed, the borders of mobile object trajectory are always considered as obstacles, and mobile object can never bypass them. Secondly, proposed model allows the mobile object only to bypass the obstacles, but not to move to a fixed point, and, of course, mobile object trajectory isn't being optimized. Thereby, we cannot use this model to solve our problem.

In paper [6] the teaching model of a robot following the certain mobile object is considered. In this work it is also proposed to use the system of fuzzy rules. There are also considered several different methods for the system adjustment.

The main disadvantage of this approach is that it doesn't take into account the possible obstacles the robot may not bypass, because the trajectory of mobile object does already define the trajectory of the robot which follows it.

Thus, to solve this problem we need to modify the existing approaches.

3 FORMAL MODEL DEVELOPMENT

Let r_i be a mobile object with defined trajectory

$$tr(G_{r_i}) = \left\{ \left(x_i^{(0)}, y_i^{(0)} \right), \left(x_i^{(1)}, y_i^{(1)} \right), \dots, \left(x_i^{(e)}, y_i^{(e)} \right) \right\},$$

which represents the sequence of cells the object r_i should move to perform the task [3]. Now we develop the model of mobile object movement along this trajectory.

Let each cell be a square of size $s \times s$, and let mobile object be a rectangle with length a and width b , where $b < a < s$. Let v_{\max} and ω_{\max} be maximum linear velocity and maximum angular velocity of mobile object, respectively.

Introduce the following assumptions:

- 1) mobile object always either moves with maximum linear velocity v_{\max} or doesn't move at all;
- 2) velocity v_{\max} is small enough to neglect the time of mobile object acceleration and deceleration;
- 3) velocity v_{\max} is small enough and traction with surface is big enough to neglect the skid of mobile object for all possible values of its angular velocity;
- 4) angular velocity $\bar{\omega} = \bar{\omega}(t)$ of mobile object can be changed fast enough to neglect the influence of angular acceleration on movement of this object;
- 5) to make the movement safe, distance from the mobile object to an obstacle or to the trajectory border is needed to be not less than δ_{\min} . It is also guaranteed that $b + 2\delta_{\min} < s$;
- 6) decision about angular velocity change, acceleration or deceleration of mobile object is made as a result of measurements obtained by mobile object vision system. These measurements are made with the period τ_{\min} ;
- 7) maximum angular velocity ω_{\max} is small enough not to allow the mobile object to turn safely in the opposite direction;
- 8) when mobile object moves, it doesn't stop and doesn't face any obstacles.

Then we have

Statement 1. Position of mobile object at time t can be uniquely determined by its coordinates $\left(x_i^{(k)}, y_i^{(k)} \right)$, its direction $\bar{v}^{(k)}$ and its angular velocity $\bar{\omega}^{(k)}$ at time $k = t - \tau_{\min}$. Moreover, mobile object moves along a straight line if $\omega = 0$, and along a circular arc with radius $R = \frac{v}{2\pi\omega}$ otherwise.

Definition 1. Track $\theta(t)$ of the mobile object r_i is a curve traversed by center O of object during its movement (see Fig. 1).

Statement 2. Track $\theta(t)$ of the mobile object r_i can be uniquely determined by its initial coordinates $\left(x_i^{(0)} + \frac{s}{2}, y_i^{(0)} + \frac{s}{2} \right)$, its initial direction \bar{v}_i^0 and sequence of its angular velocities $\left\{ \omega_i^{(0)}, \omega_i^{(\tau_{\min})}, \omega_i^{(2\tau_{\min})}, \dots, \omega_i^{(n\tau_{\min})} \right\}$ at time $0, \tau_{\min}, 2\tau_{\min}, \dots, n\tau_{\min}$ respectively, where $n\tau_{\min}$ is the first moment of time when object would be entirely inside the cell $\left(x_i^{(e)}, y_i^{(e)} \right)$.

Consequence 1. Then, using statement 2, we can obtain

$$\theta(t) = \theta \left(\omega_i^{(0)}, \omega_i^{(\tau_{\min})}, \omega_i^{(2\tau_{\min})}, \dots, \omega_i^{(n\tau_{\min})} \right). \quad (2)$$

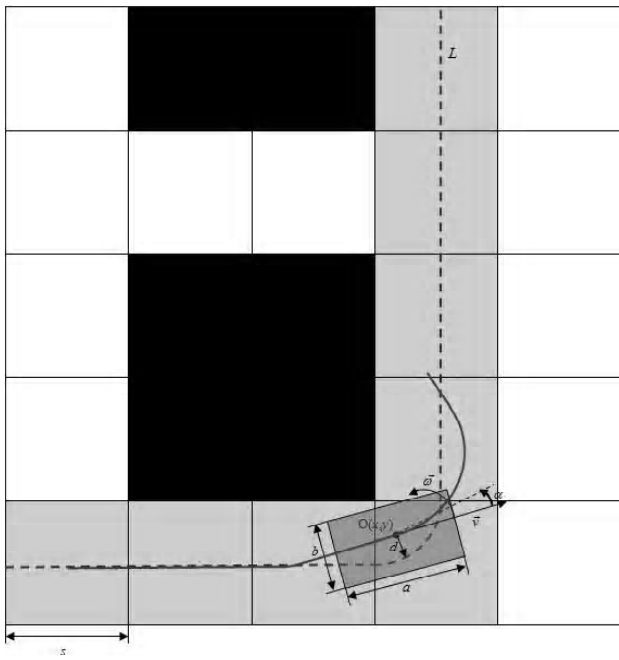


Fig. 1. Example of mobile object movement along its trajectory

Definition 2. Correct track $\theta_R(t)$ of the mobile object r_i , corresponding to the trajectory $tr(G_{r_i})$, is a track satisfying the following conditions:

1) at any time of mobile object movement along the trajectory $tr(G_{r_i})$ distance from the mobile object border to the nearest obstacle and to the borders of trajectory is not less than δ_{min} ;

$$2) \left| \omega_i^{(k\tau_{min})} \right| \leq \omega_{max} \text{ for all } k = 0, 1, \dots, n;$$

3) at time $\omega_i^{(n\tau_{min})}$ mobile object is entirely inside the cell $(x_i^{(e)}, y_i^{(e)})$.

Let's denote as $\Theta_R(r_i)$ the set of correct tracks θ_R , corresponding to the trajectory $tr(G_{r_i})$ of the mobile object r_i .

Definition 3. Length $|\theta_R|$ of correct track is the distance passed by mobile object along this track.

Statement 3. If a mobile object moves without stops, the length of its correct track can be defined as

$$|\theta_R| = v_{max} \cdot \tau_{min} \cdot n,$$

where n is an amount of measurements made during its movement.

Let $L_{tr} = L_{tr}(G_{r_i})$ be a line equidistant from the borders of the trajectory $tr(G_{r_i})$ (in Fig. 1 it is dashed). Suppose

also that the measurements made with the period τ_{min} , define the following parameters:

– Shift d of mobile object center relative to the line L_{tr} (if mobile object is situated to the left of line L_{tr} , shift is considered to be negative, otherwise it is positive);

– Rotation angle α of the mobile object relative to the line L_{tr} (clockwise direction is considered to be positive). Note that if the object is rotated to the left relative to the line L_{tr} , then $\alpha > \pi$ and we can consider negative angle $\alpha - 2\pi$.

Consider the regulation function $\varphi = \varphi(d, \alpha)$, which, depending on the shift d and rotation angle α , returns angular velocity $\omega : |\omega| \leq \omega_{max}$ the mobile object needs to reach until the next measurement of shift and angular velocity, or a certain big number $W \gg \omega_{max}$, which means that the mobile object needs to stop.

Definition 4. The regulation function $\varphi_R(d, \alpha)$ is correct if for all possible trajectories $tr(G_{r_i}) \in TR(G_{r_i})$ it returns such a sequence of angular velocities $\{\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_m\}$, that track $\theta(\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_m) \in \Theta_R(r_i)$.

Denote the family of correct regulation functions by $\Phi = \Phi(d, \alpha)$.

Definition 5. The track $\theta = \theta(\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_m)$ is called a track according to regulation function $\varphi(d, \alpha)$, if

$$\forall i = \overline{1, n} : \omega_i = \varphi(d_{i-1}, \alpha_{i-1}),$$

where d_k and α_k are the values of mobile object shift and rotation angle respectively at time $k\tau_{min}$.

Denote such track by θ_φ . Note that as φ is a correct regulation function, $\theta_\varphi \in \Theta_R(r_i)$.

Then the formal model of mobile objects control is as follows:

$$\max_{\substack{tr(G_{r_i}) \in TR(G_{r_i}) \\ \{\tau_j\}}} \frac{|\theta_\varphi|}{|L_{tr}(G_{r_i})|} \rightarrow \min_{\varphi \in \Phi}, \quad (3)$$

where $|L_{tr}(G_{r_i})|$ is the length of line equidistant from the borders of the trajectory; $\{\tau_j\}, j \in J$ are time dependencies.

Optimization problem (3) is the task of finding such a regulation function φ , that the given initial conditions provides the mobile object movement along the track which is the closest to the line L_{tr} .

4 FUZZY MODEL DEVELOPMENT IN MOBILE OBJECTS CONTROL OPTIMIZATION PROBLEMS

Note that as family $\Phi(d, \alpha)$ can correspond to an infinite number of functions $\varphi(d, \alpha)$, and also checking the

correctness of regulation function is a rather difficult problem [3], it doesn't seem possible to find an exact solution of problem (3). That's why we propose to search the suboptimal function $\varphi^*(d, \alpha)$, that is, such a function φ^* , for which we have

$$1,00 \leq \max_{\substack{tr(G_{r_i}) \in TR(G_{r_i}) \\ \{\tau_j\}}} \frac{|\theta_{\varphi^*}|}{|L_{tr}(G_{r_i})|} < 1,02, \quad (4)$$

that is, track θ_{φ^*} is not more than 2 % longer than line

$$L_{tr}(G_{r_i}).$$

One of the simplest approaches to solve this problem is a formal definition of the function $\varphi^*(d, \alpha)$. Use the fact that we know the form of the trajectory $tr(G_{r_i})$ and, thus, the form of line L_{tr} : if the assumptions 1) – 8) are correct, it can be represented as a sequence of segments and arcs. Then after the next measurement of parameters d_k и α_k the value $\omega_{k+1} = \varphi(d_k, \alpha_k)$ can be found using the following considerations [5]:

- If $d_k \leq 0$ and $\alpha_k < 0$, then mobile object is moving to the left away from line L_{tr} , so we need to turn it to the right with maximum possible angular speed: $\omega_{k+1} = \omega_{\max}$;
- Similarly, if $d_k \geq 0$ and $\alpha_k > 0$, then mobile object is moving to the right away from line L_{tr} and $\omega_{k+1} = -\omega_{\max}$;
- If $\alpha_k = 0$, then mobile object is moving parallel to the line L_{tr} and we don't need to turn: $\omega_{k+1} = 0$;
- If $d_k < 0$ and $\alpha_k \geq 0$, then mobile object is approaching to the line L_{tr} from the left, and we need to choose in such a way that when mobile object reaches the line L_{tr} , its rotation angle is as close to zero as possible;
- If $d_k > 0$ and $\alpha_k \leq 0$, we should choose ω_{k+1} similarly.

As a result, we receive the regulation function φ^* , which is defined as follows:

$$\varphi^*(d, \alpha) = \begin{cases} \omega_{\max} & \text{if } d \leq 0 \text{ and } \alpha \leq 0, \\ -\omega_{\max} & \text{if } d \geq 0 \text{ and } \alpha > 0, \\ \min\left(\frac{v_{\max}(1-\cos\alpha)}{d}, \omega_{\max}\right) & \text{if } d > 0 \text{ and } \alpha \leq 0, \\ \max\left(\frac{v_{\max}(1-\cos\alpha)}{d}, -\omega_{\max}\right) & \text{if } d < 0 \text{ and } \alpha \geq 0, \\ 0 & \text{if } d = 0 \text{ and } \alpha = 0. \end{cases} \quad (5)$$

The experiment showed that the resulting function φ^* in our model provides good mobile objects control.

However, this approach has several disadvantages.

Firstly, it works only for the given model of mobile object moving. If the obstacles appear on its path, or traction with surface is not big enough to neglect its skid, function will not provide good control any more.

Secondly, this approach requires the exact values of parameters d and α to be measured, and these measurements requires a rather expensive machine vision system.

Thirdly, to provide the safe mobile object movement, the parameters measurements should be performed rather often. This reduces the life of the machine vision system.

We propose another approach – that is, fuzzy model development to find the function φ^* . On the one hand, fuzzy model is more universal and doesn't use the assumptions about mobile object movement. On the other hand, it doesn't require the exact values of parameters d and α – we only need to know the classes they belong to.

In [7] it was proposed to use the models of fuzzy inference in form

$$\{ \text{if } x \text{ is } \mu(x) \text{ then } y \text{ is } \mu(y) \}. \quad (6)$$

to solve problems on fuzzy variables.

To develop the fuzzy model we propose the method consisting of the following steps:

Step 1. Define fuzzy terms and their membership functions for parameters d , α and ω .

It was decided to choose 6 fuzzy terms for each parameter:

Shift \bar{d} : «Big negative» – \tilde{d}_1 , «Medium negative» – \tilde{d}_2 , «Small negative» – \tilde{d}_3 , «Small positive» – \tilde{d}_4 , «Medium positive» – \tilde{d}_5 , «Big positive» – \tilde{d}_6 ;

Rotation angle $\bar{\alpha}$: «Big negative» – $\tilde{\alpha}_1$, «Medium negative» – $\tilde{\alpha}_2$, «Small negative» – $\tilde{\alpha}_3$, «Small positive» – $\tilde{\alpha}_4$, «Medium positive» – $\tilde{\alpha}_5$, «Big positive» – $\tilde{\alpha}_6$;

Angular velocity $\bar{\omega}$: «Big negative» – $\tilde{\omega}_1$, «Medium negative» – $\tilde{\omega}_2$, «Small negative» – $\tilde{\omega}_3$, «Small positive» – $\tilde{\omega}_4$, «Medium positive» – $\tilde{\omega}_5$, «Big positive» – $\tilde{\omega}_6$.

For all the fuzzy terms it was decided [8] to choose the membership functions in the form

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{(x-h)^2}{2 \cdot \sigma^2}, & x \in [x_{\min}, x_{\max}], \\ 0, & x \notin [x_{\min}, x_{\max}], \end{cases} \quad (7)$$

where h is an average value of the membership function; σ is the steepness of the membership function; segment $[x_{\min}, x_{\max}]$ equals to $[-1, 0]$ for fuzzy terms corresponding to negative parameters values, and equals to for fuzzy terms corresponding to positive parameters values.

Step 2. Form the following system of production rules:

$$R_{ij} : \text{If } d \in \tilde{d}_i \text{ and } \alpha \in \tilde{\alpha}_j \text{ with weight } w_{ij} \text{ then } \omega \in \tilde{\omega}_k,$$

where \tilde{d}_i , $\tilde{\alpha}_j$, $\tilde{\omega}_k$ are fuzzy terms for parameters d , α and ω respectively.

To do this, we decided to use the formula (5) being universal for the given control model. To define approximately, which parameters belong to which fuzzy terms, we can divide the segment $[-1,1]$ into 6 equal parts.

Step 3. Generate a training sample to adjust the fuzzy model parameters, that is, fuzzy terms distribution parameters $\tilde{d}_i, \tilde{\alpha}_j, \tilde{\omega}_k$ and rules weights w_{ij} .

It was decided to generate $N = 50$ random pairs of parameters (d_i, α_i) , and then use formula (5) to define ω_i .

Step 4. Adjust the received fuzzy model to make the error $\varepsilon_\tau \rightarrow 0$.

The problem of optimal adjustment of the model $F = F(P, W)$ can be formulated as a problem of minimizing the discrepancy of the function $y^F(X)$ on the learning sample:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\bar{\omega}(X_j) - y^F(X_j))^2 \rightarrow \min_{(P,W) \in G}, \quad (8)$$

where G is the set of constraints for vectors P and W .

To solve the problem (8) it was decided to use the modified method of very fast annealing.

Thus, we received the fuzzy model F . To make a decision if it can be applied in practice, we need to check its adequacy.

5 MODEL ADEQUACY IN PRACTICAL APPLICATIONS

After we defined the parameters of fuzzy model F , we need to check its adequacy. If regulation function $\varphi(d, \alpha)$ corresponding to this model is not correct, then the model is inadequate and we need to readjust it.

To check the mode adequacy it is proposed to simulate the process of movement of mobile object r_i along the trajectory according to fuzzy model F with different possible values of initial parameters d_0 and α_0 (that is, initial shift and rotation angle) and different trajectories $tr(G_{r_i})$.

The simulation showed that for the values $s = 2 m$, $a = 2 m$, $b = 1.2 m$, $\delta_{\min} = 0.1 m$, $v_{\max} = 2 m/s$,

$\tau_{\min} = 0,05 s$, $\alpha_{\max} = \frac{\pi}{6}$, $\omega_{\max} = \frac{2\pi}{3} s^{-1}$ the model is adequate – the mobile object moves along the correct track for all possible d_0 and α_0 .

Fig. 2 shows an example of modeling the movement of mobile object r_i along the trajectory $tr(G_{r_i})$. Here line L_{tr} equidistant from the trajectory borders is dashed, and track $\theta(r_i)$ of mobile object is a solid line. The initial point of mobile object is indicated by the circle.

Fig. 2 shows that the error of the trajectory

$$\varepsilon = \frac{|L_\phi - L_u|}{L_u}, \quad (9)$$

where $L_u = |L_{tr}(G_{r_i})|$ is the length of the estimated track and $L_\phi = |\theta_\phi|$ is the length of actual track, tends to zero, and $\varepsilon \geq 0$.

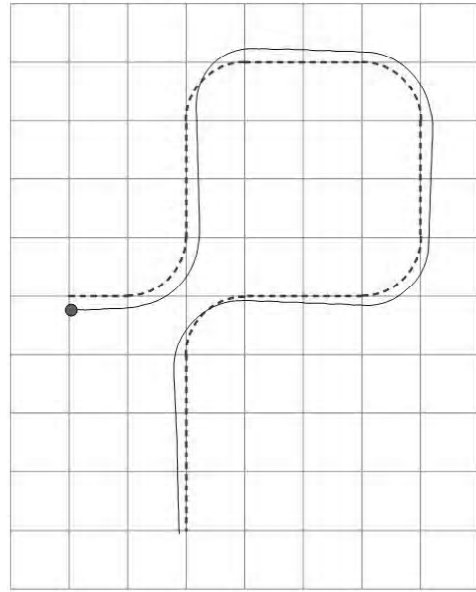


Fig. 2. Example of modeling the mobile object movement according to fuzzy model F

In the experiment on the length $L \leq 300 m$ it was obtained that $\varepsilon < 0,015$, and it meets the suboptimality criterion (4).

CONCLUSIONS

1. An analytical review of existing models and methods for solving applied problems is made. The necessity of developing fuzzy models for mobile objects is shown.

2. A new formal model of mobile objects control is developed. This model represents the minimization of the ratio of actual and estimated track lengths.

3. Fuzzy model as a set of production rules has been further developed. This model, unlike the existing ones, allows minimizing the error of mobile objects control. The adequacy of the developed models has been confirmed.

SPISOK LITERATURY

1. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : Физматлит, 2003. – 432 с.
2. Rutkowski, L. Computational intelligence – methods and techniques / L. Rutkowski. – Springer, 2008. – 514 p.
3. Кучеренко, Е. И. Стохастические модели и методы субоптимальной маршрутизации сложных объектов. / Е. И. Кучеренко, А. Д. Дрюк // Бионика интеллекта. – 2013. – №1 (80). – С. 45–53.
4. Тимченко, Д. Н. Синтез логико-динамической системы оптимального управления нелинейным неголономным объектом типа «мобильный робот» / Д. Н. Тимченко // Технические науки в России и за рубежом: материалы междунар. науч. конф. (г. Москва, май 2011 г.). – М. : Ваш полиграфический партнер, 2011. – С. 43–48.
5. Атанов, С. К. Программные средства реализации адаптивных моделей с нечеткой логикой / С. К. Атанов // Вестник науки КазАТУ им. С. Сейфуллина. – 2009. – №2. – С. 27–30.

6. *Mucientes, M. Learning Fuzzy Robot Controllers to Follow a Mobile Object / M. Mucientes, J. Casillas // International Conference on Machine Intelligence (Tozeur, Tunisia, November 2005). – P. 566–573.*
7. *Tsoukalas, L. H. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering / L. H. Tsoukalas, R. E. Uhrig. – John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 1996. – 587 p.*
8. *Zimmermann, H.-J. Fuzzy Set Theory and its Applications. 3rd ed. / H.-J. Zimmermann. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996. – 315 p.*

Стаття надійшла до редакції 30.01.2014.

Кучеренко Е. И.¹, Дрюк А. Д.²

¹Д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

²Аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

Выполнен аналитический обзор существующих моделей и методов решения прикладных задач. Показана необходимость разработки нечетких моделей мобильных объектов. Разработана новая формальная модель управления мобильными объектами как минимизация ошибки управления. Показано, что проблема оптимального управления системой мобильных объектов заключается в нахождении некоторой оптимальной (либо субоптимальной) функции управления мобильным объектом. В зависимости от значений определенных внешних параметров эта функция принимает значение, определяющее дальнейшее направление движения мобильного объекта.

Одним из наиболее перспективных подходов к оптимизации функции управления представляется разработка и настройка нечеткой модели движения мобильного объекта. Разработка модели на основе нечетких правил обеспечит универсальность модели. Получила дальнейшее развитие нечеткая модель в виде множества правил продукции, которая, в отличие от существующих моделей, позволяет оптимизировать управление мобильными объектами. Подтверждена адекватность моделей. Показано, что полученная модель обеспечивает хорошее управление мобильными объектами.

Ключевые слова: мобильный объект, нечеткая модель, управление движением, правила продукции, адекватность модели, траектория.

Кучеренко Є. І.¹, Дрюк О. Д.²

¹Д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

²Аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

НЕЧІТКІ МОДЕЛІ У ЗАДАЧАХ КЕРУВАННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ

Виконано аналітичний огляд існуючих моделей та методів розв'язання прикладних задач. Показано необхідність розробки нечітких моделей мобільних об'єктів. Розроблено нову формальну модель керування мобільними об'єктами як мінімізацію помилки керування. Показано, що проблема оптимального керування системою мобільних об'єктів полягає у знаходженні деякої оптимальної (або субоптимальної) функції керування мобільним об'єктом. Залежно від значень певних зовнішніх параметрів ця функція приймає значення, що визначає подальший напрямок руху мобільного об'єкта.

Одним з найбільш перспективних підходів до оптимізації функції керування представляється розробка та налагодження нечіткої моделі руху мобільного об'єкта. Розробка моделі на основі нечітких правил забезпечить універсальність моделі. Отримала подальший розв'язок нечітка модель у вигляді множини правил продукції, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє оптимізувати керування мобільними об'єктами. Підтверджено адекватність моделей. Показано, що отримана модель забезпечує добре управління мобільними об'єктами.

Ключові слова: мобільний об'єкт, нечітка модель, керування рухом, правила продукції, адекватність моделі, траса, траєкторія.

REFERENCES

1. Yemelyanov V. V., Kureychik V. M. Theory and practice of evolutionary modeling. Moscow, Fizmatlit, 2003, 432 p.
2. Rutkowski L. Computational intelligence – methods and techniques. Springer, 2008, 514 p.
3. Kucherenko Ye. I., Driuk A. D. Stochastic models and methods of suboptimal routing of complex objects, *Bionics of Intelligence*, 2013, No. 1 (80), pp. 45–53.
4. Timchenko D. N. Synthesis of the logic dynamic system of optimal control of a nonlinear nonholonomic object of type «mobile robot», *Engineering science in Russia and abroad: Proceedings of International scientific conference (Moscow, May 2011)*, Moscow, 2011, pp. 43–48.
5. Atanov S. K. Software implementation of adaptive fuzzy models, *Journal Science of KazATU named after S. Seifullin*, 2009, No. 2, pp. 27–30.
6. Mucientes M., Casillas J. Learning Fuzzy Robot Controllers to Follow a Mobile Object, *International Conference on Machine Intelligence (Tozeur, Tunisia, November 2005)*, 2005, pp. 566–573.
7. Tsoukalas L. H., Uhrig R. E. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering. New York, John Wiley&Sons. Inc, 1997, 587 p.
8. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and its Applications. 3rd ed. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1996, 315 p.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА КРУГЛОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО ПОДХОДОВ

Предложены уравнения изгиба трехслойных круглых пластин симметричного строения с изотропными наружными слоями и нелинейно-упругим наполнителем. На основе полученных уравнений разработана компьютерная модель в системе Maple. Построена трехмерная конечно-элементная модель круглой трехслойной пластинки. В качестве примера, рассмотрена задача осесимметричного поперечного изгиба трехслойной круглой пластинки в линейной постановке, а также задача осесимметричного поперечного изгиба однослойной пластины в линейной и нелинейной постановке.

Ключевые слова: компьютерная модель, круглая трехслойная пластина, аналитическое решение, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование позволяет заменить исследование физического образца вычислительным экспериментом и является одним из методов исследования сложных систем. При этом в основе компьютерной модели, как правило, лежат математические уравнения и системы уравнений. Основные подходы при получении определяющих соотношений модели: аналитический подход на базе распространенных систем компьютерной алгебры, численные исследования. Следовательно, актуальным является сопоставление результатов таких исследований. Совместное использование аналитического и численного подхода позволяет рассмотреть объект с разных сторон, используя разные гипотезы, сформировать область допустимых решений.

Трехслойные элементы конструкций широко применяются в авиа- и судостроении, космической промышленности, гражданском строительстве, радиоэлектронике и др. отраслях промышленности. Поэтому актуальной является проблема разработки эффективных методов расчета напряженно-деформированного состояния трехслойных элементов конструкций, а также обобщения классических теорий с применением уточненных моделей, отражающих поведение современных материалов.

В настоящей работе приводится вариант уравнений изгиба трехслойных пластин симметричного строения с изотропными наружными слоями и нелинейно-упругим по [1] материалом наполнителя; построена компьютерная модель на базе пакета символьных вычислений Maple (аналитическая модель).

Предложена трехмерная конечно-элементная модель трехслойной пластинки, на основе которой получены численные оценки параметров состояния трехслойной конструкции. На примере задачи осесимметричного поперечного изгиба трехслойной круглой пластинки проводится сравнение полученных моделей с известными

ми работами [2, 3, 4]. В качестве частного случая решена задача осесимметричного поперечного изгиба однослойной пластины в линейной и нелинейной постановке; результаты сравниваются с работами [1, 5].

1 АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим круглую трехслойную пластинку, которая подвергается воздействию поперечной нагрузки $q(r)$, распределенной симметрично относительно оси, проходящей через центр пластины. Внешние слои пластинки толщиной δ изготовлены из изотропного материала, подчиняющегося закону Гука. Средний слой пластины толщиной $2h$ выполнен из нелинейно-упругого по [1] изотропного материала.

Деформированное состояние пластинки определяется радиальным перемещением $u(r)$ и прогибом $w(r)$.

Дифференциальные уравнения равновесия круглой трехслойной пластины в общем случае произвольной нагрузки приведены в [5]. Принимая во внимание симметрию деформированного состояния пластины и отсутствие угловых перемещений в данной постановке задачи, нелинейные дифференциальные уравнения равновесия с переменными коэффициентами имеют вид

$$A_{11}w_{,rrr} + A_{12}w_{,rr} + A_{13}u_{,rr} + A_{14}w_{,r} + A_{15}u_{,r} + A_{16}u(r) + \Phi_1(u^3, w^3, \dots) = 0, \quad (1)$$

$$A_{21}w_{,rrrr} + A_{22}w_{,rrr} + A_{23}u_{,rrr} + A_{24}w_{,rr} + A_{25}u_{,rr} + A_{26}w_{,r} + A_{27}u_{,r} + A_{28}u(r) - rq + \Phi_2(u^3, w^3, \dots) = 0.$$

Нелинейные члены уравнений (1.4) $\Phi_1(u^3, w^3, \dots)$ и $\Phi_2(u^3, w^3, \dots)$, а также коэффициенты $A_{11}..A_{16}$, $A_{21}..A_{28}$ приведены в [6], здесь не приводятся ввиду их громоздкости.

Граничные условия для свободного опирания имеют следующий вид [4]:

$$w(r) = 0, w_{,rr} + \frac{\mu}{r} w_{,r} = 0, u_{,r} + \frac{\mu}{r} u(r) = 0 \text{ при } r = R.$$

Граничные условия при защемлении на контуре имеют следующий вид [4]:

$$w(r) = 0, w_{,r} = 0, u(r) = 0 \text{ при } r = R.$$

Одним из подходов к решению системы нелинейных уравнений (1) является метод разложения по малому параметру [1, 7, 8], который позволяет рассматривать нелинейные задачи как последовательность уточняющих друг друга решений систем линейных уравнений. В свою очередь, рассматриваемые системы линейных уравнений в данном случае могут быть сведены к уравнению Бесселя, решение которого известно [2].

Построение компьютерной модели с помощью пакета Maple проводилось в несколько этапов: описание напряженного состояния пластины; описание деформированного состояния пластины; получение функционала энергии; вывод дифференциальных уравнений равновесия на основе принципа Лагранжа аналогично [9]. Приведем команды пакета Maple, описывающие напряженное состояние пластины.

Закон Гука для внешних слоев пластины [10]:

$$\begin{aligned} \sigma[1,r] &:= E/(1-\mu^2) * (\epsilon[1,r] + \mu * \epsilon[1,\phi]); \\ \sigma[1,\phi] &:= E/(1-\mu^2) * (\epsilon[1,\phi] + \mu * \epsilon[1,r]); \\ \tau[1,r\phi] &:= G12 * \epsilon[1,r\phi]; \\ \sigma[2,r] &:= E/(1-\mu^2) * (\epsilon[2,r] + \mu * \epsilon[2,\phi]); \\ \sigma[2,\phi] &:= E/(1-\mu^2) * (\epsilon[2,\phi] + \mu * \epsilon[2,r]); \\ \tau[2,r\phi] &:= G12 * \epsilon[2,r\phi]; \end{aligned}$$

Закон упругости для среднего слоя [4]:

$$\begin{aligned} \tau[3,r\phi] &:= G[3] * \gamma[3] * \epsilon[3,r\phi]; \\ \tau[3,rz] &:= G[3] * \gamma[3] * \epsilon[3,rz]; \\ \tau[3,\phi z] &:= G[3] * \gamma[3] * \epsilon[3,\phi z]; \\ \sigma[3,r] &:= 3 * K[3] * \chi[3] * \epsilon[3,r] + 2 * G[3] * \gamma[3] * (\epsilon[3,r] - \epsilon[3,\phi]); \\ \sigma[3,\phi] &:= 3 * K[3] * \chi[3] * \epsilon[3,\phi] + 2 * G[3] * \gamma[3] * (\epsilon[3,\phi] - \epsilon[3,r]); \end{aligned}$$

Использование системы компьютерной алгебры Maple существенно упрощает оперирование с громоздкими выражениями и позволяет автоматизировать процесс получения дифференциальных уравнений задачи из основных уравнений теории упругости.

2 КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим решение задачи исследования напряженно-деформированного состояния равномерно нагруженной круглой трехслойной пластинки в конечно-элементной постановке. Учитывая симметричность поставленной задачи достаточно исследовать лишь сектор пластинки (рис. 1), у которого для узлов, соответствующих грани OA, запрещено перемещение в направлении 2, а узлам на грани OB запрещено перемещение в на-

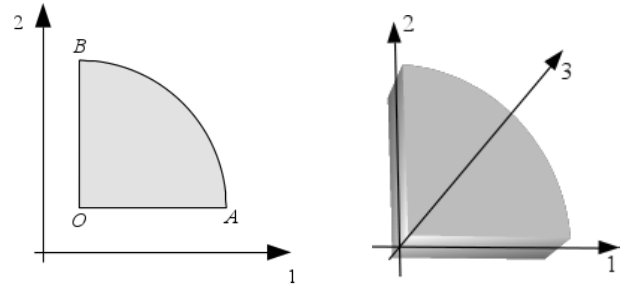


Рис. 1. Геометрическая модель пластинки

правлении 1. При этом учет кусочной неоднородности (слоистости) пластинки приводит к необходимости исследования конструкции в трехмерной постановке.

Используя аппарат теории R-функций В. Л. Рвачева [11, 12] геометрическая модель может быть формализована при помощи выражения

$$f(x,y,z) = (r^2 - x^2 - y^2) \wedge x \wedge y \wedge (z + h + \delta_1) \wedge (h + \delta_2 - z),$$

где r – радиус пластинки; x, y, z – пространственные координаты; операция $x_1 \wedge x_2 \equiv x_1 + x_2 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ – R-конъюнкция.

Функция $f(x,y,z)$ принимает значения больше нуля во внутренних точках сектора пластинки, равна нулю на его границе и меньше нуля во внешних точках (боковые грани ограничены плоскостями $x = 0$ и $y = 0$, нижняя грань плоскостью $z = -(h + \delta_2)$, а верхняя $z = h + \delta_1$). Следовательно, $f(x,y,z)$ может быть использована в качестве предиката (управляющей функции) для автоматической генерации системы конечных элементов.

Для обеспечения большей точности моделирования при построении дискретной модели необходимо учесть структуру слоев: границы слоев должны аппроксимироваться границами элементов (т. е. вдоль границы слоя материала должна проходить граница слоя конечных элементов). Удовлетворение этого требования совместно с учетом ограничения на соотношение размеров сторон при построении сетки шестигранных элементов [13–15] приводит к относительно большому числу конечных элементов. Например, при $r = 0,4$, $\delta_1 = \delta_2 = 0,001$ и $2h = 0,016$ сетка состоит из 102277 узлов и 94032 конечных элементов. Опытным путем установлено, что если соотношение сторон элементов превышает 10, то вычислительный процесс дает значительно большую погрешность.

С учетом трехслойности, формула для вычисления локальной матрицы жесткости $[K^e]$ примет вид

$$[K^e] = \iiint B^T D B dx dy dz,$$

где

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & \dots & H_8 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & H_1 & H_2 & \dots & H_8 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & H_1 & H_2 & \dots & H_8 \end{bmatrix},$$

$$D = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \times \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{cases} E_{12}, & z \geq h \text{ или } z \leq -h, \\ \tilde{E}, & -h \leq z \leq h, \end{cases} \quad \mu = \begin{cases} \mu_{12}, & z \geq h \text{ или } z \leq -h, \\ \tilde{\mu}, & -h \leq z \leq h, \end{cases}$$

где E_{12} и μ_{12} – модуль упругости и коэффициент Пуассона внешних слоев; \tilde{E} и $\tilde{\mu}$ – модуль упругости и коэффициент Пуассона внутреннего слоя.

Матрица жесткости вычисляется для каждого конечного элемента и затем производится ее ансамблирование (суммирование по специальным правилам) в глобальную матрицу жесткости, которая совместно с вектором узловых нагрузок определяет СЛАУ для вычисления перемещений в узлах.

При этом найденные перемещения в третьем направлении будут соответствовать прогибам пластинки.

3 СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА КРУГЛЫХ ОДНОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН

В качестве частного случая рассмотрим поперечный изгиб круглой однослойной пластинки (толщина пластинки $h = 18 \cdot 10^{-3}$ м, радиус $R = 0,4$ м; модуль сдвига и коэффициент Пуассона материала – $G = 8 \cdot 10^4$ МПа и $\mu = 0,27$ соответственно) и сопоставим полученные значения с решением Тимошенко [5] для равномерно нагруженной круглой пластинки. В табл. 1 приводятся результаты такого сопоставления. Через w_{\max} обозначен максимальный прогиб в центре пластинки; q – величина равномерно распределенной поперечной нагрузки. Модели, используемые при расчетах, обозначены в табл. 1 следующим образом: 1 – аналитическая модель, 2 – конечно-элементная модель, 3 – модель Тимошенко круглой однослойной пластинки [5].

Из сопоставления значений прогибов в табл. 1 можно сделать вывод о соответствии построенных моделей решению Тимошенко [5]. Прогибы, полученные по аналитической модели, с точностью до шестого знака после запятой совпадают с прогибами модели Тимошенко. Для свободного опирания отклонения прогибов конечно-элементной модели от прогибов Тимошенко находятся в пределах 2,7%–2,8%; для защемления – 3,7%–3,9%. Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности построенных моделей модели Тимошенко и возможности их применения для дальнейшего исследования прогибов слоистых пластин. Разница численных значений прогибов конечно-элементной модели и модели [5] объясняется использованием гипотезы Кирхгофа-Лява в модели Тимошенко, в отличие от конечно-элементной модели.

Рассмотрим задачу изгиба однослойной круглой пластинки из нелинейно-упругого материала. Сравним полученные значения с результатами Каудерера [1]. Примем следующие параметры пластинки: толщина пластинки $h = 18 \cdot 10^{-3}$ м, радиус пластинки $R = 0,4$ м; модуль

Таблица 1. Изгиб круглой однослойной пластинки в линейной постановке

q, МПа	$w_{\max} = w(0), 10^{-3}$ м					
	Тип закрепления					
	Свободное опирание			Защемление		
	Модель			Модель		
	1	2	3	1	2	3
0,05	0,779	0,800	0,779	0,188	0,195	0,188
0,07	1,090	1,121	1,090	0,263	0,273	0,263
0,09	1,402	1,441	1,402	0,338	0,351	0,338
0,11	1,714	1,761	1,714	0,413	0,429	0,413

сдвига и модуль объемной деформации материала – $G = 2,77 \cdot 10^4$ МПа, $K = 6 \cdot 10^4$ МПа, параметр $\gamma_2 = -3,878 \cdot 10^5$ [1, 16]. Вычисления производятся для случая защемления контура пластинки. Модели, используемые при расчетах, обозначены в табл. 2 следующим образом: 1 – аналитическая модель, 2 – решение Каудерера [1].

Таблица 2. Изгиб круглой однослойной пластинки в нелинейной постановке

q , МПа	$w_{\max} = w(0), 10^{-3}$ м	
	Модель	
	1	2
0,05	0,529	0,523
0,07	0,756	0,740
0,09	1,000	0,977
0,11	1,275	1,329

При вычислении значений прогибов табл. 2 учитывались три приближения в разложении по методу малого параметра.

Как видно из табл. 2, отклонения значений прогибов аналитической модели от прогибов [1] находятся в пределах 1%–4%, что говорит о возможности применения аналитической модели для решения нелинейных задач теории пластин.

4 СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА КРУГЛЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН

Поскольку нулевое приближение дает наиболее существенный вклад в разложение искомых перемещений по малому параметру, исследуем далее задачу о поперечном изгибе круглой трехслойной пластинки в линейной постановке и проведем сравнительный анализ полученных решений с известными результатами.

Рассмотрим поперечный изгиб круглой трехслойной пластинки со следующими параметрами: толщина среднего слоя $2h = 16 \cdot 10^{-3}$ м, толщина внешних слоев $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ м, радиус пластинки $R = 0,4$ м; модуль сдвига и коэффициент Пуассона внешних слоев – $G = 8 \cdot 10^4$ МПа

и $\mu = 0,27$ соответственно, модуль сдвига и модуль объемной деформации заполнителя – $\tilde{G} = 2,77 \cdot 10^4$ МПа, $\tilde{K} = 6 \cdot 10^4$ МПа. Тангенциальные напряжения изменяются линейно по толщине среднего слоя.

В табл. 3 приводятся значения максимального прогиба в центре пластины в линейной постановке при различных граничных условиях. Значения максимального прогиба в центре пластинки, полученные из работ [2–4], сопоставляются со значениями прогибов полученными из решения уравнений (1) и прогибами конечно-элементной модели. Модели, используемые при расчетах, обозначены в табл. 3 следующим образом: 1 – аналитическая модель, 2 – конечно-элементная модель; 3 – модель И. А. Михайлова [3], 4 – модель А.П. Прусакова [4], 5 – модель А. Г. Горшкова и др. [2].

Из сравнения полученных значений максимальных прогибов приведенных в табл. 3 можно сделать вывод о соответствии результатов полученных на основе построенных в работе аналитической и конечно-элементной моделей результатам известных моделей [2–4]. В силу различных упрощающих гипотез значения прогибов табл. 3 можно рассматривать как разные оценки области точного решения. Наблюдаются следующие значения отклонений рассматриваемых моделей: аналитическая модель и конечно-элементная модель – 8%–11%; модель И. А. Михайлова [3] – 1%–45%; модель А. П. Прусакова – 30%–80%; модель А. Г. Горшкова [2] – 16%–55% для случая защемления.

На рис. 2 приведены прогибы срединной плоскости трехслойной пластинки для случая свободного опирания (рис. 2, а) и для случая защемления на контуре (рис. 2, б); значение нагрузки принимается $q = 0,11$ МПа.

Отклонения табл. 3 объясняются тем, что при построении аналитической модели и моделей [2–4] применялись различные упрощающие гипотезы и как следствие, в тензорах напряжений и деформаций учитывалось различное количество компонент. Так, при построении конечно-элементной модели учитывались все компоненты тензора напряжений и тензора деформаций (трехмерная постановка задачи), а в аналитической модели – в зависимости от слоя от (трех до пяти).

Таблица 3. Изгиб трехслойной круглой пластинки в линейной постановке

q , МПа	$w_{\max} = w(0), 10^{-3}$ м								
	Тип закрепления								
	Свободное опирание				Защемление				
	Модель				Модель				
	1	2	3	4	1	2	3	4	5
0,05	1,606	1,449	1,430	2,621	0,388	0,357	0,348	0,635	0,291
0,07	2,248	2,029	2,001	3,670	0,543	0,499	0,487	0,889	0,407
0,09	2,891	2,609	2,573	4,718	0,698	0,642	0,626	1,142	0,523
0,11	3,533	3,188	3,145	5,767	0,853	0,784	0,765	1,396	0,639

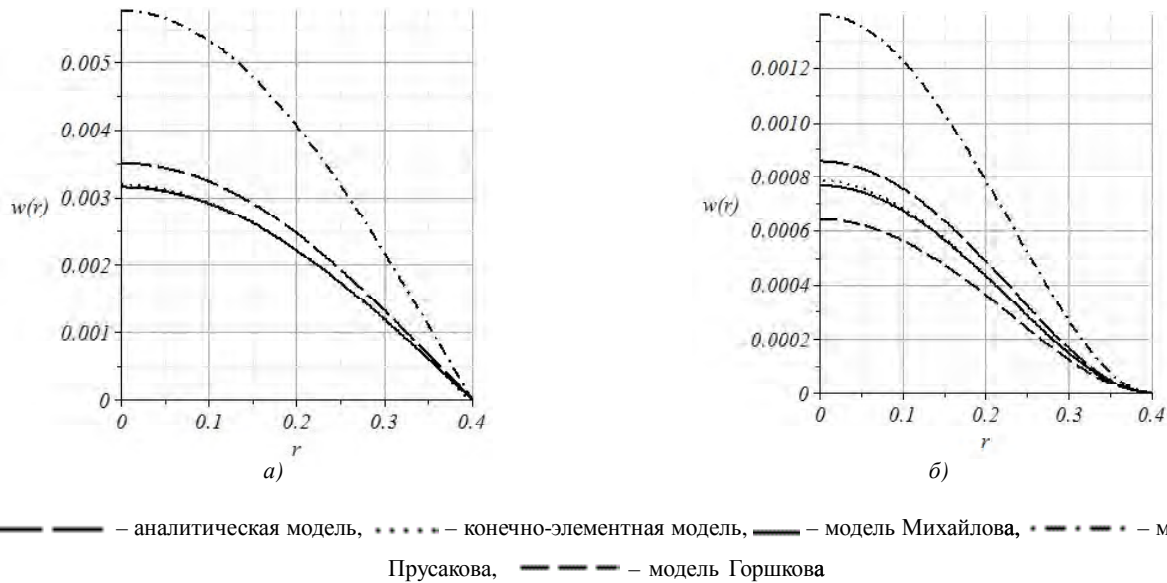


Рис. 2. Прогиб срединной плоскости в случае распределенной нагрузки

ВЫВОДЫ

Разработана компьютерная модель на базе нового варианта дифференциальных уравнений равновесия круглых трехслойных пластин. Пластины считаются симметричными по толщине с изотропными наружными слоями и нелинейно-упругим по [1] материалом заполнителя. Построена трехмерная конечно-элементная модель.

В качестве примера рассмотрена задача осесимметричного поперечного изгиба однослойной круглой пластинки в линейной и нелинейной постановке. Также рассмотрена задача осесимметричного поперечного изгиба трехслойной круглой пластинки в линейно-упругой постановке.

Отметим, что приведенные в табл. 3 модели используют различные упрощающие гипотезы, чем обуславливается разница полученных значений прогибов. Так, при построении конечно-элементной модели использовалась трехмерная постановка задачи. В модели А. Г. Горшкова [2] и И. А. Михайлова [3] для внешних слоев принимается гипотеза Кирхгофа-Лява, для заполнителя же принимаются различные гипотезы о распределении тангенциальных напряжений по толщине слоя. Существенные отклонения результатов расчетов по уравнениям модели А. П. Прусакова [4] объясняются тем, что здесь заполнитель считается легким, в отличие от других вышеупомянутых моделей.

Сравнение полученных значений прогибов на основе аналитической и конечно-элементной моделей с работами [1–5] свидетельствует об адекватности построенных моделей и возможности решения на их основе более широкого класса задач статики и динамики трехслойных пластин.

На основе аналитической модели могут быть получены компактные расчетные формулы для применения в инженерной практике. В дальнейшем, при решении систем дифференциальных уравнений первого и последующего приближений разложения по малому параметру, становится возможным учет влияния нелинейной упругости материала заполнителя на деформированное состояние трехслойной пластинки.

Недостатком трехмерной конечно-элементной модели является требование относительно большого объема вычислений, по сравнению с приведенными аналитическими моделями. Однако такой подход может использоваться для расчета многослойных пластин нестандартной формы и для проверки моделей использующих упрощающие гипотезы. Сравнение результатов аналитических решений с численными позволяет делать заключение о правильности выбранных гипотез.

Перспективы дальнейшего исследования связаны с рассмотрением задач нелинейной устойчивости и динамики трехслойных элементов конструкций, а также созданием гибридных аналитико-вычислительных подходов на базе конечных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каудерер, Г. Нелинейная механика / Каудерер Г. ; пер. с нем. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 777 с.
2. Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.

3. Михайлов, И. П. Некоторые задачи осесимметричного изгиба круглых трехслойных пластин с жестким наполнителем // Труды Ленинградского кораблестроительного института. – 1969. – Вып. 66. – С. 125–131.
4. Прусаков, А. П. Некоторые задачи изгиба круглых трехслойных пластин с легким наполнителем // Тр. конф. по теор. пластин и оболочек. – 1961. – № 1. – С. 293–297.
5. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М. : Физматгиз, 1964. – 636 с.
6. Кудин, А. В. Применение метода малого параметра при моделировании изгиба симметричных трехслойных пластин с нелинейно-упругим наполнителем / А. В. Кудин, Ю. Н. Тамуров // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2011. – № 11 (165). – С. 32–40.
7. Тамуров, Ю. Н. Вариант обобщенной теории трехслойных пологих оболочек с учетом обжатия физически нелинейного наполнителя // Прикладна механіка. – 1990. – Т. 26, № 12. – С. 39–45.
8. Тамуров, Ю. Н. Уравнения изгиба и устойчивости трехслойных оболочек с ортотропными и нелинейно-упругими свойствами материалов // Исслед. по теор. пластин и оболочек. – 1990. – № 20. – С. 102–112.
9. Liu, Renhuai Nonlinear Bending of Circular Sandwich Plates / Liu Renhuai // Applied Mathematics and Mechanics. English Edition. – 1981. – Vol. 2, No. 2. – P. 189–208.
10. Амбарцумян, С. А. Теория анизотропных пластин: Прочность, устойчивость и колебания. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1987. – 360 с.
11. Рвачев, В. Л. Новые подходы к построению уравнений трехмерных локусов с помощью R-функций / [Рвачев В. Л., Толлок А. В., Уваров Р. А., Шейко Т. И.] // Вісник Запорізького державного університету. – 2000. – № 2. – С. 119–130.
12. Рвачев, В. Л. Введение в теорию R-функций / В. Л. Рвачев, Т. И. Шейко // Проблемы машиностроения. – 2001. – Т. 4, № 1–2. – С. 46–58.
13. Гоменюк, С. И. Дискретизация трехмерных областей, заданных R функциями, на шестигранные конечные элементы / С. И. Гоменюк, С. В. Чопоров // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2011. – № 3 (42). – С. 146–153.
14. Schneiders, R. A Grid-based Algorithm for the Generation of Hexahedral Element Meshes / R. Schneiders // Engineering with Computers. – 1996. – No. 12. – P. 168–177.
15. Schneiders, R. Octree-based Generation of Hexahedral Element Element Meshes / R. Schneiders, R. Schindler, F. Weiler // 5th Annual International Meshing Roundtable. – 1996. – P. 205–216.
16. Цурпал, И. А. Расчет элементов конструкций из нелинейно-упругих материалов. К. : Техника, 1976. – 176 с.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2014.

Кудін О. В.¹, Чопоров С. В.²

¹Викладач, Запорізький національний університет, Україна

²Канд. техн. наук, доцент Запорізький національний університет, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИГІНУ КРУГЛОЇ ТРИШАРОВОЇ ПЛАСТИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ АНАЛІТИЧНОГО ТА ЧИСЕЛЬНОГО ПІДХОДІВ

Запропоновано рівняння вигину тришарових круглих пластин симетричної будови з ізотропними зовнішніми шарами і нелінійно-пружним заповнювачем. На основі отриманих рівнянь розроблено комп'ютерну модель у системі Maple. Побудована тривимірна скінченно-елементна модель круглої тришарової пластинки. В якості прикладу, розглянуто задачу вісисиметричного поперечного вигину тришарової круглої пластинки в лінійній постановці, а також задача вісисиметричного поперечного вигину одношарової пластини в лінійній і нелінійній постановці.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, кругла тришарова пластина, аналітичний розв'язок, метод скінченних елементів.

Kudin A. V.¹, Choporov S. V.²

¹Assistant Professor, Zaporizhzhya National University, Ukraine

²Ph.D., Associate professor, Zaporizhzhya National University, Ukraine

COMPUTER SIMULATION OF BENDING CIRCULAR SANDWICH PLATES USING ANALYTICAL AND NUMERICAL APPROACHES

The paper describes equations of circular symmetrical sandwich plates bending for plates with isotropic outer layers and nonlinear elastic filler. Two computer models of circular sandwich plates are proposed: 1) analytical model on the basis of Maple CAS, 2) three-dimensional FEM-model. We compare results of analytical model with results of numerical simulation using two problems: 1) the problem of axisymmetric transverse bending of a sandwich plate, 2) the problem of axisymmetric transverse bending of a single-layer plate with linear and nonlinear formulation.

The first section of the article describes basic differential equations and analytical model constructing method. FEM-model is described in the second section. Numerical results of computer simulation are showed in the last section of the article.

Keywords: computer simulation, sandwich symmetrical plate, circular plate, nonlinear-elastic core, axisymmetric bending, FEM-model.

REFERENCES

1. Kauderer G. Nelinejnaya mexanika, Per. s nem. Moscow, Izd-vo inostr. lit., 1961, 777 p.
2. Gorshkov A. G., Starovojtov E'. I., Yarovaya A. V. Mexanika slojstyx vyazkouprugoplasticheskix e'lementov konstrukcij. Moscow, FIZMATLIT, 2005, 576 p.
3. Mixajlov I. P. Nekotorye zadachi osesimmetrichnogo izgiba kruglyx trexslojnyx plastin s zhestkim zapolnitelem, *Trudy Leningradskogo korablestroitel'nogo instituta*, Vyp. 66, 1969, pp. 125–131.
4. Prusakov A. P. Nekotorye zadachi izgiba kruglyx trexslojnyx plastin s legkim zapolnitelem, *Tr. konf. po teor. plastin i obolochek*, 1961, No. 1, pp. 293–297.
5. Timoshenko S. P., Vojnovskij-Kriger S. Plastinki i obolochki. Moscow, Fizmatgiz, 1964, 636 p.
6. Kudin A. V., Tamurov Yu. N. Primenenie metoda malogo parametra pri modelirovanii izgiba simmetrichnyx trexslojnyx plastin s nelinejno-uprugim zapolnitelem, *Visnik Sxidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya*. 2011, No. 11(165), pp. 32–40.
7. Tamurov Yu. N. Variant obobshhyonnoj teorii tryoxslojnyx pologix obolochek s uchyotom obzhatiya fizicheski nelinejnogo zapolnitelya, *Prikl. mexanika*, 1990, Vol. 26, No. 12, pp. 39–45.
8. Tamurov Yu. N. Uravneniya izgiba i ustojchivosti trexslojnyx obolochek s ortotropnymi i nelinejno-uprugimi svojstvami materialov, *Issled. po teor. plastin i obolochek*, 1990, No. 20, pp. 102–112.
9. Liu Renhuai Nonlinear Bending of Circular Sandwich Plates, *Applied Mathematics and Mechanics*, English Edition, 1981, Vol. 2, No. 2, pp. 189–208.
10. Ambarcumyan S. A. Teoriya anizotropnyx plastin: Prochnost', ustojchivost' i kolebaniya. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Nauka, 1987, 360 p.
11. Rvachev V. L., Tolok A. V., Uvarov R. A., Shejko T. I. Novye podxody k postroeniyu uravnenij trexmernyx lokusov s pomoshh'yu R funkcij, *Visnik Zaporiz'kogo derzhavnogo universitetu*, 2000, No. 2, pp. 119–130.
12. Rvachev V. L., Shejko T. I. Vvedenie v teoriyu R-funkcij, *Problemy mashinostroeniya*, 2001, Vol. 4, No. 1–2, pp. 46–58.
13. Gomenyuk S. I., Choporov S. V. Diskretizaciya trexmernyx oblastej, zadannyx R funkcijami, na shestigrannye konechnye e'lementy, *Vestnik Xersonskogo nacional'nogo texnicheskogo universiteta*, 2011, No. 3(42), pp. 146–153.
14. Schneiders R. A Grid-based Algorithm for the Generation of Hexahedral Element Meshes, *Engineering with Computers*, 1996, No. 12, pp. 168–177.
15. Schneiders R., Schindler R., Weiler F. Octree-based Generation of Hexahedral Element Meshes, *5th Annual International Meshing Roundtable*, 1996, pp. 205–216.
16. Curpal I.A. Raschet e'lementov konstrukcij iz nelinejno-uprugix materialov. Kiev, Texnika, 1976, 176 p.

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ГРАНИЦЫ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ЗАДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ R-ФУНКЦИЙ

В статье рассматривается актуальная проблема автоматизации конечно-элементного разбиения поверхности геометрических объектов, заданных в виде неявных функций В.Л. Рвачева. Описаны подходы, которые позволяют повысить качество элементов сетки, полученной с использованием известных методов. Работа методов опирается на минимизацию отклонений между дифференциальными характеристиками функционального описания и дискретного представления границы геометрических объектов.

Ключевые слова: R-функция, визуализация, геометрическая модель, дискретная модель, метод конечных элементов.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Визуализация с применением вычислительной техники, определение напряженно-деформированного состояния деталей и узлов механизмов с использованием вычислительных методов (метод конечных элементов, метод граничных элементов, метод конечных разностей) требуют наличия методов формального описания инженерных конструкций, а также их автоматического разбиения на конечные элементы определенной формы [1]. Одним из перспективных методов описания конструкций или геометрических объектов является использование аналитических функций В. Л. Рвачева. Такое описание является весьма компактным и не имеет никаких теоретических ограничений для построения объектов произвольной сложности.

Автоматизация разбиения поверхности геометрического объекта на конечные элементы, особенно в случае ее функционального задания, – сложная и не имеющая однозначного решения задача [2].

Таким образом, дискретизация границы геометрических объектов, заданных с использованием аналитических функций, является актуальной задачей, решение которой весьма интересно с практической точки зрения.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Построение сетки или триангуляция заданного набора точек на плоскости хорошо изучена [3–6]. Кроме работ, посвященных построению триангуляции, существует ряд методов, направленных на автоматическую оптимизацию существующей триангуляции, которая основана на изменении связей между узлами сетки, добавлении и изменении положения узлов [7–10]. Большинство методов построения и оптимизации триангуляции разработано для плоскости, но могут быть обобщены до пространственного случая [2].

Возможности и перспективы описания границы геометрического объекта с использованием R-функций представлены в работах научной школы академика В.Л. Рвачева [11, 12].

Для построения дискретных геометрических моделей, заданных в неявном виде, существует ряд методов: методы исчерпывания, методы продолжения, методы рекурсивного деления [13–15]. Анализ этих методов показывает, что задача имеет несколько решений, которые хорошо работают в случае гладкой границы геометрического объекта. Основной проблемой, особенно в случае функционально заданной границы, является правильность расположения дискретных элементов в областях имеющих геометрические особенности. Выявление особенностей и оптимизация сетки в таких областях может качественно улучшить результаты вычислительных экспериментов и ощутимо повысить результаты компьютерной визуализации.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Пусть x – произвольная точка в двумерном или в трехмерном пространстве и $F(x) = 0$ – уравнение, множество решений которого определяет поверхности геометрического объекта. Следовательно, произвольный геометрический объект Ω может быть определен в виде

$$\partial\Omega = \{x : F(x) = 0\}. \quad (1)$$

Основной трудностью практического применения функционального подхода является сложность построения первоначального множества опорных узлов, лежащих на границе или поверхности геометрического объекта, представленного в виде (1). Эта задача равносильна поиску корней нелинейного уравнения $F(x) = 0$.

Набор точек на плоскости или поверхности, соединенных непересекающимися симплексами, образует конечно-элементную сетку на основе треугольных элементов. Пусть $P = \{x_0, x_2, \dots, x_{n-1}\}$, $x_i \in E^d$, $d = \overline{2,3}$ – набор таких точек, тогда триангуляция M набора точек P , состоящего из n элементов, является совокупностью трех множеств:

– множество номеров узлов сетки
 $V = \{v_0, v_2, \dots, v_{n-1}\};$

– множество ребер $E = \{e_0, e_1, \dots, e_{m-1}\}$, где $e_i = (v_j, v_l)$ упорядоченная пара номеров узлов, такая что $v_j < v_l, v_j \in V, v_l \in V$;

– множество треугольников $T = \{t_0, t_1, \dots, t_{k-1}\}$, где $t_i = (v_j, v_g, v_h)$, – упорядоченная тройка несовпадающих номеров узлов, такая что $v_j = \min(v_j, v_g, v_h)$ и $(v_j, v_g, v_h) \neq (v_j, v_h, v_g)$.

Следовательно, дискретное представление на базе треугольных элементов для произвольного объекта Ω может быть представлено объединением трех множеств

$$M(P) = \{V, E, T\}. \quad (2)$$

ДИСКРЕТИЗАЦИИ ГРАНЦЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Пусть MC – оператор получения конечно-элементной сетки на основе метода марширующих кубов [13, 14], тогда сетка в виде (2) для геометрического объекта $\partial\Omega$, заданного в виде (1), будет иметь вид

$$M = MC(\Delta C, \varepsilon_v), \quad (3)$$

где ΔC – линейный размер шаблона, который должен быть меньше любой геометрической особенности геометрического объекта $\partial\Omega$; ε_v – точность поиска узлов на поверхности $\partial\Omega$.

Конечно-элементную сетку в виде (3) можно с успехом использовать для предварительной визуализации трехмерных геометрических объектов (рис. 1), однако можно выделить ряд недостатков такой сетки:

- наблюдается потеря участков границы, которые соответствуют геометрическим особенностям (изломы, углы, пики) (рис. 1, а);
- элементы сетки обладают плохой формой (много «тонких» и «вытянутых» элементов) (рис. 1, б);
- отсутствуют зависимость густоты сетки от кривизны поверхности.

Для улучшения сетки можно применять методы, основанные на приведении в соответствие нормалей элементов сетки и нормалей к границе геометрического объекта, а также локальные преобразование самих элементов сетки.

Так отклонение между нормалью треугольника t сетки и нормалью к границе $\partial\Omega$ в центре данного треугольника имеет вид

$$\vec{m}(t) = \frac{\Delta F(c)}{\|\Delta F(c)\|}, \quad \varepsilon = 1 - (\vec{n}(t) \cdot \vec{m}(t))^2, \quad (4)$$

где c – центр тяжести треугольника t ; $\vec{n}(t)$ – нормаль к треугольнику t .

Тогда среднеквадратичное отклонение для всех треугольников сетки можно записать в виде

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\sum_{t \in T} A(t)} \sum_{t \in T} A(t) (1 - (\vec{n}(t) \cdot \vec{m}(t))^2), \quad (5)$$

где $A(t)$ – площадь треугольника t .

Если значение оценки (5) больше определенной величины, то положение узлов сетки, расположенных на поверхности геометрического объекта, необходимо скорректировать на величину

$$\Delta p = \frac{1}{\sum_{t \in B(p)} A(t)} \sum_{t \in B(p)} A(t) [(\vec{pc} \cdot \vec{m}(t)) \cdot \vec{m}(t)], \quad (6)$$

где \vec{pc} – вектор от узла к центру тяжести треугольника; $B(p)$ – множество треугольников, которым принадлежит узел p .

Таким образом, получим оператор преобразования вида

$$N(P): p' \leftarrow p + \Delta p, \quad p \in P. \quad (7)$$

Подобно оператору, который корректирует положение узлов сетки, оценивая разность нормалей к элементам сетки и к поверхности $\partial\Omega$, можно использовать другой оператор коррекции, основанный на минимизации суммы квадратов расстояний от узла до касательных плоскостей, проведенных к соседним узлам двойственной сетки.

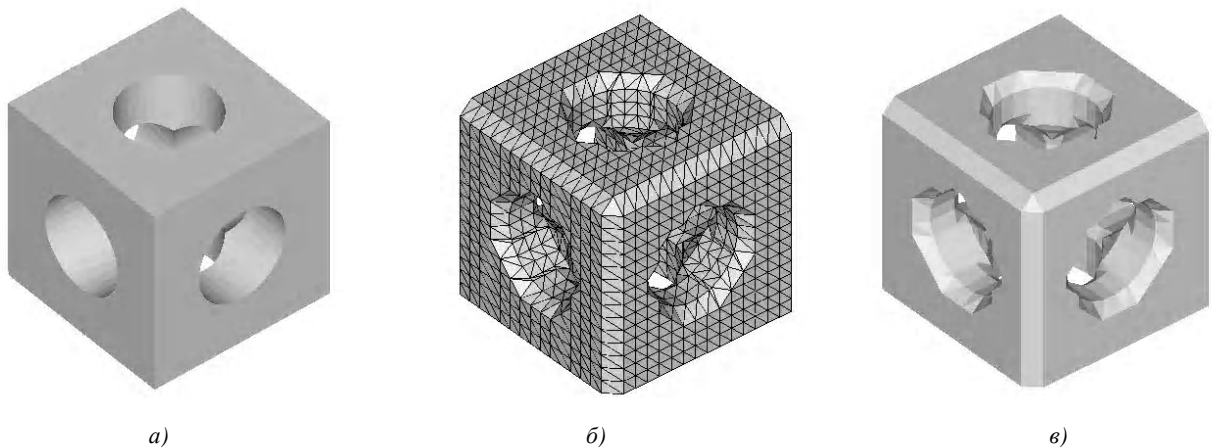


Рис. 1. Конечно-элементная сетка геометрического объекта

Двойственной, как правило, называют сетку, образованную путем соединения всех узлов, полученных проецированием центров тяжести треугольников исходной сетки на поверхность $\partial\Omega$ (рис. 2). Для каждого узла p исходной сетки, двойственная сетки может быть получена путем соединения некоторого множества $D(p)$ узлов двойственной сетки, которые получены из центров тяжести смежных с узлом p треугольников (рис. 2, б, в). Следовательно, множество $D(p)$ имеет вид

$$D(p) = \left\{ x : x = \text{proj}_{\partial\Omega}^{\vec{n}(t)}(c_t), t \in B(p) \right\},$$

где $B(p)$ – множество смежных с узлом p треугольников; c_t – центр тяжести треугольника t ; $\text{proj}_{\partial\Omega}^{\vec{n}(t)}(c_t)$ – проекция c_t в направлении вектора нормали к треугольнику $\vec{n}(t)$ на поверхность $\partial\Omega$.

Для каждого узла двойственной сетки можно построить касательную плоскость, уравнение которой имеет вид

$$\vec{m}(p) = \frac{\Delta F(p)}{\|\Delta F(p)\|},$$

$$l(p) = \vec{m}(p) \cdot (x - p) = 0. \quad (8)$$

Пересечение полученных таким образом плоскостей дает некоторую сетку, которая является касательной и в некоторых случаях более качественно аппроксимирует участки границы, в которых существуют геометрические особенности.

Расстояние от произвольной точки до плоскости может быть получено путем подстановки ее координат в уравнение плоскости вида (8). Следовательно, для произвольного узла $x \in P$ исходной сетки в виде (2) можно определить среднеквадратическое отклонение от касательной сетки в следующем виде

$$\varepsilon_\tau(x) = \sum_{p \in D(p)}^{k-1} (\vec{m}(p) \cdot (x - p))^2. \quad (9)$$

Заранее определив пороговое значение среднеквадратического отклонения вида (9), получим множество узлов, положение которых необходимо скорректировать. Для вычисления оптимального положения узла из опре-

деленного множества необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений третьего порядка в виде

$$\frac{d\varepsilon_\tau(x)}{dx} = 0. \quad (10)$$

Таким образом, если $x(p) = (x_1, x_2, x_3)$ – решение системы линейных алгебраических уравнений (10) для узла сетки p , то можем получить новый оператор корректировки положения узлов сетки M в виде

$$N_1(P) : p' \leftarrow p + \Delta p, p \in P, \quad (11)$$

где $\Delta p = x(p) - p$.

На практике оператор вида (11), как правило, за одну итерацию определяет оптимальное положение узлов сетки (рис. 3, а, б).

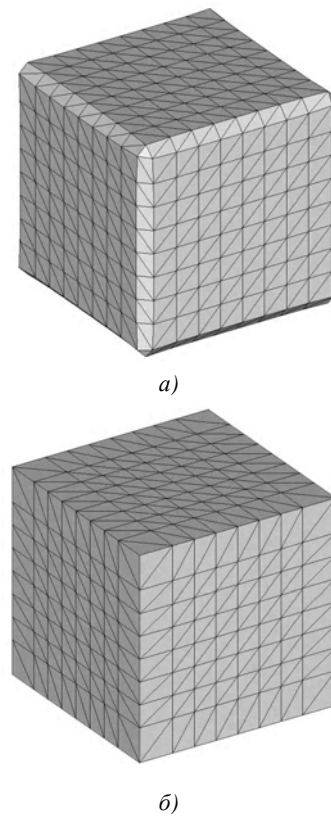


Рис. 3. Применение оператора корректировки узлов сетки

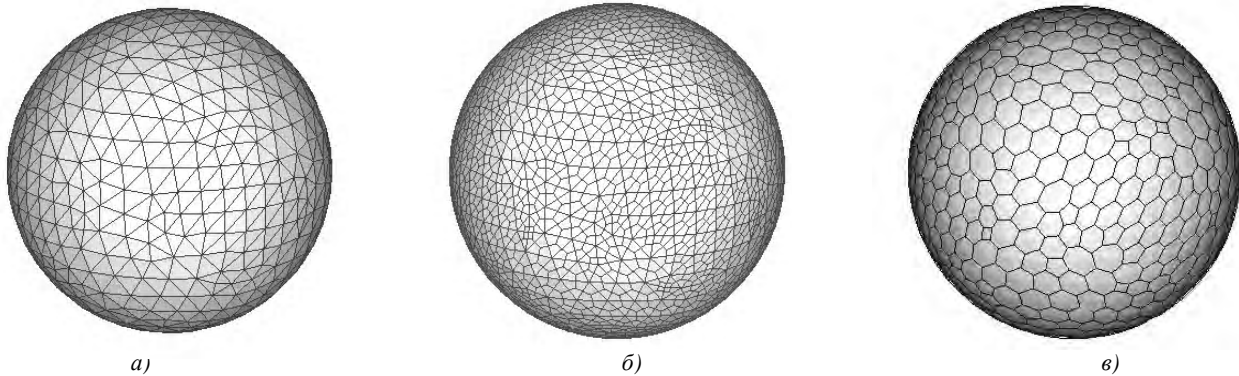


Рис. 2. Сетка на основе треугольных элементов и двойственная к ней сетка

В некоторых случаях оператор может выполнять ошибочную корректировку положения узлов, порождая, таким образом, вырожденные элементы и геометрические особенности, которых нет на исходной поверхности $\partial\Omega$. Причиной таких ошибок, как правило, является плохое качество аппроксимации конечных элементов исходной сетки и накопительные вычислительные погрешности. Поэтому оператор вида (11) применяется не как самостоятельное преобразование, а как один из этапов комплекса преобразований, в который, помимо оператора (7), могут входить такие операции как сгущение сетки, удаление вырожденных элементов, проецирование и сглаживание узлов.

Операцию сглаживания всех без исключения узлов сетки M можно использовать как процедуру подготовки сетки для работы других операторов. Оператор сглаживания для всех узлов сетки может быть записан в следующем виде

$$R_{all}(P) : p' \leftarrow p + \Delta u(p), p \in P, \quad (12)$$

где $\Delta u(p)$ – величина смещения узла, полученная на основе сглаживания.

Если $B(p)$ – множество узлов смежных с p , а n – его мощность, то смещение узла на основе сглаживания Лапласа имеет вид

$$U(p) = \frac{1}{n} \sum_{q \in B(p)} q - p. \quad (13)$$

Для каждого узла сетки M , используя связи с соседними узлами, не сложно определить приближенные значения геометрических характеристик границы объекта, такие как нормаль, касательная плоскость, параметры кривизны. Таким образом, для каждого узла сетки можно определить множество $C(P)$ в виде

$$C(P) = \{(k_1(p), |k_2(p)|) : p \in P\}, \quad (14)$$

а также множество $G(P)$ – модулей гауссовой кривизны в виде

$$G(P) = \{|k_G(p)| : p \in P\}. \quad (15)$$

Множества $C(P)$ и $G(P)$ приближенно определяют основные параметры кривизны поверхности во всех граничных узлах сетки, на основе которых можем разделить множество всех узлов сетки на три составляющих:

- множество узлов, которые являются вершинами P_{corner} ;
- множество узлов, которые принадлежат ребрам P_{edge} ;
- множество обычных узлов $P_{regular}$.

При этом $p \in P_{corner}$ будут соответствовать наибольшие значения из множества $G(P)$, которые можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mu_{corner}^{(t+1)} &= \frac{1}{|P_{corner}^{(t)}|} \sum_{p \in P_{corner}^{(t)}} |k_G(p)|, \\ \mu_{noncorner}^{(t+1)} &= \frac{1}{|P_{noncorner}^{(t)}|} \sum_{p \in P_{noncorner}^{(t)}} |k_G(p)|, \\ P_{corner}^{(t)} &= \{p : \|k(p) - \mu_{corner}^{(t)}\| < \|k(p) - \mu_{noncorner}^{(t)}\|, p \in P\} \\ P_{noncorner}^{(t)} &= \{p : \|k(p) - \mu_{noncorner}^{(t)}\| < \|k(p) - \mu_{corner}^{(t)}\|, p \in P\} \end{aligned} \quad (16)$$

где $\mu_{corner}^0 = \max(|k_G(p)|), p \in P$ – начальное положение главных точек множества угловых узлов; $\mu_{noncorner}^0 = \min(|k_G(p)|), p \in P$ – начальное положение главных точек множества узлов.

Для множества узлов, которому принадлежат узлы ребер, характерным является большое значение максимальной кривизны и, в то же время, малое значение минимальной. Если считать пары множества $C(P)$ точками двумерного пространства, то формально можем записать множество P_{edge} в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mu_{edge}^{(t+1)} &= \frac{1}{|P_{edge}^{(t)}|} \sum_{p \in P_{edge}^{(t)}} (k_1(p), |k_2(p)|), \\ \mu_{nonedge}^{(t+1)} &= \frac{1}{|P_{nonedge}^{(t)}|} \sum_{p \in P_{nonedge}^{(t)}} (k_1(p), |k_2(p)|), \\ P_{edge}^{(t)} &= \{p : \|k(p) - \mu_{edge}^{(t)}\| < \|k(p) - \mu_{nonedge}^{(t)}\|, p \in P\} \\ P_{nonedge}^{(t)} &= \{p : \|k(p) - \mu_{nonedge}^{(t)}\| < \|k(p) - \mu_{edge}^{(t)}\|, p \in P\} \end{aligned} \quad (17)$$

где $\mu_{edge}^0 = \left(\max_{p \in P}(k_1(p)), \min_{p \in P}(|k_2(p)|) \right)$ – начальное положение главной точки множества узлов, которые образуют ребра; $\mu_{nonedge}^0 = \left(\min_{p \in P}(k_1(p)), \min_{p \in P}(|k_2(p)|) \right)$ – начальное положение главной точки множества узлов, которые не образуют ребра.

Исходя из полученных множеств особых точек, множество обычных узлов будет иметь вид $P_{regular} = P_{noncorner} \cup P_{nonedge}$.

Практический пример выделения на сетке особых точек и связанных с ними ребер представлен на рис. 4.

Для различных участков границы геометрического объекта возможно применения различных методов оптимизации. Для сглаживания регулярных узлов сетки можно применять оператор сглаживания в виде

$$R_{regular}(P) : p' \leftarrow p + \Delta u(p), p \in P_{regular}, \quad (18)$$

где значение $\Delta u(p)$ аналогично выражению (12).

Очевидно, что множество узлов вершин сетки имеют фиксированное положение. Для выполнения сглаживания множества узлов, которые принадлежат ребрам геометрического объекта, рассмотрим локальный участок границы образованный узлом $p \in P_{edge}$ и парой

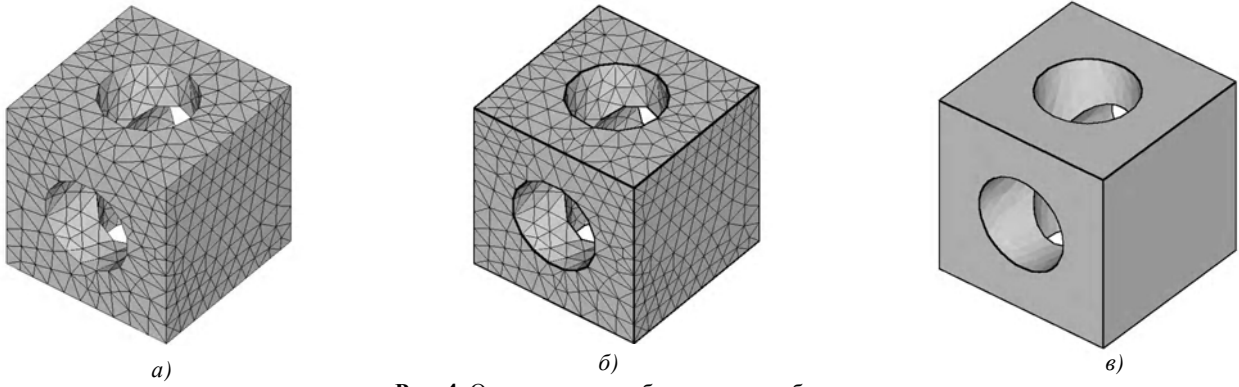


Рис. 4. Определение особых точек и ребер

соседних с ним узлов $p_i, p_j \in P_{edge}$. Тройка выбранных узлов аппроксимирует некоторый участок кривой в пространстве, поэтому коррекция положения узла p должна зависеть только от соседних узлов $p_i, p_j \in P_{edge}$, нормали к кривой $\vec{n}_2(p)$ и касательного вектора $\vec{\tau}(p)$ (рис. 5, а, б).

Пусть новое положение p' узла p будет располагаться в середине отрезка $p_i p_j$. Если тройка узлов аппроксимирует прямой участок границы, то положение p' определено правильно, иначе необходимо скорректировать его положение на величину $(p' - p) \cdot \vec{n}_2(p)$ в направлении вектора $\vec{n}_2(p)$. Таким образом, можем записать смещение узла $\Delta u(p)$ в виде

$$\begin{aligned}
 \vec{n}_1(p) &= (p_j - p) \times (p_i - p), \\
 \vec{\tau}(p) &= (p_i - p_j), \\
 \vec{n}_2(p) &= \tau(p) \times n_1(p), \\
 u(p) &= \frac{p_i + p_j}{2} - p, \\
 \gamma(p) &= (p_j - p) \cdot (p - p_i), \\
 \Delta u(p) &= \begin{cases} u(p), & \gamma(p) = 0 \\ c(u(p) - (u(p) \cdot \vec{n}_2(p)) \cdot \vec{n}_2(p)), & \gamma(p) \neq 0 \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

где c – постоянная из промежутка $[0;1]$.

Следовательно, оператор сглаживания узлов расположенных на ребрах будет иметь вид

$$R_{edge}(P): p' \leftarrow p + \Delta u(p), p \in P_{edge}, \tag{20}$$

где $\Delta u(p)$ определяется согласно выражению (19).

Также качество аппроксимации поверхности трехмерного геометрического объекта может быть улучшено путем добавления в сетку новых узлов. Множество новых узлов может быть получено на основе количества точек на радиус кривизны поверхности или на основе максимального расстояния от ребра до границы объекта.

В качестве примера практического применения рассмотрим геометрический объект (куб с парой цилиндрических отверстий (рис. 6)), для которого применим описанные операторы преобразования (7), (11), (18), (20) (рис. 6, б), а также сгущение сетки на основе кривизны поверхности (рис. 6, в).

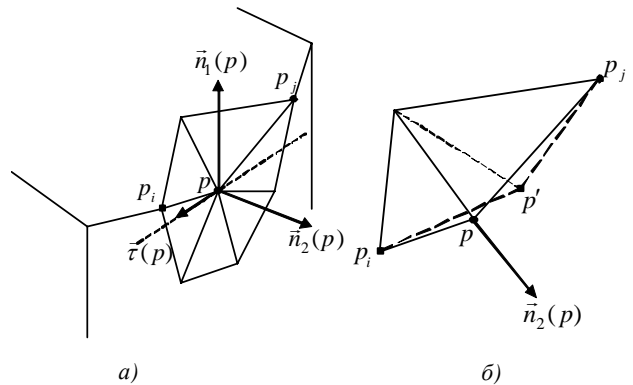


Рис. 5. Смещение узлов на границе геометрического объекта

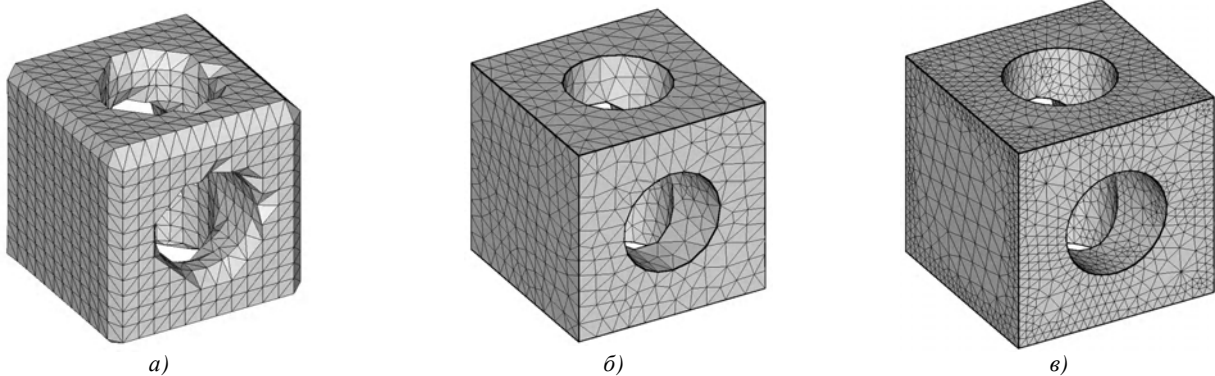


Рис. 6. Оптимизация сетки на границе геометрического объекта

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе представлен подход, позволяющий автоматически строить дискретные модели геометрических объектов, представленных функционально. Предложены подходы к оптимизации дискретных моделей на базе треугольных конечных элементов, основанные на локальном преобразовании элементов сетки, которое стремится аппроксимировать особые точки объекта, опираясь на анализ дифференциальных характеристик его границы. В результате применения таких подходов может быть получена дискретная модель с неравномерной сеткой на основе треугольных элементов, которая сгущается в областях с наибольшей кривизной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкевич, О.* Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошной среды / О. Зенкевич, И. Чанг. – М. : Недра, 1974. – 238 с.
2. *Liseikin, V. D.* Grid generation methods. Second edition / Vladimir D. Liseikin. – Spring, 2010. – 390 p.
3. *Галанин, М. П.* Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы / М. П. Галанин, И. А Щеглов. – М. : ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006. – № 9. – 32 с. – (Препринт / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).
4. *Галанин, М. П.* Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: прямые методы / М. П. Галанин, И. А Щеглов. – М. : ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2006. – № 10. – 32 с. – (Препринт / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).
5. *George, P.* Delaunay Triangulation and Meshing. Application to Finite / P. George, H. Borouchaki. – Hermes Science Publications, 1998. – 413 p.
6. *Rebay, S.* Efficient Unstructured Mesh Generation by Means of Delaunay Triangulation and Bowyer-Watson Algorithm // Journal Of Computational Physics. – 1993. – № 106. – P. 125–138.
7. *Freitag, L. A.* Tetrahedral Mesh Improvement Using Swapping and Smoothing / L. A. Freitag, C. Ollivier-Gooch // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1995. – № 40. – P. 3979–4002.
8. *George, P. L.* Tet meshing : construction, optimization and adaptation / P. L. George // Proceedings of 8th International Meshing Roundtable. – 1999. – P. 133–141.
9. *Puppo, E.* RGB subdivision / E. Puppo, D. Panozzo // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2009. – № 15(2). – P. 295–310.
10. *Puppo, E.* Selectively refinable subdivision meshes / E. Puppo // Symposium on Geometry Processing 2010. – 2010. – P. 153–162.
11. *Максименко-Шейко, К. В.* R-функции в математическом моделировании геометрических объектов в 3D по информации в 2 D / К. В Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // Вісник Запорізького національного університету : збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. – 2010. – № 1. – С. 98–104
12. *Рвачев, В. Л.* Теория R-функций и некоторые ее приложения / В. Л. Рвачев. – К. : Наукова думка, 1982. – 106 с.
13. *Chernyaev, E. V.* Marching Cubes 33: Construction of Topologically Correct Isosurfaces / Evgeni V. Chernyaev // Computer Graphics and Visualization : GRAPHICON'95, 3–7 July, 1995. – Saint-Petersburg, 1995. – С. 21–29.
14. *Efficient Implementation of Marching Cubes Cases with Topological Guarantees / Thomas Lewiner, Hélio Lopes, Antonio Wilson Vieira, Geovan Tavares // Journal of Graphics Tools. – 2003. – № 8 (2) – P. 1–15.*
15. *Patera, J.* A comparison of fundamental methods for ISO surface extraction / Jan Patera, V clav Skala // Machine Graphics & Vision International Journal. – 2004. – № 13(4). – P. 329–343.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2014.

Лісняк А. О.

Канд. фіз.-мат. наук, доцент, Запорізький національний університет, Україна

ДИСКРЕТИЗАЦІЯ ГРАНИЦІ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ, ВИЗНАЧЕНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ R-ФУНКЦІЙ

У статті розглядається актуальна проблема автоматизації скінченно-елементного розбиття поверхні геометричних об'єктів заданих у вигляді неявних функцій В. Л. Рвачева. Описано підходи, які дозволяють підвищити якість елементів сітки, отриманої з використанням відомих методів. Робота методів базується на мінімізації відхилень між диференціальними характеристиками функціонального опису та дискретного представлення границі геометричних об'єктів.

Ключові слова: R-функція, візуалізація, геометрична модель, дискретна модель, метод скінченних елементів.

Lisnyak A. A.

Ph. D., Zaporozhe national university, Ukraine

SURFACE DISCRETIZATION OF R-FUNCTIONS DEFINED GEOMETRICAL OBJECTS

This article describes actual problem of an automatic generation of finite elements for complex geometrical objects defined by implicit R-functions of V. L. Rvachev. Rvachev's approach of geometrical objects description is universal. R-functions allow create models of complex solids in constructive manner.

Author describes functional approach for modeling of solids and methods of surface meshing in the first section of the article. This section also contains mathematical model of the surface finite elements mesh.

Section II describes approaches for the surface mesh optimization. Author describes new some functions of quality of the mesh. Proposed approaches based on minimization of deviation between functional and mesh representations of geometrical objects.

Proposed approaches allow define regular and irregular elements of the mesh for local refinement of the mesh.

Author uses differential characteristics of the mesh for the non-uniform mesh generation. Surface curvature used for control of the non-uniform mesh generation.

Keywords: R-function, visualization, geometrical model, mesh, finite elements.

REFERENCES

1. Zenkevich O., Chang I. Metod konechnykh elementov v teorii sooruzheniy i mehanike sploshnoy sredy. Moscow, Nedra, 1974, 238 p.
2. Liseikin V.D. Grid generation methods. Second edition, Spring, 2010, 390 p.
3. Galanin M. P., Scheglov I. A. Razrabotka i realizatsiya algoritmov trehmernoy triangulyatsii slozhnykh prostranstvennykh oblastey: iteratsionnyye metody. Moscow, IPM im. M. V. Keldyisha RAN, 2006, No. 9, 32 p. – (Preprint / IPM im. M.V. Keldyisha RAN).
4. Galanin M. P., Scheglov I. A. Razrabotka i realizatsiya algoritmov trehmernoy triangulyatsii slozhnykh prostranstvennykh oblastey: pryamyie metody. Moscow, IPM im. M. V. Keldyisha RAN, 2006, No. 10, 32 p. – (Preprint / IPM im. M. V. Keldyisha RAN).
5. George P., Borouchaki H. Delaunay Triangulation and Meshing. Application to Finite, Hermes Science Publications, 1998, 413 p.
6. Rebay S. Efficient Unstructured Mesh Generation by Means of Delaunay Triangulation and Bowyer-Watson Algorithm, *Journal Of Computational Physics*, 1993, No. 106, pp. 125–138.
7. Freitag L. A., Ollivier-Gooch C. Tetrahedral Mesh Improvement Using Swapping and Smoothing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1995, No. 40, pp. 3979–4002.
8. George P. L. Tet meshing : construction, optimization and adaptation, *Proceedings of 8th International Meshing Roundtable*, 1999, P. 133–141.
9. Puppo E., Panozzo D. RGB subdivision, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, No.15 (2), pp. 295–310.
10. Puppo E. Selectively refinable subdivision meshes, *Symposium on Geometry Processing 2010*, 2010, pp. 153–162.
11. Maksimenko-Sheyko K. V., Sheyko T. I. R-funktsii v matematicheskom modelirovanii geometricheskikh ob'ektov v 3D po informatsii v 2D. *Visnik Zaporizkogo natsionalnogo unIversitetu: ZbIrnik naukovih statey. FIZIKO-matematichni nauki*, 2010, No. 1, pp. 98–104.
12. Rvachev V. L. Teoriya R-funktsiy i nekotoryie ee prilozheniya. Kiev, Naukova dumka, 1982, 106 p.
13. Chernyaev E. V. Marching Cubes 33: Construction of Topologically Correct Isosurfaces, *Computer Graphics and Visualization*, GRAPHICON'95, 3–7 July, 1995. Saint-Petersburg, 1995, pp. 21–29.
14. Thomas Lewiner, Hélio Lopes, Antonio Wilson Vieira, Geovan Tavares Efficient Implementation of Marching Cubes Cases with Topological Guarantees, *Journal of Graphics Tools*, 2003, No. 8(2), pp. 1–15.
15. Patera J., Skala V. A comparison of fundamental methods for ISO surface extraction, *Machine Graphics & Vision International Journal*, 2004, No.13(4), pp. 329–343.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ВЫБОРА РЕКЛАМНОЙ СЕТИ В ИНТЕРНЕТЕ

В статье описан метод, позволяющий упростить процесс принятия решений при выборе рекламной сети в Интернете. Предложен вариант решения проблемы с использованием метода анализа иерархий (МАИ). Данный метод позволяет рассчитать наиболее показательный суммарный критерий, который использует суммирование значений каждой альтернативы по всем критериям с учетом важности каждого критерия для пользователя. Благодаря этому анализ с использованием МАИ значительно упрощает процесс принятия решения в задаче выбора рекламной сети.

Ключевые слова: интернет-реклама, рекламная сеть в Интернете, метод анализа иерархий.

ВВЕДЕНИЕ

Интернет-реклама останется самым динамично развивающимся сегментом во многом благодаря росту соцсетей и развитию онлайн-видео. По прогнозу экспертов глобальный сегмент вырос в 2013 году на 14,6 %. Это обусловлено более высокой эффективностью, относительной дешевизной и легкостью проведения рекламной кампании по сравнению с рекламой в традиционных средствах массовой информации. Сотрудники Forrester Research прогнозируют, что к 2016 году рекламодатели потратят в Интернете почти 77 миллиардов долларов, что составит 35 % от общего рекламного бюджета [1].

К особенностям интернет-рекламы относятся:

- интерактивность;
- активность интернет-пользователей;
- регистрируемость;
- двухуровневое воздействие;
- возможности фокусировок [2].

В Интернете большую популярность получили рекламные сети, включающие в себя сотни сайтов по различным тематикам, наиболее крупные из которых Adsmart Network, DoubleClick, Burst, Flycast Network [3].

Решение задачи о выборе рекламной сети зависит от ряда критериев, т.е. задача выбора рекламной сети является многокритериальной. В условиях ограниченного и сравнительно небольшого количества критериев выбора и альтернативных вариантов рекламных сетей наиболее простой и удобной формализацией принятия многокритериального решения может являться метод анализа иерархии (МАИ) Томаса Саати [4].

1 ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ВЫБОРА РЕКЛАМНОЙ СЕТИ

Метод анализа иерархий – методологическая основа для решения задач выбора альтернатив посредством их многокритериального рейтингования.

Основное применение метода – поддержка принятия решений посредством иерархической композиции задачи и рейтингования альтернативных решений.

МАИ представляется более обоснованным путем решения многокритериальных задач в сложной обстановке с иерархическими структурами, включающими как осязаемые, так и неосязаемые факторы, чем подход, основанный на линейной логике. Оценка вариантов решений с использованием МАИ осуществляется как на основе объективной, так и субъективной исходной информации. Суть метода заключается в определении собственного вектора с наибольшим собственным значением на основе попарного сравнения исследуемых характеристик [5, 6].

Порядок применения метода анализа иерархий для выбора рекламной сети состоит в следующем:

- определение оценочных критериев для выбора рекламной сети;
- построение качественной модели проблемы в виде иерархии, включающей цель, альтернативные варианты достижения цели и критерии для оценки качества альтернатив;
- формирование матриц парных сравнений для всех уровней иерархии: матриц парных сравнений критериев одного уровня между собой, критериев нижнего уровня относительно критериев высшего уровня и альтернатив относительно критериев;
- вычисление векторов локальных приоритетов для каждой матрицы парных сравнений;
- оценка степени согласованности матриц парных сравнений;
- определение локальных приоритетов альтернатив по критериям;
- синтез глобальных приоритетов альтернатив путем линейной свертки приоритетов элементов на иерархии и принятие решения на основе полученных результатов.

2 ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПО МАИ

Применение метода анализа иерархий для выбора рекламной сети можно рассмотреть на примере [7]. Продовольственная компания планирует использовать интернет-рекламу, а следовательно заинтересована в выборе наиболее подходящей рекламной сети. Рекламный бюджет компании – около 80 млн. \$ в год, из которых 5 % выделены на интернет-маркетинг.

Компания организовала команду для принятия решения, в которую вошли коммерческий директор, агент по сбыту и бренд-менеджер. Задача команды – выбрать рекламную сеть. Компания просит четыре главные рекламные сети подготовить бизнес-планы электронной коммерции, которые соответствовали бы маркетинговым целям компании и сосредотачивались на целевых потребителях.

Четыре рекламные сети были обозначены как компании А, В, С и D.

Этап 1: Определение оценочных критериев.

Для определения оценочных критериев используется метод номинальной группы [8]. 14 экспертов (пятеро из интернет-рекламодателей, пятеро из рекламных агентств и четверо из компаний, занимающихся электронной торговлей) задействованы в выборе 7 критериев и 14 подкритериев, приведенных в табл. 1.

МАИ позволяет лицу, принимающему решение (ЛПР) использовать как количественные, так и качественные критерии одновременно. Данное исследование включает 6 объективных и 14 субъективных подкритериев. Данные для 6 объективных критериев приведены в табл. 2.

Этап 2: Построение иерархической структуры проблемы.

Проблема выбора рекламной сети разбита на 4 уровня: достижение конечной цели, 7 оценочных критериев, 19 подкритериев и 4 альтернативы. Иерархическая структура проблемы представлена на рис. 1.

Таблица 1. Основные критерии выбора рекламной сети и подкритерии, раскрывающие содержание основных критериев

Критерий	Подкритерии	Описание
Качество интернет-медиа	Уровень информированности общественности о сайтах	Отражает общее количество людей, которые знают (слышали) о существовании сайтов данной сети
	Число пользователей сайтов	Общее количество уникальных пользователей
	Уровень посещаемости сайтов	Размер аудитории ресурса
	Профессиональный характер контента сайтов	Оценка специализированности контента сайта
Масштаб бизнеса	Число категорий сайтов	Тематика смежных сайтов (финансовый, сайт электронной торговли, развлекательный, медицинский)
	Количество сайтов	Общее количество сайтов сети
	Является ли компания глобальной	География пользователей
Рекламные тарифы		Оцененные показателем стоимости миллиона показов (баннера)
Рекламный менеджмент и манера подачи материала	Таргетинг	Возможности фокусировок
	Манера подачи рекламы	Способность обеспечить постоянную подачу и своевременное обновление рекламных сообщений
	Мониторинг рекламного эффекта	Способность обеспечить точную статистику по впечатлениям от рекламы, откликам баннера и слежению за профилем пользователя
	Своевременность отчетов по интернет-рекламе	Показывает скорость, с которой обновляются аналитические отчеты
	Дружественность отчетов	Способность облегчить рекламодателям выполнение независимых перекрестных анализов и изменение формата отчетов
Творческий подход	Отклик баннера	Отношение количества кликов по активной ссылке к количеству показов ссылки
	Расположение элементов на рекламном объявлении	Определяет, что привлекает рекламодателей: визуальный эффект от рекламы или рекламный текст
Интегрированное маркетинговое планирование	Возможность маркетинговых исследований	Способность анализировать рынок и поведение целевых потребителей
	Возможность медиапланирования	Отражает способность модифицировать в соответствии с требованиями рекламодателя медиаплан и покупки
	Возможность разработки рекламной кампании	Показывает способность разрабатывать притягательные для целевой аудитории кампании электронной торговли
Качество услуг	Согласованность действий персонала	Гибкость и согласованность действий творческого коллектива и сетевых техников
	Профессионализм	Профессиональный уровень группы управления

Таблица 2. Данные для 6 объективных критериев

№	Подкритерий	Компания А	Компания В	Компания С	Компания D
1	Количество пользователей сайтов (выраженное в 10 000 человек)	43	38	35	32
2	Месячный трафик сайтов (выраженный в 10 000 человек)	450	448	431	398
3	Число категорий сайтов	6	6	9	6
4	Количество сайтов	51	48	50	31
5	Коэффициент кликов (отклик баннера)	0,3	0,35	0,32	0,25
6	Стоимость миллиона показов (баннера) (выраженная в млн. NT\$)	107	173	150	166

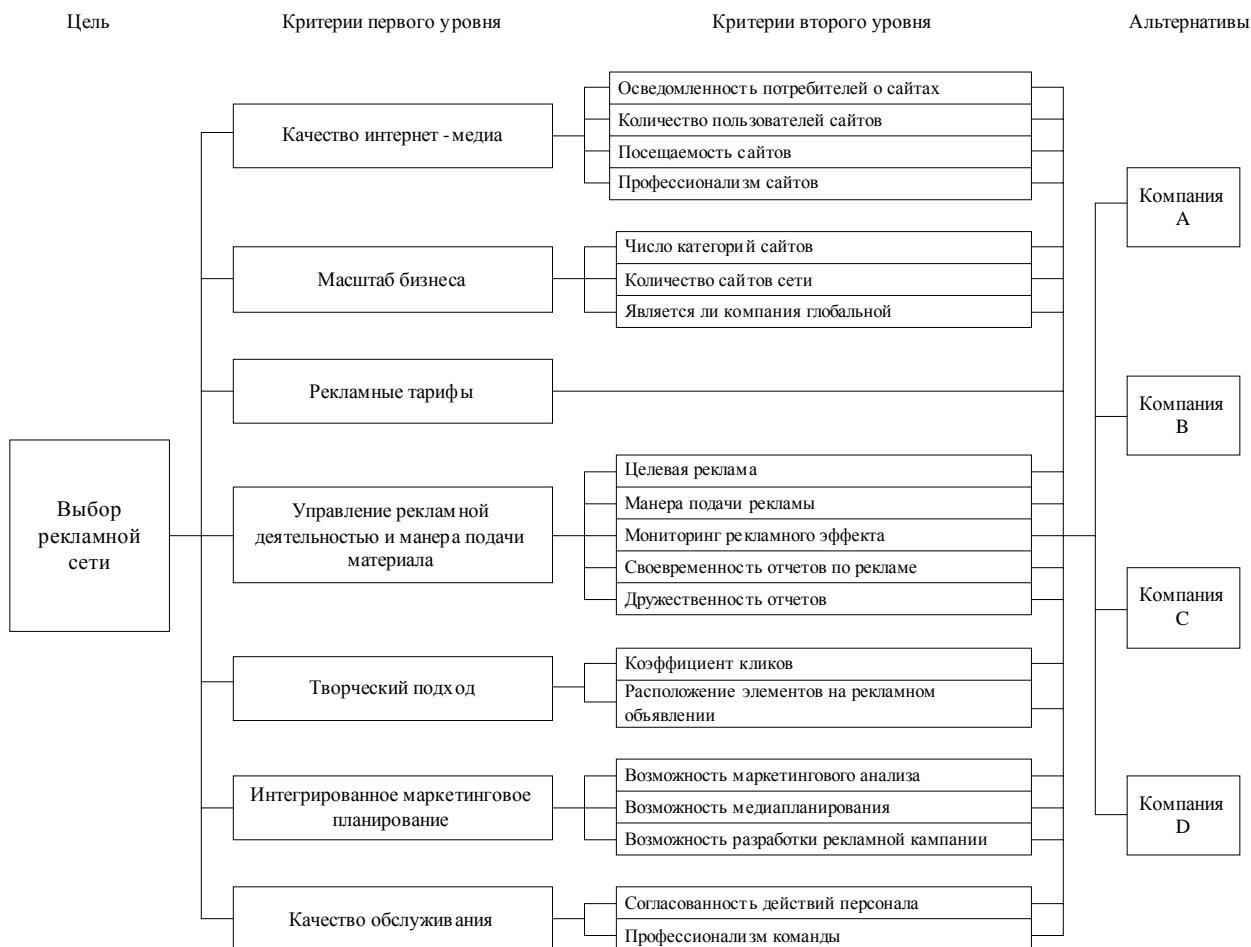


Рис. 1. Иерархическая структура проблемы

Этап 3: Формирование матриц парных сравнений.

Данный этап включает два шага. На первом шаге производится отбор двадцати респондентов из числа интернет-рекламодателей, которые соответствуют следующим качествам:

- имеют опыт принятия решений в вопросах рекламных сетей;
- в настоящее время работают агентами по сбыту, бренд-менеджерами или менеджерами по рекламе.

Каждый респондент выполнил попарное сравнение важности основных критериев относительно цели и подкритериев относительно основных критериев (табл. 3, 4).

На втором шаге каждое ЛПР выполнило попарное сравнение четырех альтернатив относительно 14 субъективных критериев (табл. 5).

Относительные оценки, предоставленные двадцатью респондентами и тремя ЛПР, были объединены с помощью метода среднего геометрического.

Этап 4: Получение векторов локальных приоритетов.

Для каждой из полученных матриц формируется вектор локальных приоритетов. Для этого необходимо произвести свертку каждой матрицы попарных сравнений в вектор, затем любым из известных способов нормировать полученные векторы и перемножить матрицы попарных сравнений на соответствующие им нормированные векторы.

Таблиця 3. Матриця парних порівнянь основних критеріїв

	Якість інтернет-медіа	Масштаб бізнеса	Управління	Творчий підхід	Інтегроване маркетингове планування	Якість обслуговування	Рекламні тарифи
Якість інтернет-медіа	1,000	4,427	2,537	2,954	2,371	1,719	2,290
Масштаб бізнеса	0,226	1,000	0,351	0,394	0,306	0,267	0,316
Управління	0,394	2,849	1,000	1,125	0,803	0,654	1,000
Творчий підхід	0,339	2,538	0,889	1,000	0,803	0,582	0,889
Інтегроване маркетингове планування	0,422	3,268	1,245	1,245	1,000	0,644	1,246
Якість обслуговування	0,582	3,745	1,529	1,718	1,553	1,000	1,719
Рекламні тарифи	0,437	3,165	1,000	1,125	0,803	0,582	1,000

Таблиця 4. Матриця парних порівнянь підкритеріїв відносно критеріїв

Якість інтернет-медіа					Творчий підхід			
	Впізнаваність	Використачувачі	Відвідуваність	Контент		Відклик баннера	Макет	
Впізнаваність	1,000	2,141	2,627	2,713		Відклик баннера	1,000	2,667
Використачувачі	0,467	1,000	1,552	1,528		Макет	0,375	1,000
Відвідуваність	0,381	0,644	1,000	1,246				
Контент	0,369	0,654	0,803	1,000				
Масштаб бізнеса					Інтегроване маркетингове планування			
	Категорії	Сайти	Глобальність			Аналіз	Медіаплан	Кампанія
Категорії	1,000	0,803	1,933		Аналіз	1,000	0,803	0,725
Сайти	1,245	1,000	2,141		Медіаплан	1,245	1,000	0,803
Глобальність	0,517	0,467	1,000		Кампанія	1,379	1,245	1,000
Управління рекламною діяльністю						Якість послуг		
	Таргетинг	Манера	Моніторинг	Своєчасність	Дружелюбність		Согласованність	Професіоналізм
Таргетинг	1,000	1,380	0,544	0,844	1,070		Согласованність	1,000
Манера	0,725	1,000	0,467	0,612	0,803		Професіоналізм	0,803
Моніторинг	1,838	2,141	1,000	1,552	2,108			
Своєчасність	1,185	1,634	0,644	1,000	1,933			
Дружелюбність	0,935	1,245	0,474	0,517	1,000			

Етап 5: Оцінка ступеня узгодженості матриць парних порівнянь.

На кожному рівні ієрархії необхідно визначити ступінь узгодженості матриць парних порівнянь.

Відношення узгодженості, обчислені для всіх матриць парних порівнянь, виявилися меншими 0,1, що свідчить про узгодженість суджень двадцяти експертів і трьох ЛПР.

Таблиця 5. Матриця парних порівнянь альтернатив відносно підкритеріїв

Уровень информированности					Профессиональный характер контента				
	A	B	C	D		A	B	C	D
A	1,000	2,080	0,693	1,442	A	1,000	1,000	0,481	0,405
B	0,481	1,000	0,405	0,693	B	1,000	1,000	0,481	0,481
C	1,443	2,469	1,000	2,080	C	2,079	2,079	1,000	1,000
D	0,693	1,443	0,481	1,000	D	2,469	2,079	1,000	1,000
Глобальность компании					Целевая реклама				
	A	B	C	D		A	B	C	D
A	1,000	1,000	3,000	3,000	A	1,000	1,442	0,693	2,080
B	1,000	1,000	3,000	3,000	B	0,693	1,000	0,693	2,080
C	0,333	0,333	1,000	1,000	C	1,443	1,443	1,000	2,466
D	0,333	0,333	1,000	1,000	D	0,481	0,481	0,406	1,000
Манера подачи					Мониторинг рекламного эффекта				
	A	B	C	D		A	B	C	D
A	1,000	1,000	1,000	1,442	A	1,000	1,000	0,481	1,442
B	1,000	1,000	1,000	1,442	B	1,000	1,000	0,481	1,442
C	1,000	1,000	1,000	1,442	C	2,079	2,079	1,000	2,466
D	0,693	0,693	0,693	1,000	D	0,693	0,693	0,406	1,000
Своевременность отчетов по рекламе					Дружественность отчетов по рекламе				
	A	B	C	D		A	B	C	D
A	1,000	1,000	0,333	1,000	A	1,000	1,000	0,333	1,000
B	1,000	1,000	0,333	1,000	B	1,000	1,000	0,333	1,000
C	3,003	3,003	1,000	3,000	C	3,003	3,003	1,000	3,000
D	1,000	1,000	0,333	1,000	D	1,000	1,000	0,333	1,000
Рекламный макет					Маркетинговые исследования				
	A	B	C	D		A	B	C	D
A	1,000	0,405	0,251	0,693	A	1,000	0,693	0,405	2,080
B	2,469	1,000	0,481	1,000	B	1,443	1,000	0,481	2,466
C	3,984	2,079	1,000	1,710	C	2,469	2,079	1,000	3,271
D	1,443	1,000	0,585	1,000	D	0,481	0,406	0,306	1,000
Медиапланирование					Кампания				
	A	B	C	D		A	B	C	D
A	1,000	0,693	0,405	0,405	A	1,000	0,693	0,405	0,523
B	1,443	1,000	0,481	0,481	B	1,443	1,000	0,481	0,585
C	2,469	2,079	1,000	1,442	C	2,469	2,079	1,000	0,693
D	2,469	2,079	0,693	1,000	D	1,912	1,709	1,443	1,000
Согласованность действий персонала					Профессионализм				
	A	B	C	D		A	B	C	D
A	1,000	0,405	0,212	0,693	A	1,000	2,080	0,481	3,557
B	2,469	1,000	0,333	2,080	B	0,481	1,000	0,281	2,080
C	4,717	3,003	1,000	4,217	C	2,079	3,559	1,000	4,718
D	1,443	0,481	0,237	1,000	D	0,281	0,481	0,212	1,000

Етап 6: Визначення локальних пріоритетів альтернатив по критеріям.

Визначення векторів пріоритетів проводиться в напрямку від нижніх рівнів до верхніх з урахування конкретних зв'язків між елементами, що належать різним рівням. Визначення проводиться шляхом множення відповідних векторів і матриць.

В табл. 6 представлені вектори локальних пріоритетів і ваги 4 рекламних мереж.

Етап 7: Визначення вектора глобальних пріоритетів альтернатив відносно цілі.

Для визначення вектора глобальних пріоритетів (табл. 7) в матриці локальні пріоритети, що належать кожній альтернативі, множаться на пріоритет кожного критерію, і результат суммується.

Одно з основних вимог рекламодавців – розміщення їх рекламного повідомлення на відомих веб-сайтах з великим кількістю користувачів і високою відвідуваністю. Саме тому найбільший інтерес представляє якість суміжних веб-сайтів. Наступним по значимості критерієм є якість наданих послуг. Далі враховується здатність рекламних мереж проводити медіапланинг і аналіз поведінки споживачів, які сприяють інтеграції стратегії інтернет-маркетингу. Четвертий і п'ятий по значимості критерії – це рекламні тарифи і функції системи рекламного менеджменту. Шостий критерій визначає, в достатній чи мірі споживачі привабливі креативністю рекламного повідомлення, щоб клікнути по ньому. Масштаб бізнесу є найважливішим критерієм для рекламодавців.

Таблица 6. Векторы локальных приоритетов и веса 4 рекламных сетей

Критерий	Субкритерий	Вес субкритерия	Компания А	Компания В	Компания С	Компания D
Качество интернет-медиа	Уровень информированности	0,448	0,280	0,141	0,385	0,194
	Число пользователей	0,233	0,291	0,257	0,236	0,216
	Посещаемость	0,169	0,261	0,259	0,250	0,230
	Профессиональный характер контента	0,151	0,154	0,161	0,335	0,350
	<i>Общая оценка</i>		0,260	0,191	0,320	0,229
Масштаб бизнеса	Число категорий сайта	0,366	0,222	0,222	0,333	0,222
	Количество сайтов	0,438	0,283	0,267	0,278	0,172
	Глобальность компании	0,197	0,375	0,375	0,125	0,125
	<i>Общая оценка</i>		0,279	0,272	0,268	0,181
Управление рекламной деятельностью и манера подачи материала	Целевая реклама	0,176	0,282	0,235	0,353	0,130
	Манера подачи	0,133	0,271	0,271	0,271	0,188
	Мониторинг рекламного эффекта	0,316	0,212	0,212	0,420	0,155
	Своевременность отчетов по рекламе	0,227	0,167	0,167	0,500	0,167
	Дружественность отчетов по рекламе	0,149	0,167	0,167	0,500	0,167
	<i>Общая оценка</i>		0,215	0,207	0,419	0,159
Творческий подход	Отклик баннера	0,727	0,246	0,287	0,262	0,205
	Рекламный макет	0,273	0,117	0,234	0,433	0,216
	<i>Общая оценка</i>		0,211	0,272	0,309	0,208
Интегрированное маркетинговое планирование	Маркетинговые исследования	0,275	0,193	0,252	0,446	0,110
	Медиапланирование	0,330	0,133	0,174	0,378	0,315
	Кампания	0,395	0,145	0,187	0,322	0,346
	<i>Общая оценка</i>		0,154	0,201	0,375	0,271
Уровень услуг	Согласованность действий персонала	0,555	0,098	0,227	0,548	0,127
	Профессионализм	0,445	0,277	0,148	0,491	0,084
	<i>Общая оценка</i>		0,178	0,192	0,523	0,108

Таблица 7. Векторы глобальных приоритетов 4 рекламных сетей

Критерий	Вес	Компания А	Компания В	Компания С	Компания D
Качество интернет-медиа	0,287	0,260	0,191	0,320	0,229
Масштаб бизнеса	0,046	0,279	0,272	0,268	0,181
Управление рекламной деятельностью и манера подачи материала	0,119	0,215	0,207	0,419	0,159
Творческий подход	0,107	0,211	0,272	0,309	0,208
Интегрированное маркетинговое планирование	0,136	0,154	0,201	0,375	0,271
Уровень услуг	0,185	0,178	0,192	0,523	0,108
Рекламные тарифы	0,121	0,180	0,290	0,252	0,279
<i>Общая оценка</i>		0,211	0,219	0,365	0,205
<i>Ранг</i>		3	2	1	4

Исходя из результатов расчетов, полученных с применением МАИ, компания С оказалась наиболее предпочтительной рекламной сетью. Это означает, что если предприятие примет решение вложить средства в рекламную сеть компании С, то с большой вероятностью она окажется наиболее эффективной для достижения целей разработанной рекламной компании в сети Интернет.

ВЫВОДЫ

Решение задачи выбора наиболее эффективной рекламной сети в Интернет принимается на основе вектора глобальных приоритетов и рангов, присвоенного для каждой альтернативы решений. Данный критерий является наиболее показательным, так как при его подсчете осу-

ществляется не только суммирование значений каждой альтернативы по всем критериям, но и учитывается важность критерия для пользователя. Благодаря этому, проведенный анализ с использованием МАИ показывает возможность объективизации выбора и принятия решения в такой сложной и концептуальной проблеме, как выбор рекламной сети в Интернете.

В перспективах данного исследования планируется применение данного метода для принятия подобных решений в других прикладных вопросах рекламы, PR и бизнеса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривошеев, М. Ф.* Рынок интернет-рекламы (поисковая оптимизация, контекстная и медийная реклама, веб-дизайн), емкость рынка и прогнозы развития / Кривошеев М. Ф. – URL: http://www.weblider.ru/article/article_97.html
2. *Дейнекин, Т. В.* Оценка эффективности предпринимательской деятельности в сфере интернет-рекламы: Дис. канд.

- экон. наук: 08.00.05 / Т. В. Дейнекин. – М. : РГБ ОД 61:04-8/224-3, 2003. – 158 с.
3. *Бокарев, Т. А.* Энциклопедия Интернет-рекламы / Т. А. Бокарев. – М. : Промо-ру, 2000. – 399 с.
4. *Саати, Т.* Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Керне. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.
5. *Карманов, В. Г.* Моделирование в исследовании операций. Учебник для вузов / В. Г. Карманов, В. В. Федоров. – М. : Твема, 2006. – 254 с.
6. *Саати, Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 315 с.
7. *Lin, Chin-Tasi.* Adopting an Analytic Hierarchy Process to Select Internet Advertising Networks / Chin-Tasi Lin, Pi-Fang-Hsu // Information and Management Sciences. – 2003. – No. 2. – P. 1–16
8. *Ерофеев, В. К.* Сценарное моделирование как технология принятия групповых решений: учебное пособие / В. К. Ерофеев, Н. Е. Карягин, Е. Г. Ноздрин. – Астрахань : Изд-во Астраханского гос. пед. ун-та, 1998. – 341 с.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2014.

Фандеева К. О.¹, Харченко В. В.²

¹Аспірант, Запорізький національний технічний університет, Україна

²Студент, Запорізький національний технічний університет, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ДЛЯ ВИБОРУ РЕКЛАМНОЇ МЕРЕЖІ В ІНТЕРНЕТІ

У статті описано метод, що дозволяє спростити процес прийняття рішень при виборі рекламної мережі в Інтернеті. Запропоновано варіант вирішення проблеми за допомогою методу аналізу ієрархій.

Ключові слова: інтернет-реклама, рекламна мережа в Інтернеті, метод аналізу ієрархій.

Fandieieva K. O.¹, Kharchenko V. V.²

¹Graduate student, Zaporizhzhia National Technical University, Ukraine

²Student, Zaporizhzhia National Technical University, Ukraine

APPLYING AN ANALYTIC HIERARCHY PROCESS TO SELECT AN INTERNET ADVERTISING NETWORK

This article describes a method that simplifies an Internet advertising network choice decision-making. Choosing the online advertising network for the ad campaign is multiobjective task, as it considers several criteria groups. The main goal is to select the best advertising budget distribution for maximum target audience effect. The candidate solution using the analytic hierarchy process (AHP) is suggested. This method allows to calculate the most revealing total criterion, which uses the all criteria summation of each alternative, taking into account the importance of each criterion to the user. Because of this, the AHP analysis greatly simplifies the process of decision making in the problem of ad network selecting.

Keywords: Internet advertising, Internet advertising network, analytic hierarchy process.

REFERENCES

1. Rynok internet-reklamy (poiskovaja optimizacija, kontekstnaja i medijnaja reklama, veb-dizajn), emkost' rynka i prognozy razvitija, URL: http://www.weblider.ru/article/article_97.html
2. Internet zajmet 12,6 % mirovogo rynka reklamy, URL: <http://reklamonstr.com/archives/4769>
3. Dejnekina T. V. Ocenka jeffektivnosti predprinimatel'skoj dejatel'nosti v sfere internet-reklamy: Dis. kand. jekon. nauk: 08.00.05. Moscow, RGB OD 61:04-8/224-3, 2003, 158 p.
4. Bokarev T. A. Jenciklopedija Internet-reklamy. Moscow, Promo-ru, 2000, 399 p.

5. Saati T., Kerne K. Analiticheskoe planirovanie. Organizacija system. Moscow, Radio i svjaz', 1991, 224 p.
6. Saati T. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij. Moscow, Radio i svjaz', 1993, 315 p.
7. Lin Chin-Tasi, Pi-Fang-Hsu Adopting an Analytic Hierarchy Process to Select Internet Advertising Networks, *Information and Management Sciences*, 2003, No. 2, pp. 1–16
8. Erofeev V. K., Karjagin N. E., Nozdrina E. G. Scenarnoe modelirovanie kak tehnologija prinjatija gruppovyh reshenij: uchebnoe posobie. Astrahan', Izd-vo Astrahanskogo gos. ped. un-ta, 1998, 341 p.

ОПРАЦЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ У ВЕЛИКИХ ДАНИХ

У статті уведено поняття терміну «великі дані» та проаналізовано причину їх появи. Показано рівні виникнення невизначеності у «великих даних». Сформовано модель сховища даних з невизначеністю та розроблено операції над ним. Подано метод формування агрегату з врахуванням невизначеності.

Ключові слова: великі дані, інформаційний продукт, невизначеність.

ВСТУП

Глобалізаційні аспекти розвитку сучасного суспільства викликають потребу у побудові складних систем функціонування окремих предметних областей. Так, наприкладі університету – це формування рейтингів викладачів та кафедр, визначення показників успішності та якості навчання тощо; на прикладі обласної адміністрації – це визначення критичних показників розвитку регіону на основі даних, отриманих від організацій різної форми власності. Проте це складно зробити у зв'язку з невідповідністю між вимогами, що ставляться до інформаційних систем, та необхідністю організації (пошуку об'єктів, їх систематизації, узгодження, інтеграції даних) різнотипних інформаційних об'єктів у складну інформаційну систему, що проявляється через: слабку структуру зв'язків між об'єктами, потребу включення нових об'єктів у систему, недотримання загальних стандартів організації ведення документообігу, неможливість проведення систематизації через велику кількість об'єктів та їх різну природу. Актуальність роботи визначається такими обставинами.

Опрацювання інформаційних ресурсів, що використовують різні моделі даних, схеми керування тощо вимагає розроблення уніфікованого методу доступу до них для того, щоб надати можливість користувачу вибирати адекватний інструментарій для вивчення та використання різних засобів опрацювання даних. Необхідність у цьому виникає в організаціях, робота яких полягає в опрацюванні великої кількості різнотипних, взаємозалежних джерел даних, для яких не всі семантичні взаємозв'язки відомі і вказані. У деяких випадках семантичні зв'язки невідомі через невизначену кількість початкових джерел або через брак кваліфікованих людей у визначенні таких зв'язків. У інших випадках, не всі семантичні зв'язки необхідні для класифікації послуг користувачам. Тому в користувачів немає єдиної схеми, за якою вони можуть створювати запити відносно цільових задач.

Внаслідок керування різнотипними даними з метою розв'язання аналітичних задач стратегічного рівня виникає задача якості даних – відповідності вимогам користувачів. На рівні задач, для яких використовується точкове джерело, якість даних цього джерела є достатньою, і за-

довольняє (повністю чи частково) потреби осіб, що приймають рішення на їх основі. Проте використання даних з декількох джерел, наперед неузгоджених та з невідомими структурами, призводить до того, що якість даних різко знижується і вже не може задовольняти потреб користувача через неузгодженість форматів, різне подання, необхідне для вирішення проблеми.

Зміна масштабів і рівня задач – від оперативного опрацювання до аналітичного, призвела до необхідності: опрацювання даних за певною ієрархією; забезпечення цілісності даних – в системах зберігаються метадані, а не самі об'єкти; усунення дублювання даних, що надходять з різних джерел, визначення довіри до джерела даних, що є різними для різних областей та різних груп користувачів.

Проаналізуємо інформаційні технології для організації різнотипних інформаційних об'єктів та налагодження обміну інформації між ними.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Опрацюванням різнотипних неузгоджених даних дослідники займалися з 70-х років ХХ ст. Розроблені моделі та метамови опрацювання таких даних. Проте існуючі на сьогодні моделі та методи стосуються або лише наперед відомих типів даних (здебільшого, реляційних баз даних – праці Калініченка Л., Коха К.), або вирішують лише часткові задачі опрацювання різнотипних даних – наприклад, індексування для пришвидшення пошуку (Спакапетра С). Тому виникає необхідність управління розрізною інформацією, а саме її подання у зрозумілому для користувачів вигляді (навіть якщо вони не знають особливостей організації структур цього джерела даних) та опрацювання (пошуку, інтеграції, видобуванні нових знань тощо).

Одним із базових завдань опрацювання різнотипних даних є їхня інтеграція в сховище. Розроблені на сьогодні методи інтеграції даних за своєю функціональністю поділяються на два типи: інтеграція веб-застосувань (Лагозе К., Ван де Зомпель Г.) та інтеграція на основі сховищ даних (Косман Д., Гелеві А.). Проте проведений аналіз літературних джерел показав, що для опрацювання інформації від усіх об'єктів галузі необхідно поєднати обидва типи інтеграції та вдосконалити наявні моделі даних у

зв'язку з формуванням нових вимог до джерел даних та їх динамічному додаванні.

За усієї важливості відомих результатів, теоретичні та експериментальні дослідження повинні розвиватися в напрямку розроблення ефективних засобів опрацювання даних з різнотипних інформаційних ресурсів та вироблення засад і критеріїв оцінювання якості інтегрованих даних, які б підвищували ефективність прийнятих рішень.

Великі дані (Big Data) в інформаційних технологіях – набір методів та засобів опрацювання структурованих і неструктурованих різнотипних динамічних даних великих обсягів з метою їх аналізу та використання для підтримки прийняття рішень. Є альтернативою традиційним системам управління базами даних і рішеннями класу Business Intelligence. До цього класу відносять засоби паралельного опрацювання даних (NoSQL, алгоритми MapReduce, Hadoop) [1].

Визначальними характеристиками для великих даних є обсяг (volume, в сенсі величини фізичного обсягу), швидкість (velocity, в сенсах як швидкості приросту, так і необхідності високошвидкісної обробки та отримання результатів), різноманіття (variety, в сенсі можливості одночасної обробки різних типів структурованих і напівструктурованих даних).

З одного боку, через свою неоднорідність і постійне зростання Big Data вимагають до себе нестандартних підходів у зберіганні та опрацюванні. Для ефективної роботи необхідні комплексні рішення моніторингу, фільтрації, структурування та пошуку ієрархічних зв'язків. З іншого – використовуючи Big Data, можна спостерігати за величезною множиною змінних, і на основі наданої інформації виявляти глобальні тренди і висновки, розглядаючи певну ситуацію в перспективі.

Однією з технологій, що доцільно використовувати для роботи з Великими даними, є простір даних.

Простір даних – це блоковий вектор, що містить множини інформаційних продуктів предметної області, поділену на три блоки: структуровані дані (бази, сховища даних), напівструктуровані дані (XML, електронні таблиці) та неструктуровані дані (текст). Над цим вектором та його окремими елементами визначено операції та предикати, які забезпечують [1]: перетворення різних елементів вектора один в одного; об'єднання елементів одного типу; пошук в елементах за ключовим словом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як було зазначено вище, розглядається задача опрацювання даних, що надійшли з різних, наперед неузгоджених джерел. Ідеалізована схема опрацювання різнотипних даних подана на рис. 1.

Як бачимо, певна множина даних може бути відсутня у джерелах даних, а інша може перекриватися у різних інформаційних продуктах. Тому виникає проблема дублювання, відсутності, неповноти та нечіткості даних.

Невизначеність може виникати на рівні атрибуту, кортежу та відношення (невизначеність у схемі опису). По-

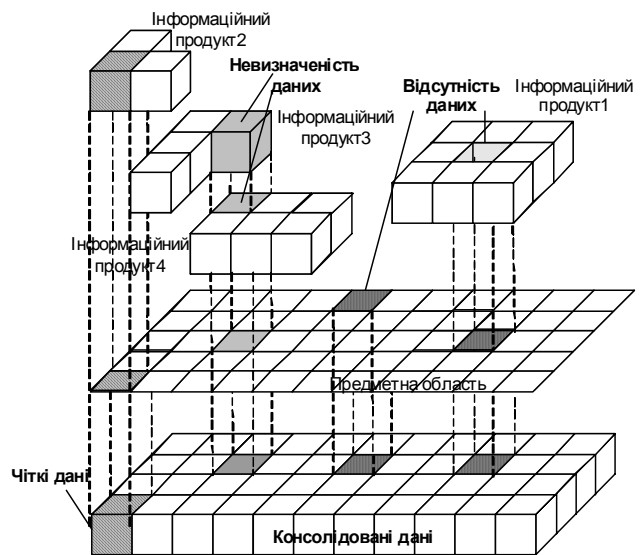


Рис. 1. Схема консолідації даних

ява невизначеності на рівні атрибута і кортежа у зв'язку з багатовимірністю відображення інформації призводить до поширення невизначеності на всі примірники опису певного концепту. Оскільки об'єднуються мільйони даних про об'єкти проблемної області, то опрацювання невизначеності традиційними засобами (інтервальна математика, багатозначна логіка) стає неефективним через велику кількість операндів.

Розглянемо проблеми подання невизначеностей у Big Data. Вважатимемо, що для тимчасового зберігання інформація потрапляє у федеративне сховище даних.

Об'єкт, який моделюється кортежем відношення фактів з відсутніми значеннями зовнішніх ключів, не має властивостей, описаних у відношеннях метаданих – така невизначеність притаманна і відношенням реляційних баз даних.

Відомо, що значення за вказаним атрибутом існує, але на певний час воно невідоме, що викликає необхідність застосовувати алгоритми видобування даних для усунення невизначеності – така невизначеність також існує у реляційних базах даних, але методи її опрацювання не можуть застосовуватись у сховищах даних, оскільки сховищам даних притаманні не тільки зв'язки між об'єктами різних типів, але й між об'єктами одного й того ж типу (виникнення ієрархії об'єктів).

Є неповна або часткова інформація про значення, для відображення якого використовується додатковий атрибут, що характеризує рівень істинності даних та містить значення функцій розподілу, лінгвістичних змінних, ступенів істинності багатозначних логік (може вводитися на рівні значення атрибута, підмножини значень атрибутів або кортежа). Існування такої невизначеності приводить до появи нечіткого відношення, яке може містити суперечливу інформацію.

Крім того, невизначеність може виникати внаслідок отримання агрегованої інформації, коли необхідно знати детальні дані, наприклад, невідомі обсяги продажу у вказаному регіоні за вказаним товаром.

Отже, специфіка Big Data:

- наявність множини різнотипних джерел;
- дублювання даних;
- неоднозначність опису джерел даних,

приводить до того, що невизначеність, яка у традиційних реляційних базах даних розглядалася у межах одного відношення і могла виникати на рівні атрибута, кортежа та на рівні відношення, в цьому випадку поширюється через сприйняття користувачем інформації на все федеративне сховище даних (гіперкуб даних). Тому для опрацювання невизначеності у гіперкубі даних необхідно використати якісно новий підхід, потреба застосування якого не виникала у реляційних базах даних.

У федеративному сховищі даних невизначеність може виникати і у відношеннях метаданих.

Проаналізуємо місця виникнення невизначеностей у сховищах даних.

1. Невизначеність у схемі посередника (медіатора).

Посередник (mediator) – програмний компонент, що, з одного боку, взаємодіє з користувачем інтегруючої системи, та, з іншого боку, з інформаційними джерелами. Він надає єдину «точку входу» (програмний інтерфейс) для запитів користувачів та виконує основні стадії опрацювання запиту:

- визначення джерел, які можуть містити результат запиту;
- декомпозицію на запити до конкретних джерел (на основі їхніх описів);
- оптимізацію плану виконання.

Схема посередника – це множина схем термінів, що зустрічаються у запитах. У термінах сховища даних посередником є метод визначення структури джерела. Схемою посередника є множина таблиць метаданих. Він не обов'язково охоплює усі атрибути будь-якого з джерел, але містить інформацію про домени джерела даних. Невизначеність у схемі посередника може виникнути з кількох причин. По-перше, якщо схеми посередника автоматично визначаються з даних джерел під час запуску, виникає невизначеність з приводу результатів запиту. По-друге, коли домени є широкими, виникає невизначеність стосовно відповідності схем даних чи їх перекриття.

Іншими словами, невизначеність у схемі посередника виникає внаслідок порівняння структур даних джерел для завантаження з них інформації. Така невизначеність призводить до неточного відображення схеми джерела і є джерелом для інших невизначеностей. Причинами невизначеності зазначеного типу є зовнішні (атаки), програмні, апаратні збурення в процесі відбору, опрацювання та завантаження даних.

2. Невизначеність у схемі відображення.

Зазвичай виникає у словнику синонімів (відношеннях метаданих місця). Вказаний тип є частковим випадком невизначеності у схемі посередника. Оскільки словник синонімів визначає семантичні відношення між термінами в джерелах даних, які є повністю незалежними, а багато первинних відображень схем будуть автоматично отримані, то отримані відображення можуть бути

неточними. Прикладом такої невизначеності може бути випадок, коли одним терміном ідентифікують різні об'єкти (полісемія).

3. Невизначеність даних сховища консолідованих даних.

Зрозуміло, що через неструктурованість даних, а також через автоматичність завантаження даних частина з них може бути невизначеною. Крім того, системи, які включають багато джерел, можуть містити недостовірні або суперечливі дані. Невизначеність може виникати навіть у тому випадку, коли первинні дані були точними, оскільки для відображення одної характеристики можуть використовуватись різні домени.

Прикладом предметної області, яка яскраво демонструє такий тип невизначеності, є система перевірки достовірності подій. У цьому випадку важливу роль відіграє ступінь довіри до джерела даних.

4. Невизначеність запитів.

Невизначеність запитів виникає у зв'язку з наявністю різних моделей даних та їх виразної потужності, оскільки система сама трансформує запит, отриманий від користувача, наприклад, на основі ключових слів. Під час перетворення цього типу запиту у SQL-запит до структурованого джерела може виникнути невизначеність з результатами запиту.

Невизначеність запитів яскраво демонструють пошукові системи, де за запитом користувачеві надається надто багато результатів пошуку і лише частина з них насправді задовольняє користувача.

ПОДАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ У СХОВИЩАХ ДАНИХ

Прокласифікуємо типи невизначеності за характером їх появи у просторі даних. Однією з перших робіт у цьому напрямі є робота Л. Заде [2]. Г. Цельмер підкреслює, що невизначеність, будучи об'єктивною формою існування оточуючого нас реального світу, обумовлена, з одного боку, об'єктивним існуванням випадковості як форми прояву необхідності, а з іншого – неповнотою кожного акту відображення реальних явищ в людській свідомості. Причому неповнота відображення принципово непереборна через загальний зв'язок всіх об'єктів реального світу і нескінченності їх розвитку. Виражається невизначеність в різноманітті перетворення можливостей у дійсність, в існуванні множини (як правило, нескінченної кількості) станів, в яких об'єкт, що змінюється в динаміці, може перебувати в майбутній момент часу (Цельмер, [3]).

У (Моїсєєв, 1975) наводиться така класифікація невизначеностей [5]:

- за ступенем невизначеності: імовірнісна, лінгвістична, інтервальна, повна невизначеність;
- за характером невизначеності: параметрична, структурна, ситуаційна;
- за використанням одержаної в ході керування інформації: переборна і невивправна.

У Дієва В. С. і Трухачева Р.І. [4, 6] наводиться детальніша класифікація невизначеностей в сучасних економічних системах (Дієв, 2001; Трухачов, 1981). У [7] визначено типи невизначеностей, природою яких є:

- значення невідоме (відсутнє);
- неповнота інформації;
- нечіткість (стохастичність) – використання розподілу для встановлення істинності знань;
- неточність (стосується числових даних);
- недетермінованість процедур виведення рішень (випадковість);
- ненадійність даних;
- багатозначність інтерпретацій;
- лінгвістична невизначеність: невизначеність значення слова, невизначеність змісту речення.

На рис. 2 подано рівні введення типів невизначеностей у сховищі даних. Невизначеності на рівні агрегованих даних виникають на основі атак – блокування даних у джерелі, приховування частини інформації тощо. Невизначеності на рівні метаданих виникають, в першу чергу, на основі програмних збоїв, а також через наявність атак на рівні джерел даних (змін структур даних джерел).

Розглянемо детальніше вказані типи невизначеностей та виявимо місця їх появи у сховищах даних [8]. Аналізуватимемо невизначеності, що виникають у результаті консолідації даних у єдине джерело (локальне чи віртуальне), а, отже, матимемо справу зі структурованими даними. Для подання єдиного джерела використовуватимемо реляційну модель.

Відсутність даних виникає внаслідок відсутності опису необхідної характеристики у метаданих. Відсутність може виникнути або через те, що необхідної характеристики не знайдено у інформаційних продуктах, що є джерелом для сховища даних, або вона не включена до метаданих через недостатній рівень довіри.

Невідомість даних зустрічається на рівні значення характеристики (атрибуту у реляційних базах даних) і означає, що значення притаманне об'єкту, але невідоме:

$$s = \{A, unk\},$$

де s – об'єкт, який описується кортежем характеристик консолідованих даних, unk – відсутнє значення, A – решту значень атрибутів характеристик кортежу консолідованих даних, $unk \cup A = s, unk \cap A = \emptyset$.

У випадку появи невідомості на рівні метаданих призводять до зашумлення всієї інформації, що отримується від джерела даних з невідомим атрибутом.

Неповнота є станом об'єкту, у якому є підмножина відсутніх значень характеристик. Якщо ця підмножина є порожня і ми говорили про реляційне подання даних, то отримаємо традиційний кортеж. Відсутність інформації є також частковим випадком неповноти інформації, коли кількість невідомих значень атрибутів кортежу дорівнює 1. Неповнота може з'являтися як і у відношенні, у яке інтегруються дані, так і у метаданих як результат збоїв роботи методу визначення структури джерела.

$$s = \{A, \{unk\}\}, |unk| < |A|.$$

Невизначеності типів 3–8 класифікують як неоднозначність даних, що переважно виникають на рівні об'єкта або підмножини значень характеристик, із яких формується кортеж. Вони виникають як результат атак на рівні джерел даних (інформаційних продуктів).

Нечіткість виникає через неповне вивчення або неоднозначне відображення характеристик сутності. Моделюється за допомогою доповнення схеми відношення додатковим атрибутом (атрибутами), значення яких містять рівень впевненості у істинності підмножини значень неключових атрибутів. Також вона подає рівень довіри до характеристики $P^{attr}(i, j)$.

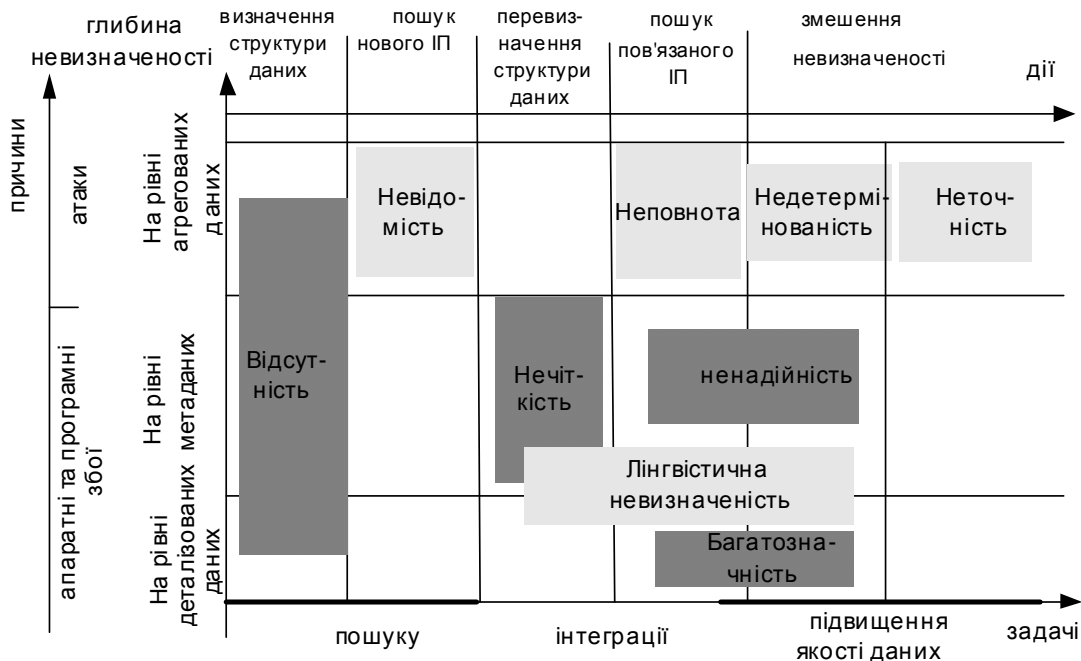


Рис. 2. Типи невизначеності у федеративному сховищі даних та рівні їх введення

$$s = \{A, unk_1, unk_2, \dots, unk_n\},$$

$$A \in K, A', 1 \leq n \leq |A'|,$$

$$unk_{attr} = P^{attr}(i, j), |A| \geq \{unk_1, unk_2, \dots, unk_n\}$$

де K – множина значень ключів, A' – підмножина значень неключових атрибутів. Рівень впевненості може позначатися за допомогою числової шкали, лінгвістичних оцінок, нечіткої величини тощо.

Неточність отримується внаслідок застосування математичних операцій над числовими даними (цього типу є також невизначеність, яка виникає внаслідок роботи з інтервальними величинами). Цей тип невизначеності моделюється за допомогою додаткового атрибута і може виникати через нечіткість в метаданих. Виникає доволі часто у зв'язку з опрацюванням даних, що зберігались на різних платформах, використовувались для вирішення різного класу задач.

$$s = \{A, \{unk\}\}, \{unk\} \subset A, Design(A) \in \{unk\}.$$

Недетермінованість процедур виведення рішень (випадковість) виникає у тому випадку, коли необхідно зберегти проміжні або кінцеві результати процедур виведення або прийняття рішень, а також – у відношенні фактів на рівні значень агрегованих атрибутів. Моделюється за допомогою розширення схеми даних та виникає винятково у агрегованих даних (гіперкубі):

$$s = s \cup \{unk\}, \{unk\} \notin A, Design(s) \in \{unk\}.$$

Ненадійність є типом невизначеності, який вважається однією із характеристик об'єкта. Хоча сама природа цієї характеристики є невизначеною, у відношенні як її домен використовують традиційну числову шкалу та застосовують до її значень традиційні математичні операції. Виникає внаслідок визначення довіри звернення до джерела даних $P(j)$. Моделюється за допомогою доповнення схеми каталогу даних додатковим атрибутом. Значення цього атрибута змінюється у результаті роботи простору даних. Представляється як характеристика, обернена до значення довіри до джерела даних.

$$s = s \cup [unk_j], unk_j \notin A, unk_j = \frac{1}{P(j)}.$$

Багатозначність інтерпретації є одним із джерел виникнення суперечностей. Такий тип невизначеності виникає найчастіше на рівні детальних даних через отримання інформації із різних джерел і неможливість визначення істинності даних. Для відображення цього типу невизначеності схему відношення доповнюють додатковим атрибутом, який містить ступінь впевненості у істинності даних кортежу. Від типу нечіткості відрізняється тим, що вводиться на рівні відношення.

Лінгвістична невизначеність пов'язана з використанням природної мови в інформаційних ресурсах (у текстових файлах та веб-ресурсах), які мають якісний характер, і може виникати внаслідок нерозуміння (незнання) значення слова або нерозуміння змісту речення. Такий тип невизначеності зустрічається у системах опрацювання текстової інформації (системи автоматизованого перекладу, системи для самонавчання тощо). У контексті сховищ даних виникає внаслідок опрацювання напівструктурованої інформації (тексти, веб-сторінки тощо).

Розглянуті типи невизначеностей можуть накладатись або бути джерелом появи одна одної.

МОДЕЛЬ СХОВИЩА ДАНИХ З НЕВИЗНАЧЕНІСТЮ

Схема сховища даних з невизначеністю Cg' – скінченна множина імен атрибутів $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, значення яких є чіткими; $\{A_unk_1, A_unk_2, A_unk_p\}$ з нечіткими або недетермінованими значеннями; множина імен атрибутів $\{Unk_1, Unk_2, \dots, Unk_m\}$, доменами яких є числові дані, що моделюють імовірнісні дані, значення функції приналежності нечітких множин, ступінь істинності багатозначної логіки, процентні відношення, коефіцієнти, різноманітні шкали або лінгвістичні оцінки; схеми словника синонімів Dic та схему метаданих Cg :

$$Cg' = \langle \{C_1, C_2, \dots, C_n\}, \{C_unk_1, C_unk_2, C_unk_p\}, \{Unk_1, Unk_2, \dots, Unk_m\}, Dic, Cg \rangle.$$

Невизначеними вважаються значення атрибутів множини C_unk , а рівень довіри до них зберігається у значеннях атрибутів множини Unk .

Для відображення зв'язків між атрибутами множин C_unk та Unk використано бінарне відношення $Meta$, значення якого визначаються на основі вибірки представлення джерела i в каталозі даних Cg :

$$Meta = |meta_{ij} \cdot \sigma_{arg(i)}(Cg)|, \forall i = \overline{1, p}, \forall j = \overline{1, m},$$

$$meta_{ij} = \begin{cases} 1, Unk_j \Leftrightarrow C_unk_i \wedge \sigma_{arg(j)}(Dic) \\ 0, \text{ в іншому випадку} \end{cases}.$$

Сума по рядках бінарного відношення рівна 1, оскільки вважатимемо, що ступінь довіри до атрибута не вказуватиметься двома і більше атрибутами із множини Unk :

$$\forall i = \overline{1, p}, \sum_1^n meta_{ij} = 1.$$

Введення відношення $Meta$ дозволить моделювати будь-які типи невизначеностей, не розширюючи доменів атрибутів.

Кортеж консолідованих даних dc – інформаційний опис об'єкта t джерела даних S , поданий у вигляді множини (кортежу) значень характеристик (атрибутів), підмножина значень атрибутів якого містить дані про об'єкт, джерело даних та синонімічні назви об'єкта, при-

Таблица 1. Программы для анализа и интерпретации сигнала ЭКГ

Название программы	Производитель	Ключевые возможности
ECG interpretation software C [1]	Schiller (Швейцария)	Больше 100 разных вариантов интерпретации ЭКГ
Signal-Averaged ECG Software (SAECG) [2]	Schiller (Швейцария)	Анализ сигнал-усредненной ЭКГ
Heart Rate Variability (HRV) Software [3]	Schiller (Швейцария)	Анализ вариабельности сердечного ритма (ЭКГ)
Marquette 12SL [4]	GE Healthcare (США)	Анализ ЭКГ в 12 отведениях; уникальные критерии оценки ST- и QT-сегментов и зубца Т; автоматическое обнаружение аритмий
Cardiosoft [5]	GE Healthcare (США)	Расширенный анализ сегмента ST; анализ альтернансов зубца Т; автоматическое и ручное измерение интервалов ЭКГ; анализ аритмий по 2 отведениям; уникальные алгоритмы фильтрации шумов и выравнивания изолинии
FP-804 [6]	Fukuda (Япония)	Основные измерения: ЧСС, RR, PR, QRS, время QT, QTc, электрическая ось, SV, RV5(6); ввод информации о пациенте; 120 типов кодов интерпретации и 130 типов кодов Миннесоты

- измерение информативных параметров;
- анализ вариабельности сердечного ритма;
- представление результатов анализа в графической форме;
- интерпретация результатов анализа информативных параметров;
- автоматическое формирование интерпретационного сообщения.

АЛГОРИТМ ДЕЛИНЕАЦИИ СИГНАЛА ЭКГ

Под делинеацией сигнала ЭКГ понимают определение временного положения характерных точек сигнала (зубцов P, Q, R, S, T и границ QRS-комплекса, P- и T-волн).

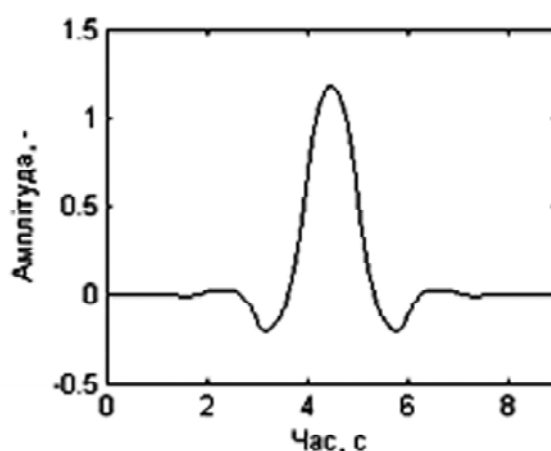
Циклический характер сигнала ЭКГ и его спектральные составляющие, которые, в основном, появляются в хорошо известных и различимых полосах частот, сделали ЭКГ подходящим кандидатом для многоуровневого разложения с помощью вейвлет-преобразования. Поэтому в основу алгоритма делинеации сигнала ЭКГ положено математический аппарат вейвлет-анализ.

В качестве материнского вейвлет был выбран биортогональный вейвлет «bior1.5». Графики скейлинг-функции и вейвлет-функции данного вейвлета представлены на рис. 1.

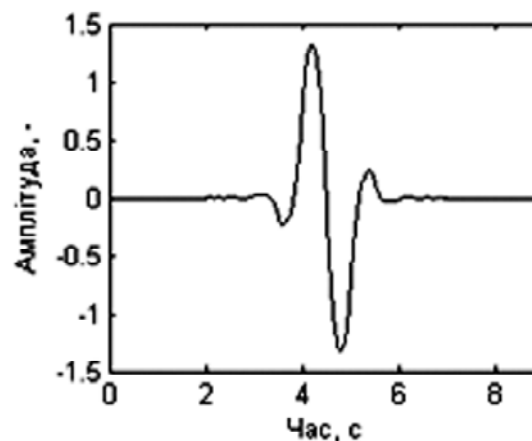
Вейвлет является симметричным, имеет компактный носитель, равен первой производной от скейлинг-функции и имеет один нулевой момент. Это делает его использование очень удобным при анализе сигнала ЭКГ.

При многоуровневом разложении сигнала (рис. 2) вычисляют коэффициенты аппроксимации A_j , которые представляют сглаженный сигнал, и коэффициенты детализации D_j , которые описывают высокочастотные колебания сигнала.

Вейвлет-преобразования с одним нулевым моментом можно рассматривать как многоуровневый дифференциальный оператор 1-го порядка сглаженного сигнала. В этом случае максимумы модуля вейвлет-преобразования представляют собой максимумы модуля первой производной сглаженного сигнала, а точки пересечения



а)



б)

Рис. 1. Графики скейлинг- и вейвлет-функции вейвлета «bior1.5»

вейвлет-преобразования с нулем соответствуют положениям локальных минимумов и максимумов сглаженного сигнала. Следовательно, точки пересечения вейвлет-преобразования с нулем на первом масштабе соответствуют положениям локальных экстремумов анализируемого сигнала [8].

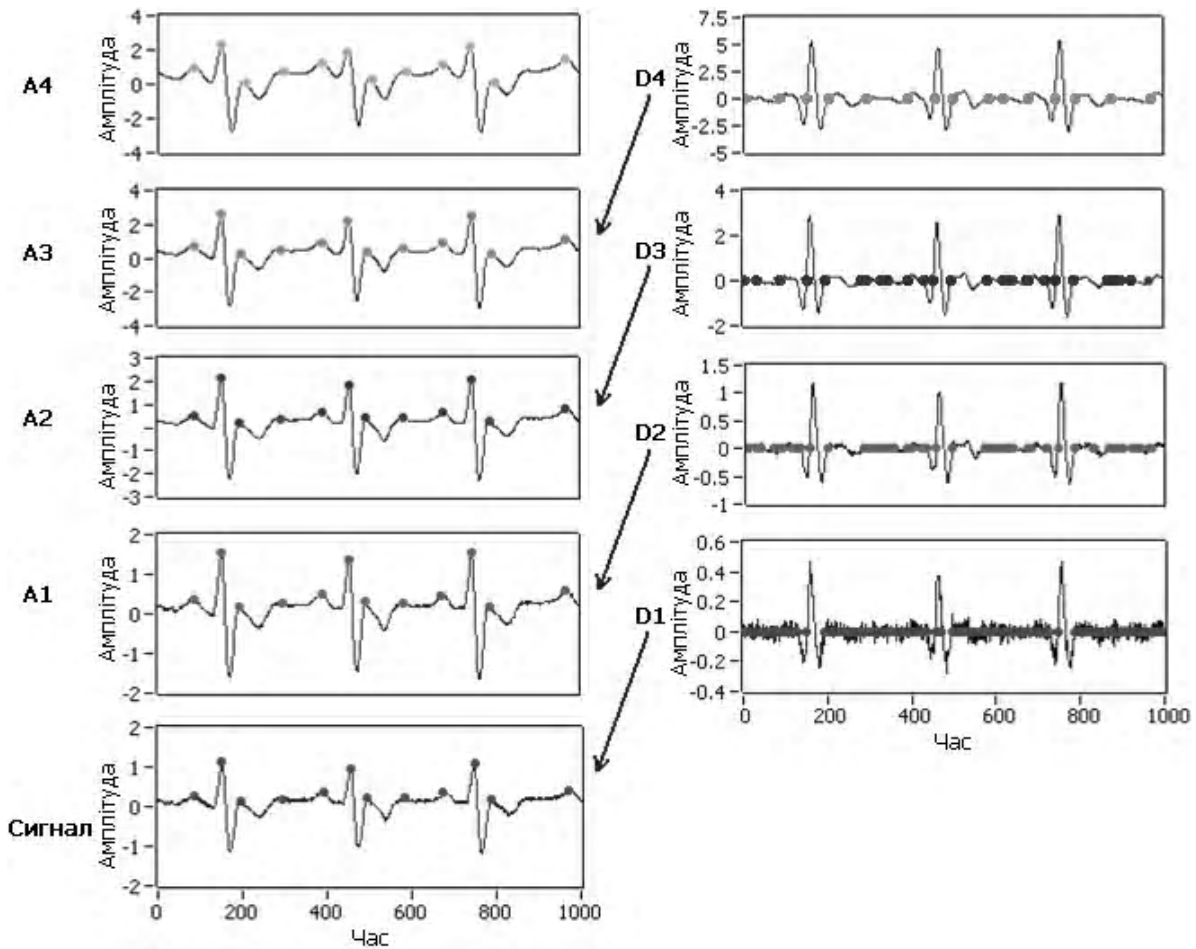


Рис. 2. Многоуровневый процесс уточнения положения пиков

Однако из-за присутствия помех возможно появление большого числа пересечений с нулем вблизи искомого максимума сигнала. Поскольку число пересечений с нулем уменьшается при увеличении масштаба, применяется схема, общая идея которого сводится к последовательному вычислению пересечений вейвлет-преобразования с нулем при продвижении от большого масштаба к меньшему. Таким образом можно отбросить шумы и артефакты.

Используя информацию о локальных максимумах, минимумах и точках пересечения с нулем на разных масштабах, алгоритм идентифицирует значимые точки сигнала (рис. 3). На первом шаге определяется положение QRS-комплексов. Далее выполняется поиск Q- и S-волн, затем устанавливаются границы QRS-комплекса. Используются два критерия: пороговый критерий и критерий локального минимума, который учитывает возможное перекрытие волн. После определения точек, которые задают положение начала и конца QRS-комплекса, QRS-комплекс исключают путем линейной интерполяции сигнала между этими точками. Это осуществляется с целью подавления влияния QRS на смежные P- и T-волны. Следующие шаги алгоритма – обнаружение пиков и установления границ P- и T-волн.

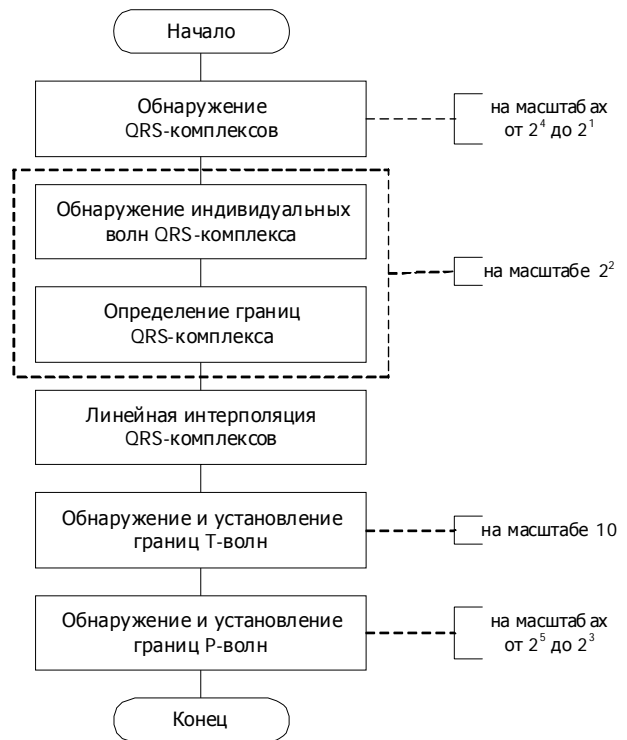


Рис. 3. Блок-схема алгоритма делинеации сигнала ЭКГ

НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАССИФИКАТОР КАРДИОЦИКЛОВ ЭКГ

После идентификации сигнала ЭКГ следующим этапом анализа является классификация кардиоциклов. Задача классификации кардиоциклов представляет собой задачу отнесения кардиоциклов к одному из четырех классов:

- NOR – без патологий;
- LBBB (Left Bundle Branch Block) – блокада левой ножки пучка Гиса;
- RBBB (Right Bundle Branch Block) – блокада правой ножки пучка Гиса;
- PVC (Premature Ventricular Contraction) – желудочковая экстрасистола.

Поскольку решение задачи классификации является одним из важнейших применений нейронных сетей, было принято решение построить классификатор кардиоциклов на основе нейронной сети (рис. 4).

На входы нейронов первого слоя поступает 24-элементный вектор признаков кардиоцикла (табл. 2), класс которого необходимо определить. Выходы нейронов первого слоя поступают на входы нейронов второго слоя, а выходы нейронов второго слоя формируют вектор выходов сети. Целевой вектор сети является 4-элементным вектором. Правильно функционирующая сеть должна ответить вектором с единицей в единственном элементе, позиция которого соответствует номеру класса представленного экземпляра. Все другие элементы вектора выхода должны быть нулями.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРОГРАММЫ

Для программной реализации выделенных возможностей было выбрано структуру программы, схема которой представлена на рис. 5.

Программа имеет иерархическую структуру и состоит из пяти функциональных модулей. Каждый модуль решает отдельную задачу.

Модуль предварительной обработки сигнала позволяет выполнить ресемплинг (передискретизацию) сигнала ЭКГ с частотой 250 Гц. Необходимость этой процедуры обусловлена тем, что программа должна одинаково обрабатывать сигналы с различными частотами дискретизации. Частота дискретизации 250 Гц признана

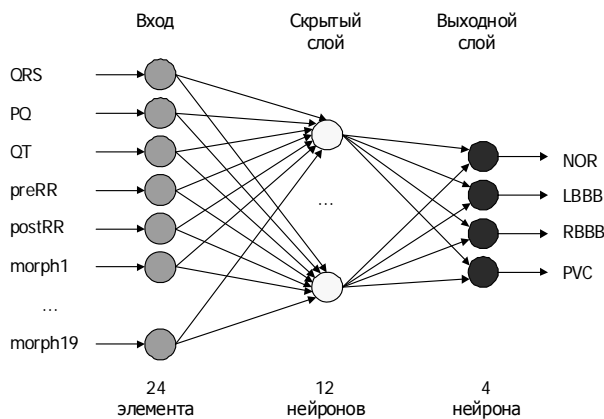


Рис. 4. Схема нейронной сети для классификации кардиоциклов

Таблица 2. Признаки для классификации кардиоциклов

Номер	Признак
1	Длительность QRS-комплекса (QRS)
2	Длительность интервала PQ (PQ)
3	Длительность интервала QT (QT)
4	Длительность предшествующего RR-интервала (preRR)
5	Длительность последующего RR-интервала (postRR)
6–15	Нормализованные морфологические признаки сигнала ЭКГ между началом и концом QRS-комплекса (10 отсчетов) (morph1-morph10)
16–24	Нормализованные морфологические признаки сигнала ЭКГ между концом QRS-комплекса и концов Т-волны (9 отсчетов) (morph11-morph19)

целесообразной, исходя из частотного спектра сигнала ЭКГ, который лежит в диапазоне 0.5 Гц-40 Гц, и необходимой частоты Найквиста (минимально допустимой частоты дискретизации сигнала).

Модуль делинеации сигнала предназначен для идентификации сигнала ЭКГ, то есть определения положения пиков и установления границ индивидуальных волн QRS-комплексов, Р- и Т-волн ЭКГ.

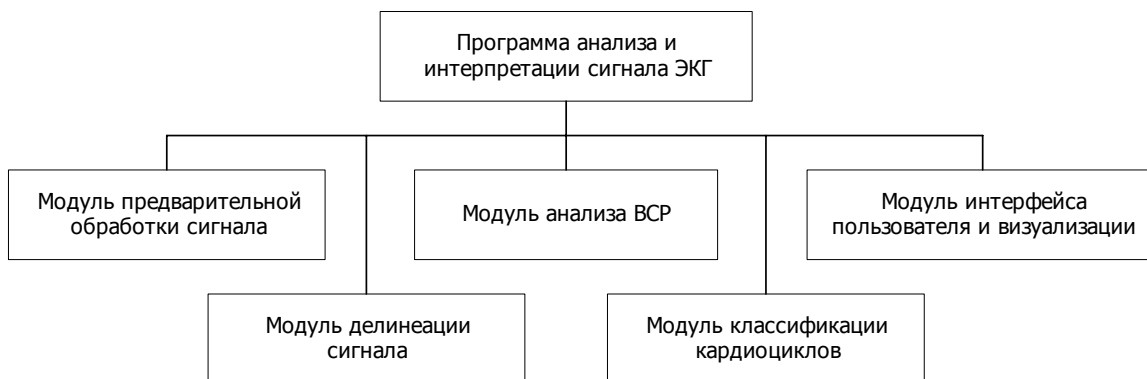


Рис. 5. Структурная схема программы

Модуль аналізу ВСР призначений для вичислення показателів ВСР часової області, побудови скагенограми, ритмограми та гістограми RR-інтервалів ЕКГ.

Модуль класифікації кардіоциклів призначений для визначення класу, до якого належить кожен кардіоцикл сигналу, з допомогою навченої нейронної мережі прямого поширення сигналу.

Модуль інтерфейсу користувача та візуалізації містить засоби реалізації графічного інтерфейсу користувача: графічні форми та функції, які обслуговують активацію елементів управління графічного інтерфейсу, а також засоби візуалізації результатів роботи програми та забезпечує введення та вивід даних.

СХЕМА РОБОТИ ПРОГРАМИ

Схема роботи програми представлена на рис. 6.

ІНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАЧА

На рис. 7 представлено вигляд головного вікна програми після аналізу патологічної ЕКГ. На графіку сигналу розміщено маркери вузлових точок та позначки кардіоциклів ЕКГ; побудовано скагенограму, гістограму та рит-

мограму RR-інтервалів, а також заповнено відповідною таблицею обчисленими значеннями показателів ВСР часової області.

ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Общепринятим способом оцінки якості та точності алгоритму делінеації сигналу ЕКГ є порівняння результатів його роботи з анотаціями, виконаними кваліфікованими кардіологами. Результати в анотаціях приймаються за 100 % достовірні, і на основі їх порівняння з результатами роботи алгоритму визначають його ефективність.

Дослідженню піддалися записи цифрових сигналів ЕКГ бази даних QT (QTDB) постійно оновлюваного банку даних комплексних фізіологічних сигналів PhysioBank, розташованого в вільному доступі в мережі Інтернет [9, 10]. База даних QTDB містить 105 записів ЕКГ в двох відведеннях по 15 хвилин та частоті дискретизації 250 Гц. Кожен запис має як мінімум 30 анотованих ударів з позначками початку, піку та кінця Р-хвилі та QRS-комплексу та позначками піку та кінця Т-хвилі. В цілому в базі даних анотовано більше 3600 ударів з різними ЕКГ-морфологіями [11].

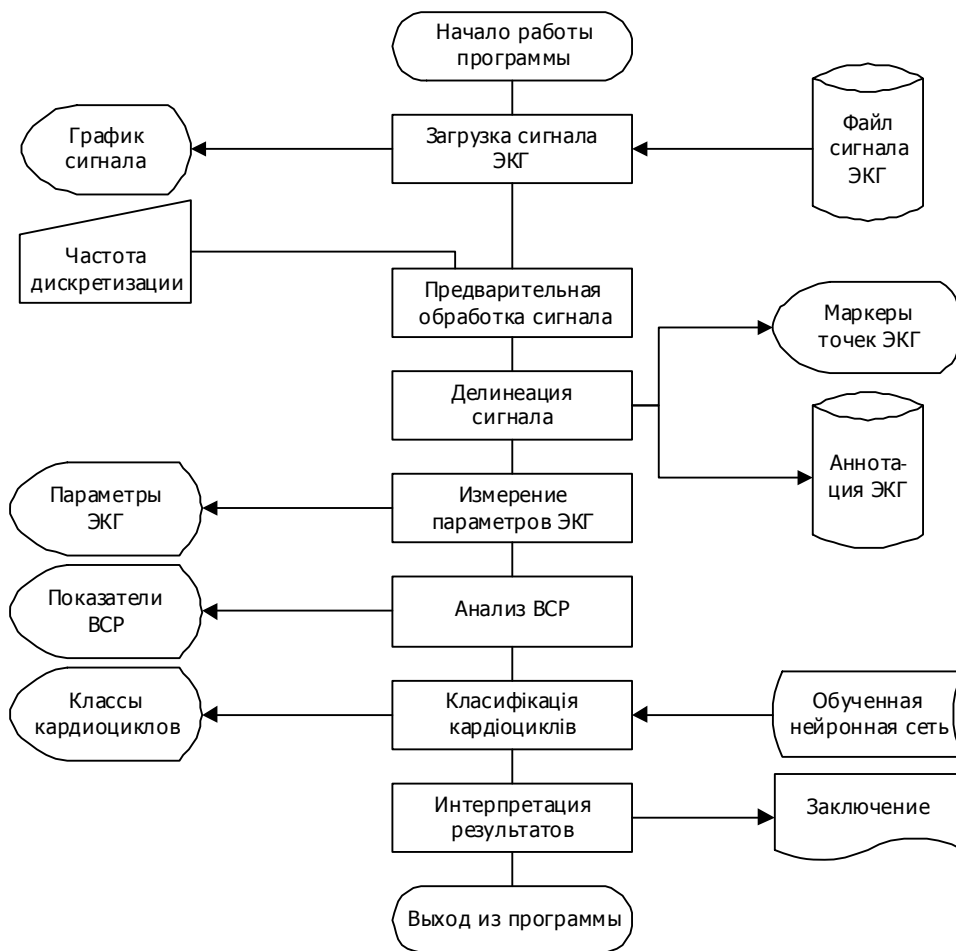


Рис. 6. Схема работы программы

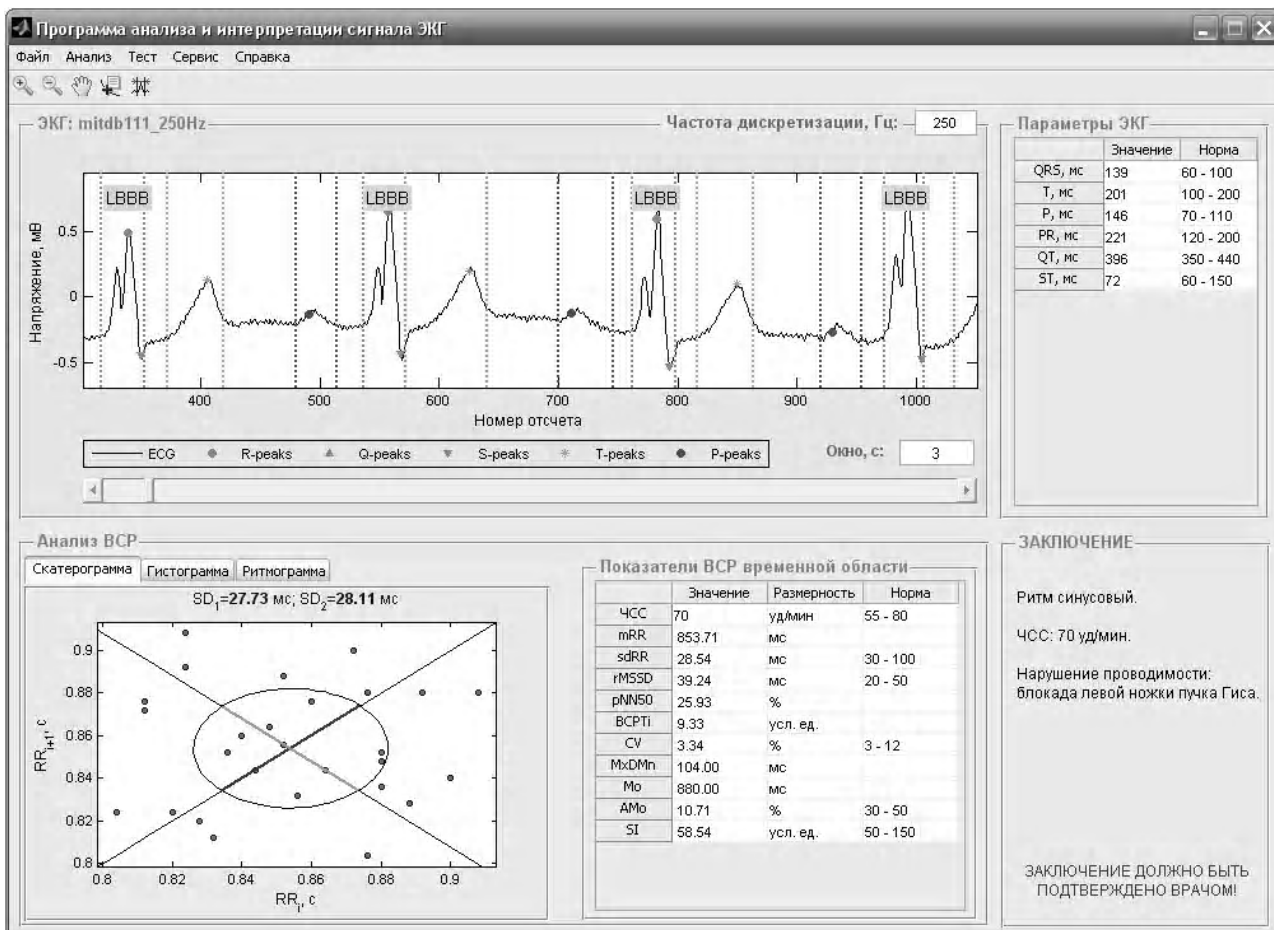


Рис. 7. Главное окно программы

QTDB широко используется в литературе, а результаты, полученные с использованием этой базы данных, позволяют выполнить прямое сравнение известных алгоритмов делинеации сигнала ЭКГ.

Для оценки качества работы алгоритма делинеации сигнала ЭКГ используются два показателя: чувствительность и прогностичность положительного результата (или положительная прогностичность) [12].

Чувствительность алгоритма Se – это способность алгоритма давать правильный результат. Определяется как доля истинно положительных случаев обнаружения точки среди всех фактически положительных случаев по формуле (1):

$$Se = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где TP – число истинно положительных случаев обнаружения точки (правильное обнаружение характерной точки); FN – число ложно отрицательных случаев обнаружения точки («ложный пропуск» – ошибка первого рода).

Положительная прогностичность P_+ – это вероятность фактического наличия характерной точки при положительном результате ее обнаружения. Определяется

как доля истинно положительных случаев среди всех положительных случаев обнаружения по формуле (2):

$$P_+ = \frac{TP}{TP + FP} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где FP – число ложных случаев обнаружения точки («ложное обнаружение» (ошибка второго рода), когда при отсутствии характерной точки ошибочно выносится решение о ее наличии).

Сравнение результатов работы разработанного алгоритма делинеации сигнала ЭКГ с результатами работы других алгоритмов [13, 14, 15] приведено в таблицах 3 и 4.

ВЫВОДЫ

Выполнен обзор существующих программных продуктов для анализа и интерпретации сигнала ЭКГ. Предложен алгоритм делинеации ЭКГ, основанный на обнаружении и временной локализации максимумов модуля вейвлет-преобразования сигнала. Для классификации кардиоциклов сигнала предложено использовать нейронную сеть. В среде MATLAB (v. 7.11) разработана программа для анализа и интерпретации ЭКГ. По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что программа имеет достаточную работоспособность и может использоваться по назначению.

Таблиця 3. Чувствительность алгоритмов делинеации сигнала ЭКГ

Алгоритмы	Характеристическая точка и число ее аннотаций						
	Р-начало	Р-пик	Р-конец	QRS-начало	QRS-конец	Т-пик	Т-конец
	3194	3194	3194	3623	3623	3542	3542
Алгоритм авторов	99,98	99,98	99,98	99,99	99,99	99,97	99,97
Martinez и др. [13]	98,87	98,87	98,75	99,97	99,87	99,87	99,87
Laguna и др. [14]	97,70	97,70	97,70	99,92	99,92	99,00	99,00
Boichat и др. [15]	98,87	98,87	99,91	99,97	99,97	99,87	99,87

Таблиця 4. Положительная прогностичность алгоритмов делинеации сигнала ЭКГ

Алгоритмы	Характеристическая точка и число ее аннотаций						
	Р-начало	Р-пик	Р-конец	QRS-начало	QRS-конец	Т-пик	Т-конец
	3194	3194	3194	3623	3623	3542	3542
Алгоритм авторов	99,97	99,97	99,97	99,98	99,98	99,97	99,97
Martinez и др. [13]	91,03	91,03	91,03	–	–	97,79	97,79
Laguna и др. [14]	91,17	91,17	91,17	–	–	97,74	97,71
Boichat и др. [15]	91,18	92,46	91,70	98,61	98,72	98,91	98,50

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- SCHILLER ECG Measurement and Interpretation Software for Children and Adult ECGs [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.schiller.ch/en/ECG_Interpretation.
- SAECG Analysis [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.schiller.ch/en/SAECG_Analysis.
- Heart Rate Variability [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.schiller.ch/en/HRV.
- Marquette 12SL ECG analysis program [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www3.gehealthcare.co/Marquette_12SL_ECG_Analysis.
- GE Healthcare CardioSoft [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www3.gehealthcare.in/en/Products/Categories/Diagnostic_ECG/Stress_Testing/CardioSoft#.
- Fukuda Denshi Resting ECG Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fukuda.com>.
- Дроздов, Д. В. Автоматический анализ ЭКГ: проблемы и перспективы [Текст] / Д. В. Дроздов, В. М. Леванов // Здравоохран. и мед. техн. – 2004. – № 1. – С. 10–13.
- Mallat, S. Zero-crossings of a wavelet transform / S. Mallat // IEEE Trans. on Information Theory. – 1991. – No. 37 (4). – P. 1019–1033.
- PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals [Circulation Electronic Pages] / A.L. Goldberger, L.A.N. Amaral, L. Glass, J.M. Hausdorff // Circulation – 2000. – Vol. 101 (23). – e215-e220. – Available online: <http://circ.ahajournals.org/cgi/content/full/101/23/e215>.
- PhysioNet: the research resource for complex physiologic signals [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.physionet.org>.
- A database for evaluation of algorithms for measurement of QT and other waveform intervals in the ECG / P. Laguna, R. Mark, A. Goldberg, G. Moody // Computers in Cardiology. – 1997. – Vol. 24. – P. 673–676.
- ANSI/AAMI EC57:1998 Testing and Reporting Performance Results of Cardiac Rhythm and ST Segment Measurement Algorithms.
- A wavelet-based ecg delineator: evaluation on standard databases / J. Martinez, R. Almeida, S. Olmos, A. Rocha, P. Laguna // IEEE Trans. on Biomedical Engineering. – 2004. – Vol. 51 (4). – P. 570–581.
- Laguna, P. Automatic Detection of Wave Boundaries in Multilead ECG Signals: Validation with the CSE Database / P. Laguna, R. Jani, P. Caminal // Computers and Biomedical Research. – 1994. – Vol. 27. – P. 45–60.
- Wavelet-based ECG delineation on a wearable embedded sensor platform / [Boichat N., Khaled N., Rincon F., Aienza D.] // Proc 6th IEEE Int Workshop on Body Sensor Networks. – 2009. – P. 256–261.

Стаття надійшла до редакції 31.03.2014.

Дубровін В. І.¹, Твердохліб Ю. В.², Харченко В. В.³¹Канд. техн. наук, професор, Запорізький національний технічний університет, Україна²Аспірант, Запорізький національний технічний університет, Україна³Інженер-програміст, Запорізький національний технічний університет, Україна

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ЕКГ

У статті виконано огляд існуючих програмних продуктів для аналізу та інтерпретації сигналу ЕКГ, запропоновано алгоритм ідентифікації ЕКГ, заснований на виявленні і часовій локалізації максимумів модуля вейвлет-перетворення, та нейромережевий класифікатор кардіоциклів. Розроблено програму для аналізу та інтерпретації ЕКГ. Проведено експерименти по делінеації сигналу. Дослідженню піддавалися запису цифрових сигналів ЕКГ бази даних QTDB. Результати роботи запропонованого алгоритму порівнювалися з опублікованими результатами роботи інших алгоритмів ідентифікації ЕКГ. Найістотніше покращення було виявлено у визначенні положення Р- і Т-хвилі.

Ключові слова: делінеація ЕКГ, вейвлет-аналіз ЕКГ, ключові точки ЕКГ, максимуми модуля вейвлет-перетворення, нейромережевий класифікатор кардіоциклів.

Dubrovin V. I.¹, Tverdohle J. V.², Kharchenko V. V.³

¹Ph. D., professor, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

²Postgraduate student, assistant, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

³Software Engineer, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

AUTOMATED SYSTEM FOR THE ANALYSIS AND INTERPRETATION OF ECG

An existing ECG analysis and interpretation software is reviewed in the paper. A wavelet-based ECG delineation algorithm which performs QRS detection and provides as well the locations of the peak(s) of P, Q, R, S, and T waves, and the P, QRS, and T wave boundaries using a single analysis stage: the dyadic wavelet transform of the ECG signal is proposed. A neural network for the classification of heartbeats is presented. ECG analysis and interpretation program is developed. The delineation algorithm has been validated using QTDB. The results have been compared with those of other published approaches and have shown that the developed algorithm provides a reliable and accurate delineation of the ECG signal, outperforming other algorithms, and with errors well within the observed intercardiologist variations. The most significant improvement was found in the T wave and P wave delineation.

Keywords: ECG delineation, ECG wavelet analysis, ECG fiducial points, wavelet transform modulus maxima, neural network heartbeat classifier.

REFERENCES

- SCHILLER ECG Measurement and Interpretation Software for Children and Adult ECGs [electronic resource]. – Access mode: www.schiller.ch/en/ECG_Interpretation.
- SAECG Analysis [electronic resource]. – Access mode: www.schiller.ch/en/SAECG_Analysis.
- Heart Rate Variability [electronic resource]. – Access mode: www.schiller.ch/en/HRV.
- Marquette 12SL ECG analysis program [electronic resource]. – Access mode: http://www3.gehealthcare.co/Marquette_12SL_ECG_Analysis.
- GE Healthcare Cardiosoft [electronic resource]. – Access mode: http://www3.gehealthcare.in/en/Products/Categories/Diagnostic_ECG/Stress_Testing/Cardiosoft#.
- Fukuda Denshi Resting ECG Software [electronic resource]. – Access mode: <http://www.fukuda.com>.
- Drozdov D.V. Avtomaticheskij analiz E'KG: problemy' i perspektivy', *Zdravookhr. i med. tekhn.*, 2004, Vol. 1, pp. 10–13.
- Mallat S. Zero-crossings of a wavelet transform, *IEEE Trans. on Information Theory*, 1991, Vol. 34, No. 4, pp. 1019–1033.
- PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals [Circulation Electronic Pages], *Circulation*, 2000, Vol. 101, No. 23, e215–e220. – Available online: <http://circ.ahajournals.org/cgi/content/full/101/23/e215>.
- PhysioNet: the research resource for complex physiologic signals [electronic resource]. – Access mode: <http://www.physionet.org>.
- Laguna P., Mark R., Goldberg A., Moody G. A database for evaluation of algorithms for measurement of QT and other waveform intervals in the ECG, *Computers in Cardiology*, 1997, Vol. 24, pp. 673–676.
- ANSI/AAMI EC57:1998 Testing and Reporting Performance Results of Cardiac Rhythm and ST Segment Measurement Algorithms.
- Martinez J., Almeida R., Olmos S., Rocha A., Laguna P. A wavelet-based ecg delineator: evaluation on standard databases, *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 2004, Vol. 51, No. 4, pp. 570–581.
- Laguna P., Janj R., Caminal P. Automatic Detection of Wave Boundaries in Multilead ECG Signals: Validation with the CSE Database, *Computers and Biomedical Research*, 1994, Vol. 27, pp. 45–60.
- Boichat N., Khaled N., Rincon F., Atienza D. Wavelet-based ECG delineation on a wearable embedded sensor platform, *Proc 6th IEEE Int Workshop on Body Sensor Networks*, 2009, pp. 256–261.

Kozhukhivska O. A.¹, Fefelov A. O.², Bidyuk P. I.³, Kozhukhivskiy A. D.⁴

¹Doctor of Philosophy, Senior Lecturer, Cherkassy State Technological University, Ukraine

²Doctor of Philosophy, Associate Professor, Kherson National Technical University, Ukraine

³Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University Of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

⁴Doctor of Technical Sciences, Professor, Cherkassy state technological university, Ukraine, E-mail: andrejdc@mail.ru

DECISION SUPPORT SYSTEM ARCHITECTURE FOR FORECASTING OF NONSTATIONARY FINANCIAL PROCESSES AND CORRESPONDING RISKS

A concept of a decision support system (DSS) for modeling and forecasting of economic and financial processes is proposed as well as its software implementation. The main functions of the DSS are in modeling and short-term forecasting of nonstationary nonlinear time series in various areas of human activities. On the basis of the proposed concept the software system was developed that possesses a set of the following useful features such as constructing of high quality forecasting mathematical models using time series statistical data; testing automatically quality of models and the forecasts based on them using appropriate sets of statistical criteria; combining various computational procedures for improving forecasts estimates; easy modification and expanding of existing system functionality. The software has been created with the use of cross platform instrumentation Qt and programming languages C++ and QML. Thanks to the open system architecture the functional possibilities of the system created can be expanded substantially at the expense of new model types, extra computational techniques and analytical instruments, possibilities for graphical representation of results as well as the means for interaction with user.

Keywords: model, economic and financial processes, statistical criteria, forecasts estimates risks.

1 INTRODUCTION

Development of decision support systems (DSS) for immediate practical applications is a popular research and engineering direction in many areas of human activities. Their application is widely spread thanks to the relatively simple system architecture and wide functional possibilities directed towards search of the best solutions for a particular problem. The most popular applications of DSS are modeling and forecasting problems, logistic problems solving, decision support in social, economic and financial areas, development of diagnostic tools and many others [1–3]. It was shown that DSS are especially useful in cases when the volume of computations necessary for forming alternative decisions is substantial [4, 5]. Very often decisions are based on short- and medium term forecasts what requires preliminary data processing techniques, forecasting model structure and parameter estimation, computing of forecasts using special forecasting functions, quality analysis for computations at every step of data processing. Besides, very often it is necessary to apply optimization procedures to find optimal solutions for many specific decision making problems [6]. Thus, the volume of computations may reach very high levels, and it becomes impossible to make quality decisions without appropriately designed DSS.

The system proposed here has been developed as most of modern applications and consists of two basic components: executable and instrumental. The executable component is characterized by a set of functions that allow the DSS to operate as an integrated unit. The basic system functions are as follows: (1) – knowledge and database forming for storing system data and knowledge (DKB), user's and tuning information; (2) – input of data into the system from possible local and net means; (3) – preliminary data processing aiming to data transforming to the form acceptable for parameter estimation and other computations; (4) – synthesis of forecasting models on the basis of time series (TS) data; (5) – testing of forecasting models in real time and in the simulation mode; (6) – reports forming on the results of time series models testing; (7) – current system state visualization as well as intermediate computational results together with the input data used; (8) – forms for the intermediate and final results visualization; (9) – tuning of system parameters and its separate modules. The instrumental component is represented by a set of means that allow a user to manipulate with computational techniques so that to create various combinations or hybrids of forecasting models potentially characterized by enhanced quality of forecasting. The instruments developed differ with their functional assignment, and their set can be expanded with the newly developed modules and integrated into the system.

2 PROBLEM FORMULATION

The purpose of the study is as follows: 1) analysis and development of requirements to the forecasting decision support system; 2) development of the system architecture; 3) development of functional layout of the system; 4) selection of mathematical modeling and forecasting techniques for financial and economic processes; 5) illustration of the system application to solving the problem of financial and economic processes forecasting with statistical data.

3 GENERAL REQUIREMENTS TO THE FORECASTING DECISION SUPPORT SYSTEM

Modern DSS should satisfy a set of requirements that make them especially suitable and useful for solving particular problems. These requirements include the following basic elements: – user adaptive and friendly interface allowing for prolonged exploitation without substantial strain of a user; – expanding data and knowledge base containing all necessary data, computational procedures, preliminary data processing tools, quality control criteria to be used at each step of data processing, constants, rules etc; – the central data processing subsystem should be highly flexible so that to select automatically and use appropriate high quality computational procedures at each step of decision making (alternatives generation); – means for communication with similar systems and databases in the frames of local and external computer nets; – to provide user with appropriate multiple representation forms for intermediate and final results of computing; – to provide a possibility for easy modifying and expanding the system functionality.

DSS interface should be highly flexible in the sense of adaptation to specific user (say at different levels of company management) and designed according to the modern requirements of human factors and ergonomics. Interface is the most important element of DSS from the point of view of its presentation for a potential user. A user may not be familiar with the modern optimization techniques used for alternatives generation but he understands well how convenient is the system interface and is it tiresome or not to work with him for many hours running. When selecting or developing new computational procedures it is very important to provide necessary quality of computing results. Usually acceptable errors of computing are formulated and registered on the stage of general problem statement regarding system design.

DSS development should be based on the system analysis principles that suppose the following: – hierarchical system design that corresponds to the hierarchy of decision making process by a user; – identification of possible sources of uncertainties that should be taken into consideration while model building, forecasts computing, and generation of decision alternatives; – hiring of optimization procedures whenever it is appropriate and possible; – development and implementation of adaptive computing procedures providing for appropriate model

correction with new data coming; – construction of integrated (combined) models and procedures aiming to quality improvement of the final result; – automatic control of all computational steps of data processing, model building and forecasts generation with appropriate statistical quality criteria; – functional completeness of a system providing availability of all necessary system functions for interaction, communication, computing, results representation etc.

4 MATHEMATICAL MODELS AND PARAMETER ESTIMATION TECHNIQUES FOR DSS

Very often appropriate fit to financial and economic processes provide the following types of models: autoregression $AR(p)$, autoregression with moving average $ARMA(p,q)$, autoregression with integrated moving average $ARIMA(p,d,q)$, multiple regression, nonlinear logit and probit models, structured equation models (that take into account in explicit way actual effects available in time series), polynomial models created by the group method of data handling (GMDH), vector autoregression, regression on support vectors, and some other types [7, 8]. An important problem is selection of model parameters estimation techniques. To provide a necessary choice for estimation of the variety models mentioned above the following parameter estimation techniques are used in the DSS: ordinary least squares (OLS), generalized least squares (GLS) and recursive least squares (RLS), maximum likelihood procedures (for linear and some nonlinear models), nonlinear least squares (NLS), two-stage LS, and Markov chain for Monte Carlo (MCMC). The last one represents a universal technique based upon simulation procedures that require appropriately generated sequences of pseudorandom numbers. The most known procedures of this class are: Metropolis algorithm, Metropolis-Hastings and others. An advantage of this approach is in its universality regarding the model types being estimated, though sometimes they are very time consuming and may not be suitable for application in real time. The optimization procedures hired are based upon genetic algorithms and artificial immune system ideas though some of them are classic of Newton type. Parameter estimates computed are tested for statistical significance using t – statistic when it is appropriate.

5 CONCEPTUAL SYSTEM MODEL

The system concept is based on the modern module architecture with the possibility of effective replacement of functional blocks without changing of an overall system structure. Following the modern approaches to software system development the separate functional blocks are integrated into subsystems using the functional similarity patterns (Fig. 1).

As of today we can define DSS as integrating the following five subsystems: (1) – data and knowledge base (DKB); (2) – computing subsystem; (3) – communication subsystem that provides communication with various devices; (4) – interaction subsystem; (5) – application instrumentation subsystem. The first four subsystems are

forming an executable component for application. The fifth subsystem integrates a set of algorithms that implement specific computational procedures related to the problem being solved. A short description of the subsystems and its basic modules is given below. The DKB subsystem contains all necessary for effective functioning of DSS knowledge and data resources. We can define the following basic elements forming the subsystem: reading and writing data formats for input of information into the system and output of intermediate and final results; quality estimation criteria for mathematical models and forecasts estimates; time series data; tuning data for the system and its separate elements; intermediate and final results of computing etc.

The computational subsystem implements a set of basic techniques for preliminary input data processing (preliminary data processing block). Each of the technique requires additional parameters for tuning. There are exists a possibility for a sequential application of several data processing methods for the same data what provides implementation of an effective multistep preliminary processing procedures.

The model synthesis block uses specific model parameter learning procedures to perform a model synthesis using the learning data from DKB. The subsystem is organized in a way that its functioning does not depend on a type of the problem

being currently solved. Such approach provides a possibility for compatibility of the system with arbitrary computational procedure taken from the instrumental subsystem. The purpose of the model testing subsystem is to estimate TS model quality using test sample (in off-line mode) or actual data in real time. A set of standard test statistics is used for the purpose, more specifically: determination coefficient (R^2), root mean squared error (RMSE), Durbin-Watson statistic (DW), Information Akaike criterion (AIC), mean error, mean absolute percentage error (MAPE), Theil coefficient etc. Besides, there is a possibility for loading and testing previously constructed models (retrospective analysis) that are stored in local DKB or in external memory. As a matter of fact the model testing block performs the basic goal function for the whole software system, i.e. it implements the forecasting function. This is the main element of the basic application (system) cycle (Fig. 2).

It performs continuous monitoring of forecasts deviation from observed TS values, and, dependently on the deviation amplitude, a decision is made on activation of the synthesis block and correcting of currently used model. The report generation function can be activated during the testing procedure or during model synthesis (learning). During the testing procedure the report reflects, as a rule, the learning

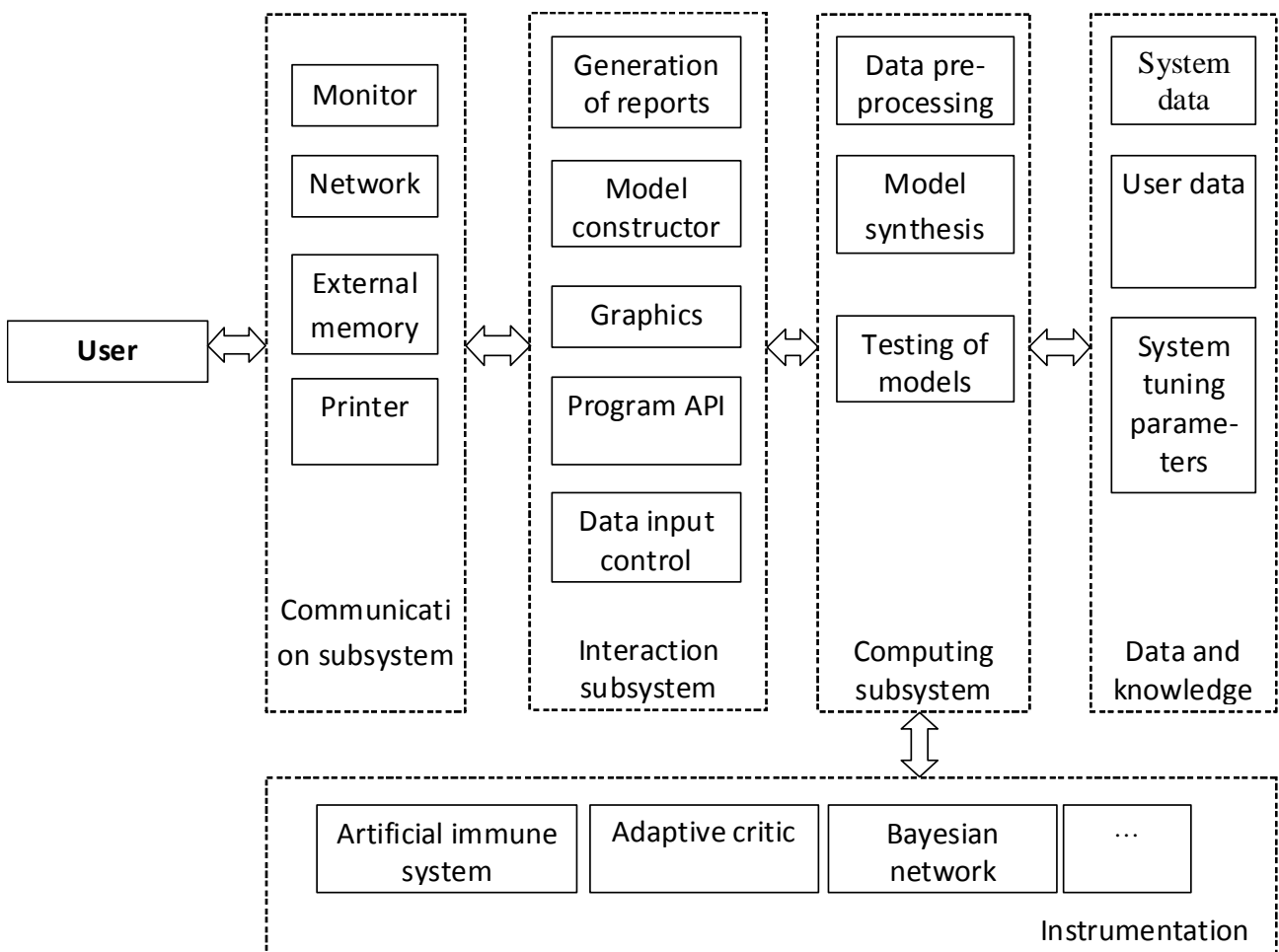


Fig. 1. General conceptual layout of the software system (system architecture)

statistic (dynamics of minimum and mean errors, current generation and mean affinity of a population in a case of the use of artificial immune system). The report can be given in a text or graphical form.

The graphical possibilities of the system are implemented with a set of classes of special graphical primitives representing the elements of mathematical graphs, diagrams, histograms etc. Using declarative features of the QML language these primitives allow to construct complex

compositions and to expand this way the possibilities for graphical data representation. Fig. 3 shows a hierarchy of classes for primitives, and Fig. 4 illustrates the process of a graph integration in QML.

Most of the classes for the hierarchy under consideration were implemented in C++ programming language and physically incorporated into graphical kernel of the system. In principle the functional possibilities of these classes could be reproduced using JavaScript language, which is a «seamless» supplement

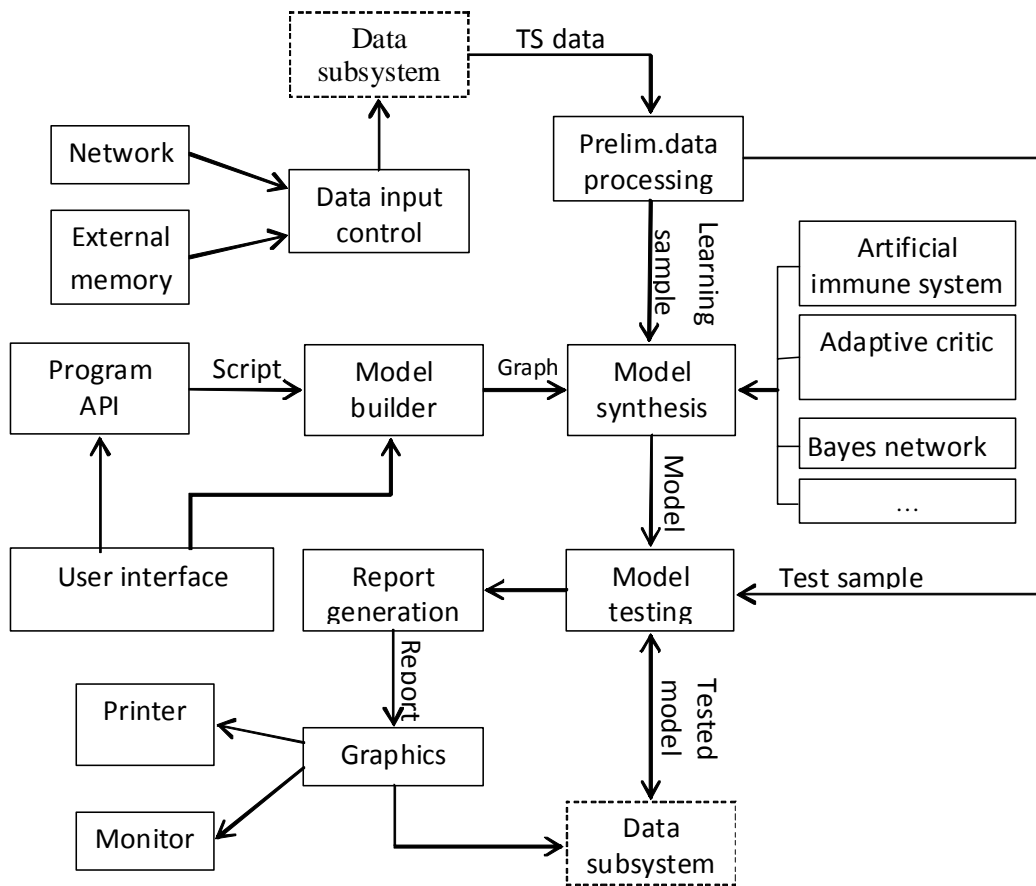


Fig. 2. Functional layout of the software system

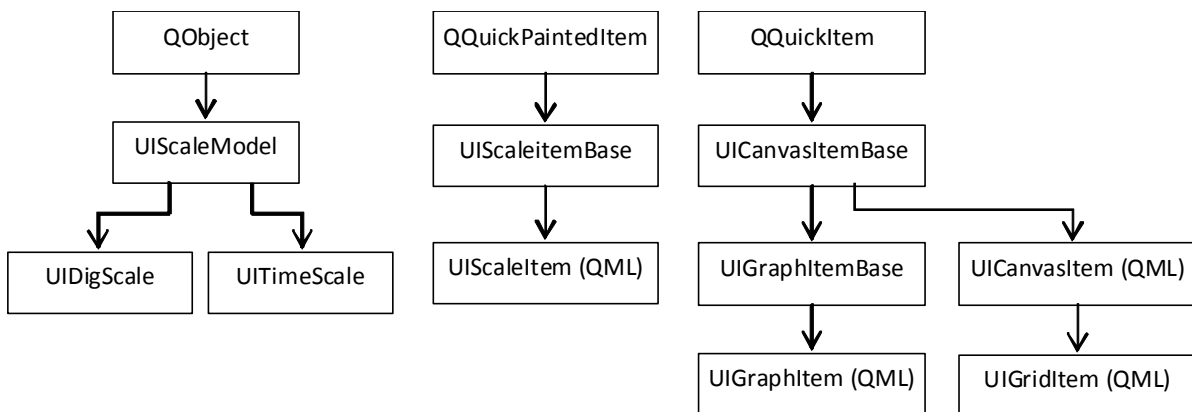


Fig. 3. Hierarchy of classes for graphical primitives of the system developed

```

Item{
  UIGridItem
  {
    // Interactive graphical grid of scale
  }
  UIScaleItem
  {
    // Graphical component of a vertical scale (of
    // values)
    id: verItem
    scaleModel: floatScale//Reference to the scale
    model

  UIScaleModel
  {
    // Model of scale for the floating point values
    id: floatScale
  }

  UITimeScale
  {
    // Model of scale for the time values
    id: timeScale// Reference to the scale model
  }
  }
  UIScaleItem
  {
    // Graphical component of horizontal scale (time)
    id: horItem
    scaleModel: timeScale
  }
}
    
```

Fig. 4. QML-document, implementing construction of a complex graphical component

for QML, but JavaScript is less effective from the point of view of computer graphics implementation because of lower productivity in comparison to C++.

The constructing of a computational instrument for the system is performed in analogous way. The system kernel contains for this purpose the sets of C++ classes that have their reflection in QML. For example, an artificial immune system could be «constructed» with «bricks» with pointing out to the source of data and its format, and the method for computing the goal function. On the other side such a hybrid could be constructed using some other computational procedure. Such a task could be performed with the use of a programmed interface of an application, as well as with the use of graphical interface. An example of hierarchy for classes for artificial immune system is given in Fig. 5.

Ais is the class of artificial immune system instrument (it incorporates the basic algorithm of functioning for this instrument);

Domain is a basic class for the methods of estimation of population individuals for artificial immune system (specific estimation techniques are for the moment the classes of wavelet-neural network, network of feed-forward propagation, and genetic system programming);

CfgParser is a class of configuration tuning for an instrument;

TimeDataStream is a basic class of a data source in the form of time series (the data sources are identified as local and the net sources).

Fig. 6 demonstrates the process of constructing of hybrid artificial immune system and wavelet-neural network in QML notation. An example of work with the instrument of artificial immune system is demonstrated in Fig. 7. For providing a normal functioning of the system developed it is necessary

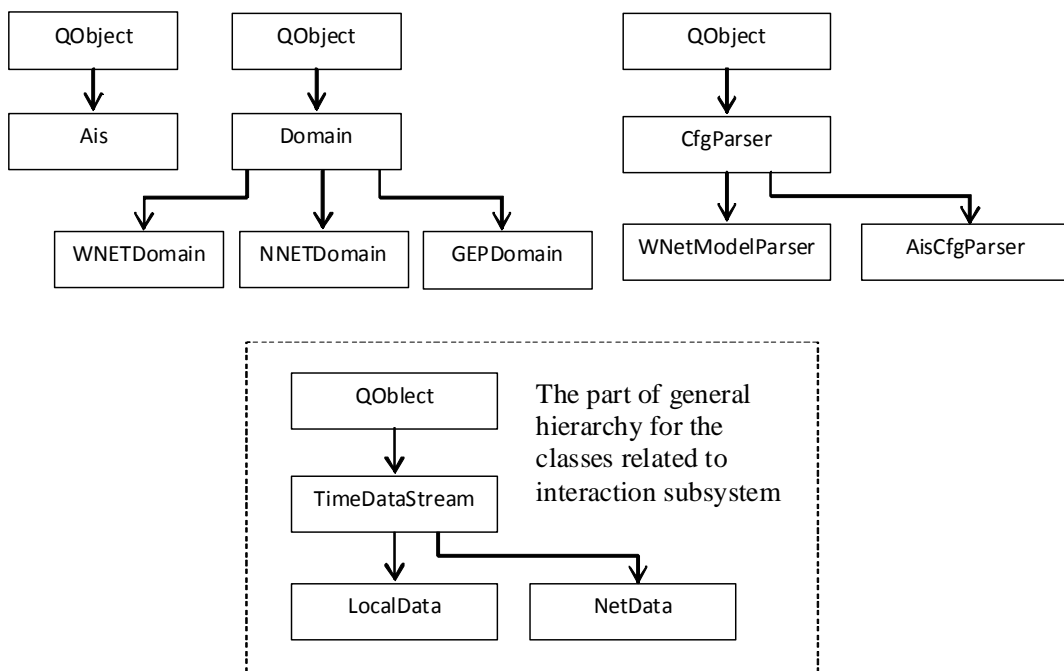


Fig. 5. Classes hierarchy for of the instrument of artificial immune system

to have personal computer and some other technical means with the following hardware characteristics: CPU AMD Phenom IIX2 with the clock frequency of 3 MHz or higher or Intel Pentium with analogous productivity; 2 Gb or more of RAM; video card with the OpenGL support; 100 Mb of hard

```

LocalData{
// Setting local data source
id: localData
}

Ais{
id: ais
cfgFilename: "ais.cfg"

// Setting the method of an individual
estimation for immune system
// In fact this is hybrid of immune
system and wavelet-neural network
domain: WNETDomain{
id: wnetDomain
dataStream: localData// Switching in the
class of a local data source

```

Fig. 6. QML-document implementing the construction of a hybrid artificial immune system and wavelet-neural network

disk space for the system files, and 500 Gb for database (the last value is optional, it depends on the specific task performed); operational system Microsoft Windows XP/Vista/7/8 or Linux; monitor with a definition of 1024x768 pixels or higher (it is recommended to use wide format monitor: 16:9 or 16:10). Besides, appropriate net adapter may be needed in a case of using external data sources or other devices that provide compatibility with the system.

The DSS developed was implemented using cross platform instrumentation Qt, and the basic programming language C++. The software developed with this instrumentation is compatible with the most modern operation systems after program compilation under selected OS without changing the source code.

One of the best features of Qt is the possibility of using the declarative tuning of programming language QML that is oriented (directly) to the user interface development. The modules written in C++ with the use of simple declarations could reflect their features and methods into QML documents. This feature provides a possibility for an effective organization of interaction between the program kernel and the graphic user interface. The declarative approach to constructing the user interface is, no doubt, more convenient in comparison to the classic imperative approach that is used in the most modern programming languages of general purpose including C++.

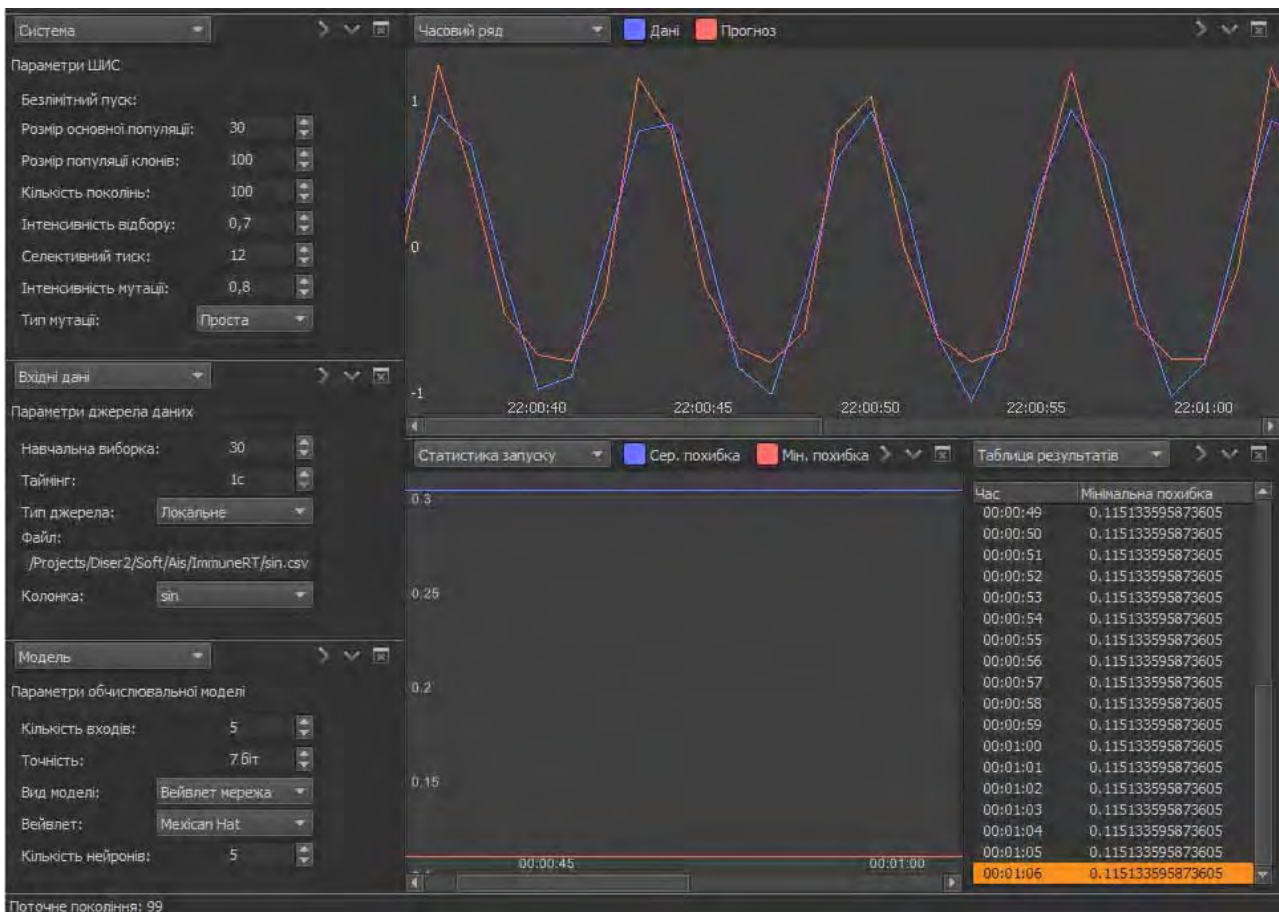


Fig. 7. The tuning parameters and result of functioning of the artificial immune system instrument

6 CONCLUSIONS

General requirements to the decision support system to be used for modeling and forecasting financial and economic processes have been worked out, and mathematical models for description of the processes selected. A concept of the decision support system was proposed as well as its software implementation. The main purpose of the DSS is modeling and short-term forecasting of nonstationary nonlinear time series, and the use of forecasts for estimation of some financial risks. On the basis of the concept proposed software system was developed that possesses a set of the following useful features: – it allows to construct high quality forecasting mathematical models using time series statistical data; – to test automatically quality of models and the forecasts based on them using appropriate sets of statistical criteria; – to add and combine various computational procedures for improving forecasts estimates; – to work with local and distributed databases; – to easily modify and expand existing system functionality.

The software has been created with the use of the cross platform instrumentation Qt and programming languages C++ and QML. Thanks to the open system architecture the functional possibilities of the system created can be expanded substantially (to desirable level) at the expense of extra computational techniques and analytical instruments, possibilities for graphical representation of intermediate and final results as well as the means for interaction with a user.

In the future studies it is supposed to incorporate into the DSS new models of static and dynamic Bayesian

networks types. Also a substantial attention should be paid to hiring the methods for appropriate taking into consideration of possible data and process uncertainties. New integrated data, models, and forecasts estimates criteria should be developed and integrated into the system to simplify the process of selection of the best modeling and forecasting results.

REFERENCES

1. *Hollsapple, C. W.* Decision support systems / C. W. Hollisapple, A. B. Winston. – Saint Paul : West Publishing Company, 1996. – 860 p.
2. *Burstein, F.* Handbook of Decision Support Systems / F. Burstein, C. W. Holsapple. – Berlin : Springer-Verlag, 2008. – 908 p.
3. *Sytnyk, V. F.* Decision support systems / V. F. Sytnyk. – Kyiv : KNEU, 2004. – 614 p.
4. *Polovcev, O. V.* System approach to modeling, forecasting, and control of financial and economic processes / O. V. Polovcev, P. I. Bidyuk, L. O. Korshevnyuk. – Donetsk : Oriental Publishing House, 2009. – 286 p.
5. *Bidyuk, P. I.* Computer based decision support systems / P. I. Bidyuk, O. P. Gozhij, L. O. Korshevnyuk. – Mykolaiv : Chornomorsky State University, 2012. – 380 p.
6. *Gupal, A. M.* Optimal recognition procedures / A. M. Gupal, I. V. Sergiyenko. – Kyiv: Naukova Dumka, 2008. – 232 p.
7. *Tsay, R. S.* Analysis of financial time series / R. S. Tsay. – Hoboken : Wiley & Sons, Inc., 2010. – 715 p.
8. *Bidyuk, P. I.* Methods of Forecasting / P. I. Bidyuk, O. S. Menyailenko, O. V. Polovcev. – Lugansk : Alma Mater, 2008. – 608 p.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2014.

Кожуховская О. А.¹, Фефелов А. А.², Бидюк П. И.³, Кожуховский А. Д.⁴

¹Канд. техн. наук, ст. преп., Черкасский государственный технологический университет, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, Херсонский национальный технический университет, Украина

³Д-р техн. наук, профессор, Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина

⁴Д-р техн. наук, профессор, Черкасский государственный технологический университет, Украина

АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СППР ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ФИНАНСОВЫХ ПРОЦЕССОВ И СОПУТСТВУЮЩИХ РИСКОВ

В работе рассматривается концепция построения системы поддержки принятия решений для моделирования и прогнозирования экономических и финансовых процессов, а также ее программная реализация. На основе предложенной концепции разработана программная система, которая имеет следующие положительные характеристики: построение высококачественных математических моделей на основе статистических данных в форме временных рядов; автоматическое тестирование качества моделей и оценок прогнозов, полученных на их основе, с помощью соответствующих множеств статистических критериев качества; комбинирование оценок прогнозов, полученных различными методами, с целью повышения качества комбинированного прогноза; простота модификации и расширения функций созданной системы.

Ключевые слова: модель, экономические и финансовые процессы, статистические критерии, прогнозирование оценок рисков.

Кожухівська О. А.¹, Фефелов А. О.², Бідюк П. І.³, Кожухівський А. Д.⁴

¹Канд. техн. наук, ст. викл., Черкаський державний технологічний університет, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, Херсонський національний технічний університет, Україна

³Д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет України «КПІ», Україна

⁴Д-р техн. наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, Україна, E-mail: andrejdc@mail.ru

АРХИТЕКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СППР ПРОГНОЗУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ФІНАНСОВИХ ПРОЦЕСІВ І СУПУТНИХ РИЗИКІВ

В роботі розглядається концепція побудови системи підтримки прийняття рішень для моделювання і прогнозування економічних і фінансових процесів, а також її програмна реалізація. На основі запропонованої концепції розроблена програмна система, яка має такі позитивні характеристики: побудова високоякісних прогнозуючих моделей на основі статистичних даних у формі часових рядів; автоматичне тестування якості моделей і оцінок прогнозів, отриманих на їх основі, за допомогою відповідних

множин статистичних критеріїв якості; комбінування оцінок прогнозів, обчислених різними методами, з метою підвищення якості комбінованого прогнозу; простота модифікації та розширення функцій створеної системи.

Ключові слова: модель, економічні і фінансові процеси, статистичні критерії, прогнозування оцінок ризиків.

REFERENCES

1. Holsapple C. W., Winston A. B. Decision support systems. Saint Paul, West Publishing Company, 1996, 860 p.
2. Burstein F., Holsapple C. W. Handbook of Decision Support Systems. Berlin, Springer-Verlag, 2008, 908 p.
3. Sytnyk V. F. Decision support systems. Kyiv, KNEU, 2004, 614 p.
4. Polovcev O. V., Bidyuk P. I., Korshevnyuk L. O. System approach to modeling, forecasting, and control of financial and economic processes. Donetsk, Oriental Publishing House, 2009, 286 p.
5. Bidyuk P. I., Gozhij O. P., Korshevnyuk L. O. Computer based decision support systems. Chornomorsky State University, 2012, 380 p.
6. Gupal A. M., Sergiyenko I. V. Optimal recognition procedures. Kyiv, Naukova Dumka, 2008, 232 p.
7. Tsay R. S. Analysis of financial time series. Hoboken, Wiley & Sons, Inc., 2010, 715 p.
8. Bidyuk P. I., Menyailenko O. S., Polovcev O. V. Methods of Forecasting. Lugansk, Alma Mater, 2008, 608 p.

РАСШИРЕНИЕ ФОРМАТА МИКРОКОМАНД ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ НА ГИБРИДНЫХ FPGA

В статье предлагается метод синтеза композиционного микропрограммного устройства управления в базе гибридных FPGA. Предлагается использование кодов классов псевдоэквивалентных операторных линейных цепей для уменьшения аппаратных затрат в схеме и снижения общей стоимости реализации устройства управления. Приведен пример применения предложенного метода синтеза. Показано, что экономия аппаратных ресурсов достигает 30 % при сохранении временных характеристик устройства.

Ключевые слова: композиционное микропрограммное устройство управления, расширение формата микрокоманд, LUT элемент, гибридные FPGA, снижение аппаратных затрат, псевдоэквивалентные ОЛЦ.

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные микропрограммные устройств управления (КМУУ) являются эффективным средством реализации линейных алгоритмов управления [1, 2]. При реализации схем КМУУ возникает задача уменьшения аппаратных затрат, которая является актуальной для синтеза любых устройств управления [3]. Методы решения этой задачи во многом зависят от особенностей элементного базиса [4].

В настоящее время активно развивается базис программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа гибридных FPGA (Field-Programmable Gate Array) [5, 6]. В состав таких ПЛИС входят элементы табличного типа (LUT, look-up table) и встроенные блоки программируемых логических матриц (ПЛИМ, PLA, programmable logic array). Примером могут служить микросхемы АРЕХ20К [7], которые включают блоки PLA, имеющие 32 входа ($S = 32$), 16 выходов ($t = 16$) и 32 терма ($q = 32$). Подобные FPGA не включают встроенных блоков памяти, на которых обычно реализуется система выходных функций КМУУ [8]. В настоящей работе предлагается метод синтеза КМУУ в базе гибридных FPGA, основанный на идеях, изложенных в работах [9, 10].

Целью исследования является уменьшение аппаратных затрат в схеме КМУУ при его реализации в базе гибридной FPGA за счет введения в формат микрокоманд кодов классов псевдоэквивалентных операторных линейных цепей (ПОЛЦ). Задачей исследования является разработка метода синтеза КМУУ, позволяющего уменьшить количество макроячеек ПЛИМ в схеме формирования функций возбуждения памяти. При этом алгоритм управления представляется в виде граф-схемы алгоритма (ГСА) [3].

1 ОСОБЕННОСТИ КМУУ С РАЗДЕЛЕНИЕМ КОДОВ

Обозначим в некоторой ГСА Γ множество вершин $B = \{b_0, b_E\} \cup B_1 \cup B_2$ и множество дуг E , соединяющих

эти вершины. Начальную вершину обозначим b_0 , конечную – b_E , множество операторных вершин – B_1 , множество условных вершин – B_2 . Операторная вершина $b_q \in B_1$ содержит набор микроопераций $Y(b_q) \subseteq Y$, где $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$ – множество микроопераций (выходных сигналов), вырабатываемых устройством управления. Условная вершина $b_p \in B_2$ содержит один элемент множества логических условий $X = \{x_1, \dots, x_L\}$ (входных сигналов). Под линейной понимается ГСА, в которой не менее 75 % от общего числа вершин являются операторными.

Операторная линейная цепь (ОЛЦ) является последовательностью операторных вершин граф-схемы алгоритма. Сформируем множество ОЛЦ $C = \{\alpha_1, \dots, \alpha_G\}$. При этом каждая пара соседних вершин ОЛЦ $\alpha_g \in C$ соединяется дугой $e_i \in E$ [2]. Каждая ОЛЦ $\alpha_g \in C$ имеет произвольное число входов I_g^k и только один выход O_g . Формальные определения ОЛЦ, их входов и выходов приведены в работе [2]. Отметим, что каждая вершина $b_q \in B_1$ соответствует микрокоманде MI_q , которая хранится в управляющей памяти (УП) по адресу A_q . Для адресации микрокоманд достаточно

$$R = \lceil \log_2(M) \rceil \text{ бит}, \quad (1)$$

где $M = |B_1|$. Пусть каждая ОЛЦ $\alpha_g \in C$ состоит из F_g операторных вершин, и пусть $F_{\max} = \max(F_1, \dots, F_G)$. Поставим в соответствие каждой ОЛЦ $\alpha_g \in C$ двоичный код $K(\alpha_g)$ разрядности

$$R_1 = \lceil \log_2(G) \rceil, \quad (2)$$

а каждой компоненте $b_q \in B_1$ – двоичный код $K(b_q)$ разрядности

$$R_2 = \lceil \log_2(F_{\max}) \rceil. \tag{3}$$

Для кодирования ОЛЦ используем элементы $\tau_r \in \tau$, а для кодирования их компонент – элементы $T_r \in T$, при этом $|\tau| = R_1$ и $|T| = R_2$. Кодирование компонент выполняется в естественном порядке, то есть

$$K[(b_g)_i] = K[(b_g)_{i-1}] + 1, \tag{4}$$

где $g = \overline{1, G}$; $i = \overline{1, F_G}$. Если для ГСА Γ выполняется условие

$$R_1 + R_2 = R, \tag{5}$$

то для ее интерпретации может быть использована модель КМУУ с разделением кодов (рис. 1), которую обозначим U_1 .

В КМУУ U_1 схема адресации микрокоманд (САМ) реализует систему функций возбуждения счетчика СТ (6) и регистра RG (7):

$$\Phi = \Phi(\tau, X); \tag{6}$$

$$\Psi = \Psi(\tau, X). \tag{7}$$

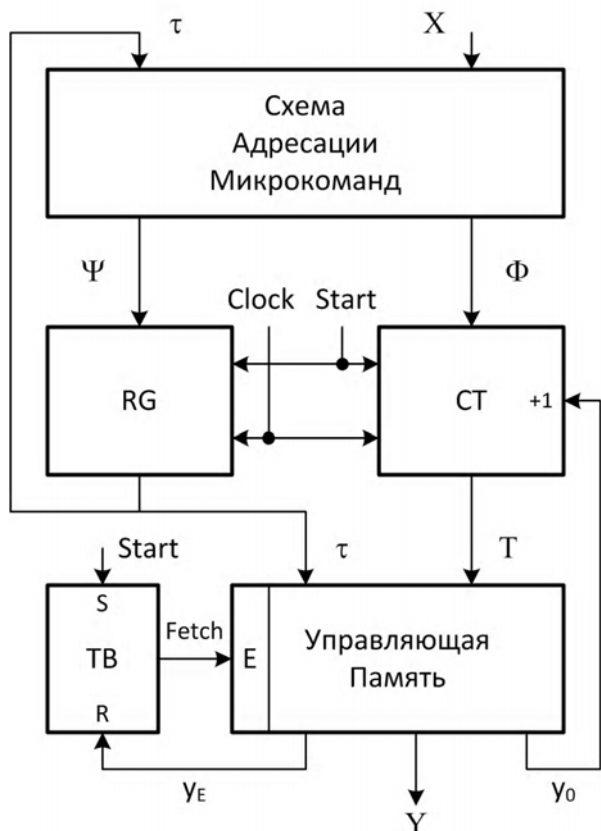


Рис. 1. Структурная схема КМУУ U_1

При таком подходе адрес микрокоманды MI_q определяется как

$$A(b_q) = K(\alpha_g) * K(b_q), \tag{8}$$

где вершина b_q входит в ОЛЦ $\alpha_g \in C$, а символом «*» обозначается операция конкатенации.

По сигналу Start в RG и СТ заносится начальный адрес микропрограммы, а триггер выборки ТВ устанавливается в единичное состояние, разрешая этим выборку команд из УП. Если считанная микрокоманда не соответствует выходу ОЛЦ, то одновременно с микрооперациями $Y(b_q)$ формируется сигнал y_0 , по которому к содержимому СТ прибавляется единица, формируя тем самым адрес следующей компоненты текущей ОЛЦ. Если микрокоманда соответствует выходу ОЛЦ, сигнал y_0 не формируется. При этом адрес входа следующей ОЛЦ формируется схемой САМ. При достижении окончания микропрограммы формируется сигнал y_E , триггер ТВ обнуляется, и выборка команд из УП прекращается.

Число термов в схеме САМ может быть уменьшено путем введения преобразователя кодов ОЛЦ в коды классов псевдоэквивалентных ОЛЦ [2]. ОЛЦ $\{\alpha_i, \alpha_j\} \subseteq C$ называются псевдоэквивалентными, если их выходы связаны с входом одной и той же вершины ГСА Γ . Следует заметить, однако, что реализация такого преобразователя требует дополнительных аппаратных ресурсов микросхемы FPGA.

В настоящей работе предлагается метод синтеза КМУУ в базе гибридных FPGA, основной целью которого является уменьшение аппаратных затрат в схеме устройства управления.

2 ОСНОВНАЯ ИДЕЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Пусть ОЛЦ $\alpha_g \in C_1$, если $\alpha_g \in C_1$ и ее выход не связан с входом конечной вершины ГСА Γ . Найдем разбиение $\Pi_C = \{B_1, \dots, B_I\}$ множества C_1 на классы ПОЛЦ. Закодируем классы $B_i \in \Pi_C$ двоичными кодами $K(B_i)$ разрядности

$$R_I = \lceil \log_2(I) \rceil. \tag{9}$$

В работах [9, 10] предлагается ввести в формат микрокоманд поле $K(B_i)$. При этом управляющая память реализуется на встроенных блоках памяти. Однако в случае гибридных FPGA такие блоки отсутствуют. Функцию блоков встроенной памяти могут выполнять LUT элементы, которые можно рассматривать как блок памяти с S_L входами и одним выходом. Очевидно, LUT элемент имеет 2^{S_L} ячеек памяти.

Пусть для данной ГСА Γ выполняется отношение

$$S_L \geq R. \tag{10}$$

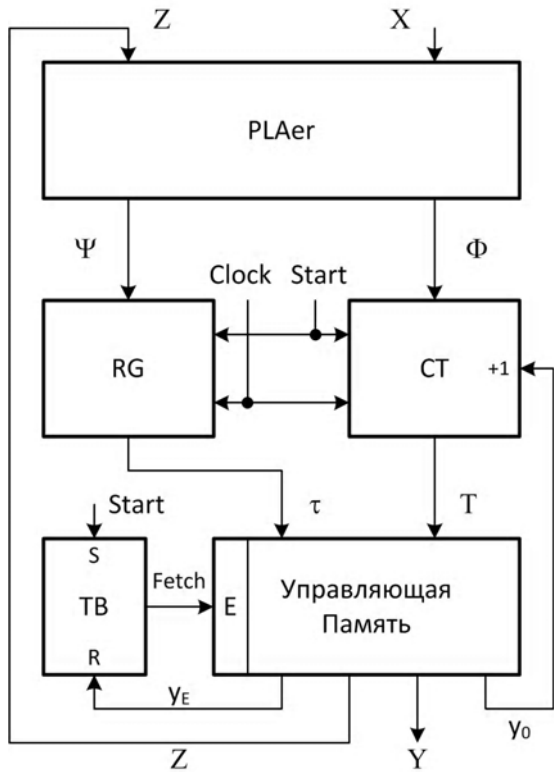


Рис. 2. Структурная схема КМУУ U_2

В КМУУ U_2 схема САМ реализуется в виде совокупности блоков PLA, называемой PLAer. Схема УП реализуется из совокупности элементов LUT, называемой LUTer. Блоки СТ и RG также реализованы на LUT элементах.

Классы $B_i \in \Pi_C$ закодированы переменными z_r , образующими множество $Z = \{z_1, \dots, z_{R_I}\}$. Блок PLAer реализует функции

$$\Phi = \Phi(Z, X); \tag{11}$$

$$\Psi = \Psi(Z, X). \tag{12}$$

Блок LUTer реализует функции

$$Y = Y(\tau, T); \tag{13}$$

$$Z = Z(\tau, T) \tag{14}$$

$$y_0 = y_0(\tau, T). \tag{15}$$

В настоящей работе предлагается метод синтеза КМУУ U_2 , включающий следующие этапы:

1. Формирование множеств C , C_1 и Π_C для ГСА Γ .
2. Кодирование ОЛЦ, их компонент и классов $B_i \in \Pi_C$.
3. Формирование содержимого блока LUTer.
4. Формирование таблицы блока PLAer.
5. Синтез логической схемы КМУУ.

3 ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

Пусть ГСА Γ_1 содержит $G = 7$ ОЛЦ: $C = \{\alpha_1, \dots, \alpha_7\}$, где $\alpha_7 \notin C_1$. В множестве C_1 выделены $I=3$ класса ПОЛЦ: $\Pi_C = \{B_1, B_2, B_3\}$, где $B_1 = \{\alpha_1\}$, $B_2 = \{\alpha_2, \alpha_3\}$, $B_3 = \{\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6\}$. ОЛЦ α_i сформированы из следующих последовательностей операторных вершин: $\alpha_1 = \langle b_1, b_2, b_3 \rangle$, $\alpha_2 = \langle b_4, b_5, b_6, b_7 \rangle$, $\alpha_3 = \langle b_8, b_9 \rangle$, $\alpha_4 = \langle b_{10}, b_{11}, b_{12} \rangle$, $\alpha_5 = \langle b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16} \rangle$, $\alpha_6 = \langle b_{17}, b_{18} \rangle$, $\alpha_7 = \langle b_{19}, b_{20} \rangle$. Согласно (2) для кодирования ОЛЦ достаточно $R_1 = 3$ переменных из множества $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3\}$. Максимальное количество компонент $F_{\max} = 4$, для их кодирования согласно (3) достаточно $R_2 = 2$ переменных из множества $T = \{T_1, T_2\}$. В общем случае для кодирования $M = 20$ операторных вершин согласно (1) достаточно $R = 5$ двоичных разрядов, следовательно, условие (5) выполняется, и применение метода разделения кодов целесообразно. При этом для кодирования $I=3$ классов ПОЛЦ согласно (9) необходимы $R_I = 2$ переменные, которые формируют множество $Z = \{z_1, z_2\}$.

Закодируем ОЛЦ $\alpha_g \in C$ и их классы произвольным образом: $K(\alpha_1) = 000, \dots, K(\alpha_7) = 110$; $K(B_1) = 00, \dots, K(B_3) = 10$. Для выполнения условия (4) присвоим первой компоненте каждой ОЛЦ $\alpha_g \in C$ код 00, второй – 01, третьей – 10, четвертой – 11. Это позволит определить адреса $A(b_q)$ микрокоманд КМУУ $U_2(\Gamma_1)$, показанные в табл. 1. Здесь и далее запись $U_i(\Gamma_j)$ обозначает КМУУ U_i , которое интерпретирует ГСА Γ_j .

Из табл. 1 имеем, например, $A(b_6) = 00110$, $A(b_{18}) = 10101$ и т. д.

Формат микрокоманд КМУУ U_2 включает поля y_0 , y_E , FY , FB , где поле FY содержит код набора микроопераций, а поле FB – код класса $B_i \in \Pi_C$. Если $y_0 = 1$, то содержимое поля FB игнорируется.

Содержимое блока LUTer КМУУ $U_2(\Gamma_1)$ показано в табл. 2. Принцип формирования содержимого блока LUTer тривиален. В строку с адресом $A(b_q)$ записывается набор микроопераций $Y(b_q)$. Если вершина $b_q \in B_1$ не является выходом ОЛЦ $\alpha_g \in C$, то в строку с адресом $A(b_q)$ записывается микрооперация y_0 . В противном случае в эту строку записывается код $K(B_i)$, где $\alpha_g \in B_i$. Если вершина $b_q \in B_1$ связана с конечной вершиной ГСА, то в строку с адресом $A(b_q)$ заносится микрооперация y_E .

В табл. 2 дано символічне содериме блоку LUTer, а перехід до бітовим строкам не представляє складностей.

Пусть переходы из выходов ОЛЦ $\alpha_g \in C_1$ представлены следующей системой обобщенных формул переходов [2]:

$$\begin{aligned} B_1 &\rightarrow x_1 b_4 \vee \overline{x_1 x_2} b_6 \vee \overline{x_1 x_2} b_8; \\ B_2 &\rightarrow x_3 x_4 b_{10} \vee x_3 \overline{x_4} b_{13} \vee \overline{x_3 x_5} b_{19} \vee \overline{x_3 x_5} b_{16}; \\ B_3 &\rightarrow x_5 b_{11} \vee \overline{x_5 x_3} b_{17} \vee \overline{x_5 x_3} b_8. \end{aligned} \quad (16)$$

Подобная система является основой для формирования таблицы блока PLAer со столбцами $B_i, K(B_i), b_q, A(b_q), X_h, \Psi_h, \Phi_h, h$. Назначение столбцов ясно из табл. 3, задающей переходы для класса $B_3 \in \Pi_C$.

Адреса микрокоманд берутся з табл. 1. Отметим, что $\Psi = \{D_1, D_2, D_3\}, \Phi = \{D_4, D_5\}$. Общее число строк $H_2(\Gamma_j)$ в таблице блока КМУУ $U_2(\Gamma_j)$ совпадает с числом термов в системе обобщенных формул переходов.

Таблица 1. Адреса микрокоманд КМУУ $U_2(\Gamma_1)$

$T_1 T_2 \backslash \tau_1 \tau_2 \tau_3$	000	001	010	011	100	101	110
00	b_1	b_4	b_8	b_{10}	b_{13}	b_{17}	b_{19}
01	b_2	b_5	b_9	b_{11}	b_{14}	b_{18}	b_{20}
10	b_3	b_6	*	b_{12}	b_{15}	*	*
11	*	b_7	*	*	b_{16}	*	*

Таблица 2. Сoderиме блоку LUTer КМУУ $U_2(\Gamma_1)$

$T_1 T_2 \backslash \tau_1 \tau_2 \tau_3$	000	001	010	011	100	101	110
00	$y_0 Y(b_1)$	$y_0 Y(b_4)$	$y_0 Y(b_8)$	$y_0 Y(b_{10})$	$y_0 Y(b_{13})$	$y_0 Y(b_{17})$	$y_0 Y(b_{19})$
01	$y_0 Y(b_2)$	$y_0 Y(b_5)$	$z_2 Y(b_9)$	$y_0 Y(b_{11})$	$y_0 Y(b_{14})$	$z_1 Y(b_{18})$	$y_E Y(b_{20})$
10	$Y(b_3)$	$y_0 Y(b_6)$	*	$z_1 Y(b_{12})$	$y_0 Y(b_{15})$	*	*
11	*	$z_2 Y(b_7)$	*	*	$z_1 Y(b_{16})$	*	*

Таблица 3. Фрагмент таблицы блоку PLAer КМУУ $U_2(\Gamma_1)$

B_i	$K(B_i)$		b_q	$A(b_q)$					X_h	Ψ_h	Φ_h	h
	z_1	z_2		τ_1	τ_2	τ_3	T_1	T_2				
B_3	1	0	b_{11}	0	1	1	0	1	x_5	$D_2 D_3$	D_5	1
			b_{17}	1	0	1	0	0	$\overline{x_5 x_3}$	$D_1 D_3$	–	2
			b_8	0	1	0	0	0	$\overline{x_5 x_3}$	D_2	–	3

В нашем примере, $H_2(\Gamma_1)=10$. Отметим, что $H_1(\Gamma_1)=20$, где $H_i(\Gamma_j)$ обозначает число строк в таблице блоку PLAer КМУУ U_i , интерпретирующей ГСА Γ_j .

Системы (11)–(12) формируются по таблице переходов. Так, из табл. 3 можно построить фрагменты ДНФ:

$$\begin{aligned} D_1 &= \overline{z_1 z_2 x_5 x_3}; \\ D_2 &= z_1 \overline{z_2 x_5} \vee z_1 \overline{z_2 x_5 x_3}; \\ D_3 &= z_1 \overline{z_2 x_5} \vee z_1 z_2 \overline{x_5 x_3}. \end{aligned} \quad (17)$$

При выполнении условий

$$S \geq L + R_1 + R_3; \quad (18)$$

$$t \geq R_1 + R_2; \quad (19)$$

$$q \geq H_2(\Gamma_j), \quad (20)$$

блок PLAer тривиальным образом реализуется на одной макроячейке PLA. Если эти отношения нарушаются, то требуется несколько макроячеек. Для уменьшения числа макроячеек PLA в схеме блоку PLAer можно использовать известные методы [11].

При выполнении условия (10) каждая функция из систем (12)–(14) реализуется на одном элементе LUT. Такое решение является оптимальным. При этом таблица блоку LUTer рассматривается как таблица истинности функций (13)–(15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод расширения формата микрокоманд за счет введения поля с кодом класса псевдоэквивалентных ОЛЦ ориентирован на уменьшение числа макроячеек PLA в схеме формирования адреса микрокоманд. При этом число тактов интерпретации алгоритма управления совпадает с соответствующим значением для базовой структуры КМУУ U_1 с разделением кодов.

Уменьшение числа термов в ДНФ функций возбуждения памяти может привести к уменьшению числа уровней в комбинационной части КМУУ. Это в свою очередь приводит к повышению быстродействия цифровой системы в целом. Рассмотренные нами примеры показали, что число макроячеек PLA в зависимости от их параметров уменьшается на значение до 30 % по сравнению с КМУУ U_1 . Напомним, что применение этого метода целесообразно только для линейных ГСА при выполнении условия (5).

Научная новизна предложенного метода состоит в использовании классов псевдоэквивалентных ОЛЦ для уменьшения числа макроячеек PLA в схеме адресации микрокоманд. Практическая значимость метода заключается в уменьшении числа макроячеек при реализации схемы КМУУ, что позволяет получить схемы, обладающие меньшей стоимостью, чем известные аналоги.

Отметим, что при нарушении условий (18)–(20) использование изложенного подхода невозможно, а структура КМУУ и соответствующий метод синтеза нуждаются в модификации, на что и направлены дальнейшие направления исследований.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Barkalov, A. Logic Synthesis for Compositional Microprogram Control Unit* / A. Barkalov, L. Titarenko. – Berlin : Springer, 2008. – 272 p.
2. Synthesis of compositional microprogram control unit with dedicated area of inputs / Alexander Barkalov, Larysa Titarenko, Jacek Bieganski, A.N. Miroshkin // W: Design of digital systems and devices / eds M. Adamski, A. Barkalov, M. Wegrzyn. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. (Lecture Notes in Electrical Engineering; 79). – P. 193–214.
3. *Баркалов, А. А.* Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах / А. А. Баркалов. – Донецк, ДНТУ, 2002. – 262 с.
4. *Соловьев, В. В.* Проектирование цифровых схем на основе программируемых логических интегральных схем / Соловьев В. В. – М. : Горячая линия-ТЕЛЕКОМ, 2001. – 636 с.
5. *Kabiani, A. The Hybrid Field Programmable Architecture* / A. Kabiani, S. Brown // IEEE Design & Test of Computers. – 1999. – V. 16, No. 4. – P. 74–83.
6. *Singh, S. K.* Design flow of reconfigurable embedded system architecture using LUTs/PLAs / S. K. Singh, R. K. Singh // 2nd IEEE International Conference on Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC). – 6–8 Dec. – 2012. – P. 385–390.
7. Altera Corporation APEX20K PLD Family Data Sheet (2004) [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.altera.com/literature/ds/apex.pdf
8. *Баркалов, А. А.* Синтез композиционных микропрограммных устройств управления / А. А. Баркалов, Л. А. Титаренко. – Харьков : Коллегиум, 2007. – 302 с.
9. *Баркалов, А. А.* Расширение формата микрокоманд в микропрограммном устройстве управления с разделением кодов / А. А. Баркалов, Л. А. Титаренко, А. Н. Мирошкин // Радиоэлектроника и информатика. – № 2 (41), апрель-июнь. – 2008. – С. 40–45.
10. *Баркалов, А. А.* Расширение формата микрокоманд в композиционном микропрограммном устройстве управления с элементаризацией операторных линейных цепей / А. А. Баркалов, А. А. Красичков, А. Н. Мирошкин // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2010. – № 7. – С. 301–305.
11. *Баранов, С. И.* Цифровые устройства на проектируемых БИС с матричной структурой / С. И. Баранов, В. А. Скляров. – М. : Радио и связь, 1986. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 03.02.2014.

Мірошкін О. М.

Канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна

РОЗШИРЕННЯ ФОРМАТУ МІКРОКОМАНД ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИСТРОЮ КЕРУВАННЯ НА ГІБРИДНИХ FPGA

У статті пропонується метод синтезу композиційного мікропрограмного пристрою керування в базисі гібридних FPGA. Пропонується використання кодів класів псевдоеквівалентних операторних лінійних ланцюгів для зменшення апаратних витрат в схемі та зниження загальної вартості реалізації пристрою керування. Наведений приклад використання запропонованого метода синтезу. Показано, що економія апаратних витрат досягає 30 % при збереженні часових характеристик пристрою.

Ключові слова: композиційний мікропрограмний пристрій керування, розширення формату мікрокоманд, LUT елемент, гібридні FPGA, зниження апаратних витрат, псевдоеквівалентні ОЛЦ.

Miroshkin A. N.

Ph.D. in computer engineering, assistant professor at Computer Engineering Department, Donetsk National Technical University, Ukraine

EXTENSION OF MICROINSTRUCTION FORMAT FOR CONTROL UNIT IMPLEMENTATION ON HYBRID FPGA

A synthesis method of compositional microprogram control unit on hybrid FPGA (that contain table elements, and programmable logic arrays) is proposed. The main purpose of the method is hardware amount reduction in the control unit circuit. Usage of classes codes of pseudo-equivalent operational linear chains for hardware amount reducing in the circuit and overall cost reducing of the control device is proposed. An example of the proposed synthesis method application is given. It is shown that depending on the basis circuit

parameters and characteristics of the control algorithm hardware resource saving can reach 30 % in comparison to the costs of basic circuit control device implementation. Time characteristics of control units of modified and base structured are equivalent.

Keywords: compositional microprogram control unit, microinstruction format extension, LUT element, hybrid FPGA, reduction of hardware amount, pseudoequivalent OLC.

REFERENCES

1. Barkalov A., Titarenko L. *Logic Synthesis for Compositional Microprogram Control Unit*. Berlin, Springer, 2008, 272 p.
2. Synthesis of compositional microprogram control unit with dedicated area of inputs / Alexander Barkalov, Larysa Titarenko, Jacek Bieganski, A.N. Miroshkin, W: *Design of digital systems and devices* / eds M. Adamski, A. Barkalov, M. Wegrzyn. Berlin, Springer-Verlag, 2011. (Lecture Notes in Electrical Engineering; 79), pp. 193–214.
3. Barkalov A. A. Sintez ustrojstv upravleniya na programmuemyx logicheskix ustrojstvax. Doneck, DNTU, 2002, 262 p.
4. Solov'ev V.V. *Proektirovanie cifrovix sxem na osnove programmuemyx logicheskix integral'nyx sxem*. Moscow, Goryachaya liniya-TELEKOM, 2001, 636 p.
5. Kabiani A., Brown S. The Hybrid Field Programmable Architecture, *IEEE Design & Test of Computers*, 1999, V.16, No. 4, pp. 74–83.
6. Singh S. K., Singh R. K. Design flow of reconfigurable embedded system architecture using LUTs/PLAs. 2nd IEEE International Conference on Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC), 6–8 Dec. 2012, pp. 385–390.
7. Altera Corporation APEX20K PLD Family Data Sheet (2004) [e'lektronnyj resurs], Rezhim dostupa: www.altera.com/literature/ds/apex.pdf
8. Barkalov A. A., Titarenko L. A. Sintez kompozicionnyx mikroprogrammnyx ustrojstv upravleniya. Xar'kov, Kollegium, 2007, 302 p.
9. Barkalov A. A., Titarenko L. A., Miroshkin A. N., Barkalov A. A. Rasshirenie formata mikrokomand v mikroprogrammnom ustrojstve upravleniya s razdeleniem kodov, *Radioelektronika i informatika*, No. 2 (41), aprel'iyun', 2008, pp. 40–45.
10. Barkalov A. A., Krasichkov A. A., Miroshkin A. N. Rasshirenie formata mikrokomand v kompozicionnom mikroprogrammnom ustrojstve upravleniya s e'lementarizaciej operatornyx linejnyx cepej, *Radioelektron. i komp'yut. sistemi*, 2010, No. 7, pp. 301–305.
11. Baranov S. I., Sklyarov V. A. Cifrovyje ustrojstva na proektiruemyx BIS s matrichnoj strukturoj. Moscow, Radio i svyaz', 1986, 272 p.

ТЕОРИЯ І МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

THEORY AND METHODS OF AUTOMATIC CONTROL

УДК 681.5: 622.451

Чередникова О. Ю.¹, Лапко В. В.²¹Канд. техн. наук, доцент, ДонНТУ, Украина²Канд. техн. наук, доцент, профессор, ДонНТУ, Украина, E-mail: lapko@cs.dgtu.donetsk.ua

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ СО ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИЕЙ

Рассмотрен синтез оптимального по быстродействию управления объектом со знакопеременной характеристикой – выемочным участком угольных шахт. В управлении предложено использовать специально вычисляемую промежуточную однополярную переменную, т.е. координату, не имеющую знакопеременной характеристики. Апробация разработанного управления выполнена методами математического моделирования. Показано, что предложенный закон управления обеспечивает устойчивое управление и существенное ускорение отработки заданного режима работы объекта.

Ключевые слова: фазовая плоскость, оптимальное управление, знакопеременная характеристика объекта, блок наблюдения, выемочный участок, режим проветривания.

ВВЕДЕНИЕ

Ряд процессов в вентиляционной системе рудников и угольных шахт относятся к классу объектов со знакопеременной характеристикой [1], обусловленной наличием правых нулей в операторе объекта. В промышленных процессах с правыми нулями управляющий параметр распространяется на выход объекта по двум каналам с различными знаками и в зависимости от доли положительной и отрицательной части управляющего параметра максимальный выброс выходного сигнала при изменении управляющего параметра происходит либо в положительную, либо в отрицательную область. Это свойство и значительная инерционность рассматриваемых объектов ухудшает регулируемость процессов и предъявляет достаточно высокие требования ко времени регулирования.

Целью исследования является синтез оптимального по быстродействию управления объектом со значительной инерционностью и знакопеременной характеристикой.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве процесса со знакопеременной характеристикой рассмотрена аэрогазодинамика вентиляционной системы добычного участка угольных шахт при отработке заданного режима проветривания участка (рис. 1, 2).

Газовоздушная смесь на добычном участке (рис. 1) распространяется по двум параллельным каналам. Большая часть газовоздушного потока движется по откаточному штреку, лаве и вентиляционному штреку, обогащаясь метаном в лаве. Меньшая доля воздуха – так называемые утечки воздуха – омывает большие пористые пустоты, образованные добытым углем, обогащаясь метаном отбитого угля и разгруженных верхних угольных пластов – так называемых спутников разрабатываемого пласта. При этом в силу малости утечек через пустоты, образованные добытым углем, концентрация метана в них доходит до 100 %, что обуславливает большое влияние дебита утечек воздуха через эту зону на выходную концентрацию метана. Большие объемы пористой среды, омываемой утечками, проявляются в значитель-

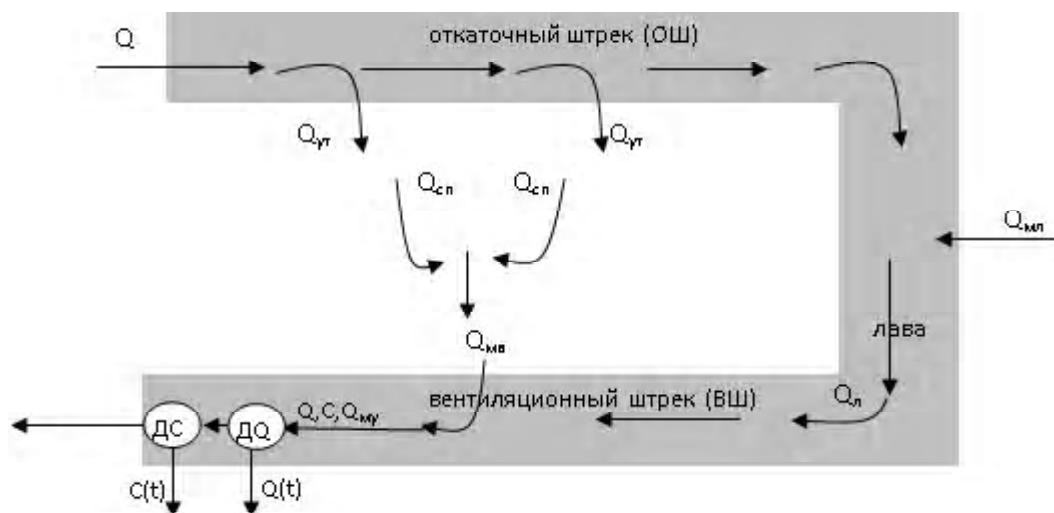


Рис. 1. Обобщенная схема движения газозвушной смеси в выработках и выработанном пространстве выемочного участка: Q – дебит воздуха на участке; C – концентрация метана в исходящей струе участка; $Q_{сп}$ – дебит метана из спутника; $Q_{мв}$ – общий дебит метана из выработанного пространства; $Q_{му}$ – общий дебит метана в исходящей струе участка; $Q_{мл}$ – дебит метана из лавы; $Q_{ут}$ – утечки воздуха в выработанное пространство; ДС, ДQ – датчики соответственно концентрации метана и расхода воздуха

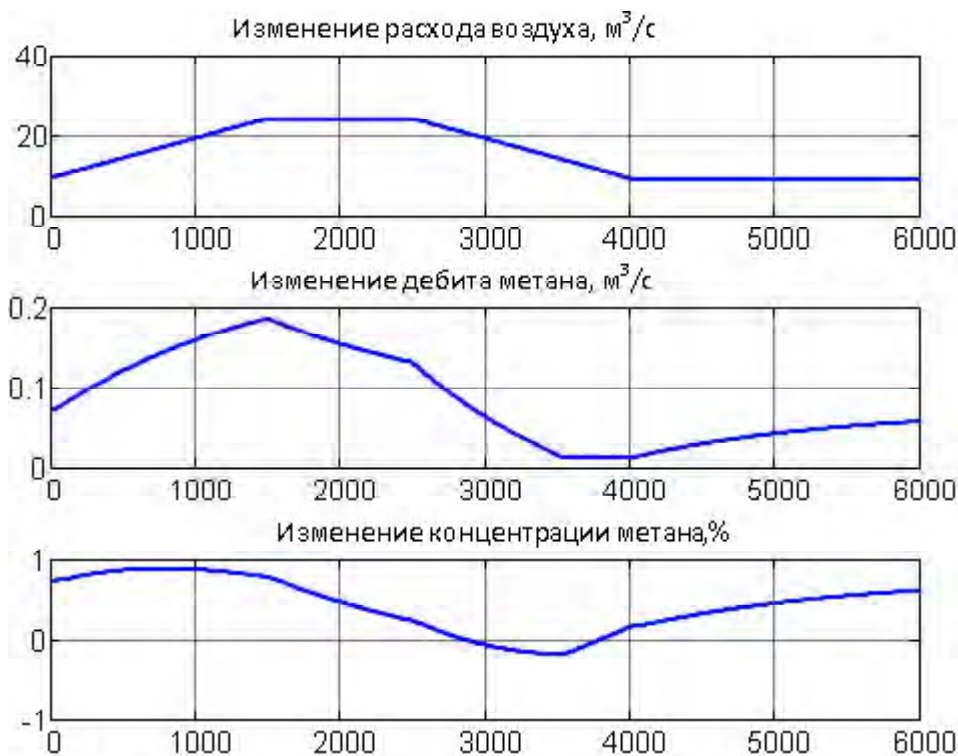


Рис. 2. Графики переходных аэрогазодинамических процессов на участке при изменении режима проветривания

ной длительности переходных процессов по концентрации метана в утечках воздуха, а, следовательно, и в изменении содержания метана в воздушном потоке на выходе участка. Пример графиков переходного процесса при изменении режима проветривания на участке шахты «Мушкетовская-Вертикальная» показан на рис. 2. При положительном приращении управляющего параметра на участке – расхода воздуха – на выходе участка в первый момент происходит положительный выброс концен-

трации метана относительно исходного уровня. Снижение доли метана в выходном потоке воздуха происходит только по прошествии достаточно продолжительного времени, связанного со временем установления нового значения средней концентрации метана в пустотах. В силу этого время установления стационарной зависимости между воздухом и содержанием метана может достигать нескольких часов [2]. В реальных производственных условиях по правилам безопасности регули-

рование проветривания участка выполняется только периодически при отсутствии на участке производственных процессов по добыче угля. С учетом значительной инерционности процессов в объекте наиболее эффективным средством решения задачи установления требуемого режима проветривания является реализация оптимальной системы управления по газу, позволяющей автоматически обеспечивать отработку расчетного режима вентиляции рабочего пространства участка за минимально возможное время. В силу этого, в качестве цели в данной статье рассматривается разработка оптимального по быстродействию управления проветриванием в условиях знакопеременной характеристики объекта управления – выемочного участка.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА КАК ОБЪЕКТА СО ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

В первом приближении оператор выемочного участка определяется совокупностью следующих уравнений массопереноса.

Общий дебит метана на участке определяется выделением газа из выработанного пространства и лавы выработанием

$$Q_{MY} = Q_{MB} + Q_{ML} \tag{1}$$

Для относительных безразмерных приращений уравнение (1) принимает вид

$$q(t) = \theta_L q_L(t) + \theta_B q_B(t), \tag{2}$$

где $q = (Q_{MY} - Q_{OMY}) / Q_{OMY}$, $q_B = (Q_{MB} - Q_{OMB}) / Q_{OMB}$, $q_L = (Q_{ML} - Q_{OML}) / Q_{OML}$ – соответственное приращение дебита метана соответственно на участке, из выработанного пространства и из лавы; $\theta_L = Q_{OML} / Q_{OMY}$; $\theta_B = Q_{OMB} / Q_{OMY}$; Q_{OMY} , Q_{OML} , Q_{OMB} – дебит метана в установившемся режиме соответственно на участке, из выработанного пространства и из лавы.

С учетом средней концентрации метана по всему объему утечек воздуха масса метана, выносимого утечками воздуха, описывается зависимостью [3]

$$\frac{dq_B}{dt} + \frac{1}{T_B} q_B = m \frac{dG}{dt}, \tag{3}$$

где m – коэффициент турбулентности выработанного пространства; T_B – время однократного обмена воздуха в выработанном пространстве.

При использовании И-регулятора для изменения управляемого параметра участка изменение расхода описывается зависимостью

$$dG/dt = U, \tag{4}$$

где U – управление.

Не ограничивая общности рассмотрения, построим оптимальную по быстродействию систему управления по газу при нулевом возмущении из лавы ($q_L = 0$). В силу этого, согласно (2), (3) движение объекта будет описываться уравнением

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{T_B} q = m \theta_B U. \tag{5}$$

Проведем оптимизацию процессов перехода от исходного режима проветривания (G_n, q_n) в желаемое состояние ($G_{ж}, q_{ж}$) за минимальное время при ограничении уровня управляющего воздействия U – скорости изменения расхода воздуха на участке. Физически максимальное значение управления U определяется конструкцией шибера, перекрывающего сечение выработки, и может регулироваться в типовых регуляторах сечения выработок в области $[-5 \cdot 10^{-3}; 5 \cdot 10^{-3}] \text{ c}^{-1}$. На оптимальных траекториях движения объекта будем принимать $U = \pm U_m$.

Линию переключения оптимального управления определим методом «попятного» движения системы (4, 5), начиная с некоторого желаемого конечного состояния $(0, G_{ж})$ [4] по уравнению

$$T_B \frac{dq}{d\tau} - q = -m \cdot U \cdot \theta_m \cdot T_B; \tag{6}$$

$$dG/d\tau = -U, \tag{7}$$

где $\tau = t_{ж} - t$; $t_{ж}$ – время оптимального процесса; τ – «обратное» время.

По решению системы (6), (7) при $U = \pm U_m$ получим

$$q_{\text{лп}}(G) = \theta_B \cdot m \cdot T_B \cdot U_m \cdot (\exp(\text{sign}(\lambda)\lambda / (T_B U) - 1)), \tag{8}$$

где $\lambda = G - G_{ж}$.

Оптимальные по быстродействию процессы по газу на участке обеспечиваются при формировании управления по закону [4]

$$\varphi = q - q_{\text{лп}}; \tag{9}$$

$$U = \begin{cases} U_m \cdot \text{sign}(\varphi), & \text{при } \varphi \neq 0; \\ U_m \cdot \text{sign}(G_{ж} - G), & \text{при } \varphi = 0. \end{cases} \tag{10}$$

В законе оптимального управления по газу (8–10) использован неизмеряемый объем газа q на выходе объекта. Реальными данными измерительной системы являются расход воздуха Q и концентрация метана C , по которым искомую координату можно вычислить исходя из этих значений средней концентрации метана и расхода воздуха на выходе вентиляционного штрека участка, описываемой уравнением массопереноса [5]

$$V_{\text{вш}} \frac{dC}{dt} + QC = Q_{MY}, \tag{11}$$

где $V_{\text{вш}}$ – объем выработки с интенсивным перемешиванием газа, выносимого утечками воздуха, и основного потока воздуха.

В первом приближении выражение (11) может быть представлено уравнением

$$T_{\text{вш}} \frac{dk}{dt} + k = q - G,$$

где $T_{\text{вш}} = V_{\text{вш}} / Q_0$ – время однократного обмена воздуха во всем объеме перемешивания метановоздушной массы; $k = (C - C_0) / C_0$ – относительное изменение концентрации метана на участке; C_0 – номинальное содержание газа в выходном потоке.

Отсюда следует, что расчет управляемой координаты оптимальной системы (8–10) можно производить по формуле

$$q = T_{\text{вш}} dk/dt + k + G. \quad (12)$$

В выражении (12) производная dk/dt является ненаблюдаемой величиной, поэтому для оценки реального значения производной dk/dt используем в блоке наблюдателя (рис. 3) уравнение

$$T_{\text{ф}} dx/dt + x = k(t), \quad (13)$$

где $T_{\text{ф}}$ – постоянная времени фильтра.

При этом для исключения существенного влияния инерционности фильтра на динамику системы управления примем постоянную времени фильтра значительно меньшей постоянной времени по газу $T_{\text{в}}$ ($T_{\text{в}} \approx 2000$ с). Тогда достаточно строго можно считать, что $dx/dt \approx dk/dt$.

В силу этого, в законе управления оценка объема регулируемого газа \bar{q} в блоке наблюдения системы (рис. 3) определим из равенства

$$\bar{q} = T_{\text{вш}} \frac{dx}{dt} + k + G.$$

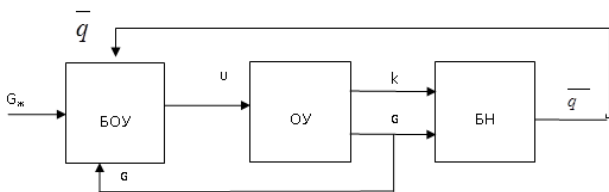


Рис. 3. Функциональная схема системы оптимального управления проветриванием выемочного участка, где БОУ – блок оптимального управления; ОУ – объект управления; БН – блок наблюдателя

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАДАННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБЪЕКТА

Апробация алгоритма управления осуществлялась для выемочного участка, физические параметры которого характерны для метанообильных шахт Донбасса [3]. При этом постоянная времени фильтра в модельном эксперименте принималась равной $T_{\text{ф}} = 10$ с (рис. 4). Графики переходных процессов отображают временные зависимости процессов управления (рис. 4, а) и фазовые траектории процесса управления в системе фазовых координат $(q-G)$ и $(k-G)$ (рис. 4, б). Начальное поло-

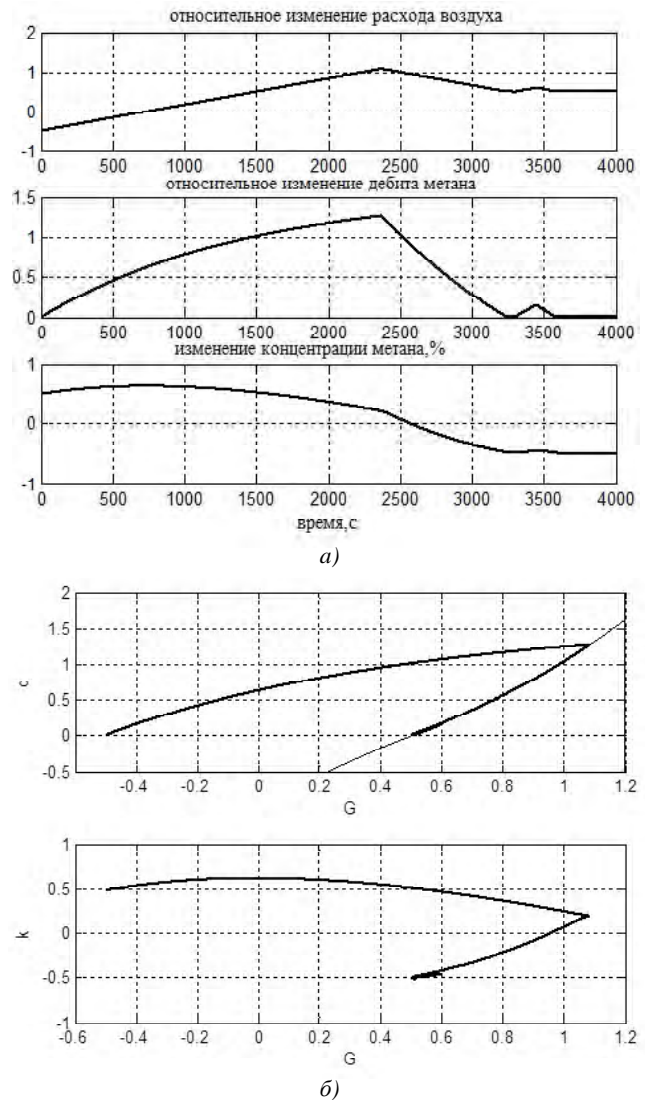


Рис. 4. Процессы управления при установлении желаемого расхода воздуха $G_{\text{ж}}=0,5$

жение изображающей точки в фазовой плоскости $(q-G)$ $(0, -0,5)$ представляет собой некоторый исходный стационарный режим проветривания на участке, соответствующем точке $(0,5, -0,5)$ в плоскости $(k-G)$. В момент времени $(t=50$ с) по заданию диспетчера вентиляционной службы включается автоматический режим отработки заданного дебита воздуха на участке $G_{\text{ж}}=0,5$. По завершении переходного процесса на участке устанавливается заданный расход воздуха и новые значения относительной концентрации метана при нулевом значении общего относительного дебита метана. При пуске системы управления изображающая точка находится выше линии переключения, поэтому под воздействием положительного управляющего воздействия движется до линии переключения, и при ее достижении знак управляющего воздействия инвертируется. После этого изображающая точка движется вдоль линии переключения и достигает конечного состояния $(0, 0,5)$ в плоскости $(q-G)$ и соответственно состояния $(-0,5, 0,5)$ в плоскости $(k-G)$. При этом процесс установления заданного режима яв-

ляється слабо коливальним, однак коливальні процеси проходять швидко по порівнянню з процесами в об'єкті, т.е. коливання практично не впливають на динаміку системи.

ВИВОДИ

1. Проведені аналітичні та експериментальні дослідження дозволяють рекомендувати для розглянутих об'єктів з знакоперемінною характеристикою при синтезі системи управління принцип оптимального по швидкодії управління з використанням в законі виробки управляючого впливу проміжної перемінної об'єкта, вирахованої по вихідним координатам об'єкта, і не маючої знакоперемінної характеристики.

2. На прикладі системи періодичного диспетчерського регулювання рудничної атмосфери вугільних шахт показана робоспособність запропонованої системи і достатньо висока її ефективність по швидкодії по порівнянню з інерційністю об'єкта.

Череднікова О. Ю.¹, Лапко В. В.²

¹Канд. техн. наук, доцент, ДонНТУ, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, ДонНТУ, Україна

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ ЗІ ЗНАКОЗМІННОЮ ПЕРЕХІДНОЮ ФУНКЦІЄЮ

Розглянуто синтез оптимального за швидкодією керування об'єктом зі знакозмінною характеристикою – виїмковою ділянкою вугільних шахт. В управлінні запропоновано використовувати спеціально обчислювальну проміжну однополярну змінну, тобто координату, яка не має знакозмінної характеристики. Апробація розробленого управління виконана методами математичного моделювання. Показано, що запропонований закон управління забезпечує стійке управління та істотне прискорення відпрацювання заданого режиму роботи об'єкта.

Ключові слова: фазова площина, оптимальне управління, знакозмінна характеристика об'єкта, блок спостереження, виїмкова ділянка, режим провітрювання.

Cherednikova O. YU.¹, Lapko V. V.²

¹Ph. D., Associate Professor, DonNTU, Ukraine

²Ph. D., Associate Professor, DonNTU, Ukraine

SYNTHESIS OF SPEED-OPTIMAL CONTROL FOR THE OBJECT WITH AN ALTERNATING-SIGN TRANSITION FUNCTION

The synthesis of speed-optimal control for object with alternating-sign characteristic – excavation site of coal mines – was considered. The task comes to establishment of the desired mode of object operation with minimal time due to significant inertia process. Alternating-sign characteristic of methane concentration leads to release of methane, which complicates the synthesis of control system and complicates the control law. To improve the performance of control system the original new approach to the synthesis of the control law was proposed. For the control law it is proposed to use unipolar variable clearly identified at the regulated coordinate – methane concentration. Approbation of developed control was done with methods of mathematical modeling. It is shown that the proposed control law provides sustainable management and a significant acceleration of testing of the specified mode at the object. The results will be used in the aero-gas informational complex, implemented by 60 mines of Donbas.

Keywords: phase plane, optimal control, alternating-sign characteristic of the object, surveillance unit, working site, ventilation mode.

REFERENCES

1. Solovnikov V. V. Raschet i proektirovanie analiticheskikh samonastroyayushhikhsya system s e'talonnyimi modelyami. Moskva, Mashinostroenie, 1972, 270 p.
2. Abramov F. A., Fel'dman L. P., Sviatnii V. A. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov rudnichnoj aerologii. Kiev, Naukova dumka, 1981, 284 p.
3. Lapko V. V., Cherednikova O. Yu. Matematicheskaya model' i issledovanie perehodny'ch gazodinamicheskikh processov na vy'emochny'ch uchastkach shacht Donbassa, *Visti Donetskoho girnychoho institutu: Vseukrainskii naukovo-*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловников, В. В. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями / В. В. Соловников. – М. : Машиностроение, 1972. – 270 с.
2. Абрамов, Ф. А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Ф. А. Абрамов, Л. П. Фельдман, В. А. Святный. – К. : Наук. думка, 1981. – 284 с.
3. Лапко, В. В. Математическая модель и исследование переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт Донбасса / В. В. Лапко, О. Ю. Черединова // *Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю*. – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – № 2. – С. 115–120.
4. Черединова, О. Ю. Синтез и исследование алгоритмов оптимального по быстродействию управления // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. – 2013. – №1 (17). – С. 43–47.
5. Фельдман, Л. П. Уравнения неустойчившегося движения метано-воздушной смеси в выработках и выработанном пространстве участка. / Л. П. Фельдман. – В кн. : *Разработка месторождений полезных ископаемых*. – К. : Техника, 1971. – Вып. 22. – С. 95–105.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2014.

Після доробки 28.04.2014.

technichni zhurnal girnuchoho profilu, Donetsk, 2008, No. 2, pp. 115–120.

4. Cherednikova O. Yu. Sintez i issledovanie algoritmov optimal'nogo po bystrodeystviyu upravleniya, *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universitetu, Seria Informatika, kibernetika ta obchyslyvalna tehnika*, No. 1, 2013, pp. 43–47.
5. Fel'dman L. P. Uravneniya neustanovivshegosya dvigeniya metano-vozdushnoi smesi v vy'roboatkakh i vy'robotannom prostranstve uchastka. V knige *Razrabotka mestorozhdenij polezny'kh iskopaemy'kh*. Kiev, Tekhnika, 1971, pp. 95–105.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 681.5.01.23

Орловський І. А.¹, Горобець Є. І.²

¹Д-р техн. наук, професор, Запорізький національний технічний університет, Україна, E-mail: i_orlovsky@mail.ru.

²Магістр, Запорізький національний технічний університет, Україна

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОКОНТРОЛЕРІВ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

Наведено математичний опис та використання у електромеханічних системах трьох нейроконтролерів: з прогнозуючим керуванням, на основі моделі нелінійної авторегресії з ковзаючим середнім та нейроконтролера з еталонною моделлю. Описано наявні в системі MATLAB інструменти дослідження цих нейроконтролерів і з їх використанням синтезовані та досліджені системи керування одно та двомасових електромеханічних систем з електроприводом постійного струму. За результатами моделювання порівняні властивості синтезованих систем.

Ключові слова: нейрокерування, нейроконтролер, нейронна мережа, електромеханічна система, математична модель, математичне моделювання.

ВСТУП

Не зважаючи на велику кількість підходів до проблеми синтезу систем керування (СК) нелінійними об'єктами при випадкових сигналах, універсального та ідеального регулятора поки не існує, при цьому, як відзначається у [1], одним із більш перспективних напрямків є побудова нейромережових СК, які дозволяють у значній мірі зняти математичні проблеми аналітичного синтезу і аналізу проєктованої системи.

У літературі описано багато прикладів практичного використання нейронних мереж (НМ) для вирішення задач керування різноманітними об'єктами. На даний момент розроблено декілька методів нейрокерування: імітуюче, інверсне, з прогнозуванням, багатомодульне, гібридне, допоміжне та інші [2].

В пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи Matlab [3] приведені найбільш теоретично обґрунтовані нейроконтролери (НК): з прогнозуванням (Neural Predictive Control – NPC), з моделлю нелінійної авторегресії зі ковзаючим середнім (Nonlinear Auto Regressive Moving Average – NARMA-L2) та з еталонною моделлю (Model Reference Controller – MRC).

Керування з NPC використовують для різних об'єктів, наприклад: підтримка необхідної концентрації рідини у резервуарі [4], наведення і стабілізація озброєння легкоброньованих машин [5], керування машиноподібним мобільним роботом [6]. У [7] наведено математичний опис прогнозуючого нейрокерування і з використанням інструментів системи MATLAB, синтезовано СК з NPC у контурі струму електропривода. У [8] досліджувалося застосування NPC для коригування вихідного значення ПІ-регулятора швидкості, що дозволило поліпшити перехідні процеси у двомасовій системі електропривода. Проте, у наведених вище статтях відсутнє порівняння результатів використання NPC з результатами інших типів НК у СК електроприводів.

В [9] використовується контролер NARMA-L2 для автоматичного керування судном на змінному курсі. У [1] при вирішенні задачі наведення та стабілізації озброєння легкоброньованої машини нейрорегулятор NARMA-L2 використовується у контурі швидкості. Як відзначають автори, NARMA-L2 працює як релейний регулятор, вихід якого перемикається у протилежні значення обмежень, що приводить до суттєвих коливань швидкості (до 40 % від максимальних).

В [10] наведено можливість в режимі реального часу цифрового керування гіроскопічним перевернутим маятником, який зрівноважується за допомогою маховика з двигуном постійного струму і СК з контролером NARMA_L2. Цифровий ПД-регулятор з адаптацією забезпечує початкову стійкість об'єкта для навчання NARMA контролера. Автори відзначають, що при використанні NARMA контролера закони керування є нелінійними і є можливість on-line адаптації контролера для забезпечення заданої динаміки об'єкта, що змінюється.

У [11] описані контролери NARMA_L3 і NARMA_L4, що розширюють відповідно контролери NARMA_L1 і NARMA_L2 для багатьох входів і виходів. Порівняння продуктивності цих контролерів з результатами, описаними в [12], де закладені основи контролерів NARMA, показало, що при вирішенні тих же завдань отримані кращі результати. При навчанні НМ використовувалися тільки статичні методи. Крім того, за результатами моделювання встановлено, що при близьких продуктивностях для контролера NARMA_L3 кількість нейронів в НМ більше, ніж в моделях контролера NARMA_L4.

У [14] НК з еталонною моделлю умовно поділяють на два класи: прямі та непрямі системи. На вхід будь якої з цих СК поступає зовнішній сигнал завдання, який подається на регулятор та еталонну модель і визначає бажану поведінку об'єкта керування. Структура НК MRC названа як адаптивна непряма нейромережева СК. У такій системі паралельно об'єкту підключена налагоджувана модель, параметри якої безперервно уточнюються у темпі з процесом керування за допомогою алгоритму оцінювання. Ці параметри використовуються регулятором у якості оцінок параметрів об'єкта керування, при такому керуванні впливи визначаються шляхом аналітичної мінімізації прийнятого критерію керування, який є функцією від похибки керування. Синтез оптимального керування пов'язаний з оцінкою якобіана об'єкту $J = \{dy_j/du_i\}$. Фактично процес керування зводиться до відслідкування адаптивною моделлю поведінки еталонної моделі [14].

В Demos Matlab приведений приклад використання MRC для здійснення контролю кута повороту маятника за відповідним законом керування [15]. У [13] описано застосування НМ для автоматичного настроювання ПД-регулятора з використанням задаючої моделі адаптивного керування (Model Reference Adaptive Control – MRAC). Емулятор об'єкту є багатозаровий перцептрон, який застосовується разом з on-line навчанням НМ, яка налаштовує параметри ПД-регулятора. Задачею налаштування є зниження похибки між виходами задаючої моделі і об'єкта. При цьому не використовуються затримані вихідні сигнали контролера. Базову ідею MRAC запропонував Whitaker у 1958 році [13]. У такій схемі крім звичайного зворотного зв'язку є зворотній зв'язок для настроювання параметрів регулятора. Розглянуто приклад регулювання рівня рідини у системі з двома резервуарами. Цей метод обчислює параметри регулятора on-

line. Так як навчальні набори для ПД-регулятора невідомі, навчання ваг НМ методом стандартного зворотного поширення неможливо, тому для навчання НМ регулятора використовуються помилки керування $e()$ між виходом еталонної моделі і виходом об'єкта. У якості задаючої моделі використовується стійка ланка другого порядку з необхідним часом перехідного процесу. Навчається НМ модифікованим градієнтним алгоритмом зворотного поширення, який мінімізує квадрат помилки. Вихід ПД-регулятора у дискретному виді розраховувався за формулою

$$u(n) = u(n-1) + K_P(e(n) - e(n-1)) + K_I u(n) + K_D(e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)), \quad (1)$$

де K_P, K_I, K_D – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових відповідно, $u(n)$ – вихід об'єкта у момент часу nT , T – інтервал вибірки. Для коректування K_P, K_I, K_D (знаходяться $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$). Використана тришарова НМ з активаційною сигмоїдальною функцією в прихованому шарі і лінійною – у вихідному. Кількість нейронів у вхідному N_1 та прихованому N_2 шарах обирається шляхом проб і помилок. Кількість нейронів у вихідному шарі дорівнює числу ПД прибутків. Функція оцінки зводиться до мінімуму навчанням ваг методом зворотного поширення наступними рівняннями:

$$\Delta w_{kj}(n+1) = \eta \delta_k o_j + \alpha \Delta w_{kj}(n) + \beta \Delta w_{kj}(n-1), \quad (2)$$

$$\Delta w_{ji}(n+1) = \eta \delta_j o_i + \alpha \Delta w_{ji}(n) + \beta \Delta w_{ji}(n-1), \quad (3)$$

де $k = 1, 2, 3$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, η – коефіцієнт навчання, α та β терми моменту. Індексами i, j, k позначені вхідний, прихований та вихідний шари.

Таким чином, у доступній науковій літературі показана перспективність використання різних НК для керування різними об'єктами. При цьому при керуванні електромеханічними об'єктами виникає необхідність порівняння результатів використання різних типів НК у контурах струму та швидкості одно- та двомасових систем.

МЕТА РОБОТИ

Математичний опис трьох нейроконтролерів NPC, NARMA-L2, MRC та розробка одно- та двомасових електромеханічних систем (EMC) з цими контролерами у контурах струму та швидкості і порівняння їх властивостей.

ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ РОБОТИ НК

Нейрокерування з прогнозуванням (NPC). Метод навчання НК, при якому мінімізується відхилення для кожного такту k поточного положення $y(k)$ об'єкта керування від завдання $r(k)$ оцінюється виразом

$$IAE = \sum_{k=1}^K (r(k) - y(k))^2. \quad (4)$$

Якість керування погіршується через затримки сигналів мінімум на один такт у СК зі зворотнім зв'язком. Якщо для отримання цільового положення необхідно декілька тактів, тоді при мінімізації поточної похибки НК може видати надмірно сильний керуючий сигнал, який призведе до перерегулювання.

NPC мінімізує функціонал вартості інтегральної похибки, яка прогнозується на $L = \max(L_2, L_3)$, $0 \leq L_1 \leq L_2$ тактів вперед [2, 4] наступним чином:

$$Q(n) = \sum_{i=L_1}^{L_2} (e(k+i))^2 + \rho \sum_{i=0}^{L_u} (\bar{u}(k+i) - \bar{u}(k+i-1))^2, \quad (5)$$

де e – похибка виходу системи, ρ – вклад зміни керуючого сигналу в загальний функціонал вартості. Для прогнозування поведінки системи і обчислення похибок використовується прямий нейроемулятор. Особливість у тому, що відсутній НК, який навчається. Його місце займає оптимізаційний модуль, працюючий в режимі реального часу.

Оптимізаційний модуль отримує на такті k цільову траєкторію на L тактів вперед, а якщо її немає, то L раз дублює значення поточної уставки $r(k+1)$ і використовує це у якості цільової траєкторії. Далі, для вибору оптимального керуючого впливу, обчислення відбуваються у внутрішньому циклі системи нейрокерування (його ітерації зазначені як j). За час одного такту керування оптимізаційний модуль подає на вхід нейроемулятора серію різноманітних впливів $\bar{u}(k+t, j)$, де t – глибина передбачення, $0 \leq t \leq L-1$, отримує варіанти поведінки системи $\bar{y}(k+t, j)$, визначає найкращу стратегію керування

$$ST = \{\bar{u}(k, j_1); \bar{u}(k+1, j_2); \dots; \bar{u}(k+L, j_L)\},$$

яка мінімізує функціонал (5). На об'єкт подається керуючий сигнал $u(k) = \bar{u}(k, j_1)$, а далі на наступному такті стратегія ST перераховується знову.

Недоліком систем з передбаченням є неможливість їх застосування у системах з великою частотою дискретизації, бо оптимізаційний алгоритм працює в режимі реального часу і за час одного такту не буде встигати знаходити найкращу стратегію дії.

Нейрокерування зі зворотною лінеаризацією (NARMA-L2). NARMA-модель в загальному вигляді може бути представлена у формі

$$y(k+d) = N[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)], \quad (6)$$

де $y(k)$ – вихід моделі, d – число тактів передбачення, $u(k)$ – вхід моделі (сигнал керування). Нейрорегулятор, таким чином, повинен забезпечувати сигнал керування виду

$$u(k) = G[y(k), y(k+1), \dots, y(k-n+1), y_r(k+d), u(k-1), \dots, u(k-m+1)], \quad (7)$$

де $y_r(k+d)$ – задана координата.

Такий регулятор може бути реалізований за допомогою НМ, але в процесі мінімізації середньоквадратичної похибки він потребує багато обчислень, бо використовує динамічний варіант методу зворотнього поширення похибки. Для практичного рішення задачі керування використовують наближену NARMA-модель з виділеною складовою керування. Така модель, що отримала назву NARMA-L2 (рис. 1), має вигляд

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] + g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]u(k) \quad (8)$$

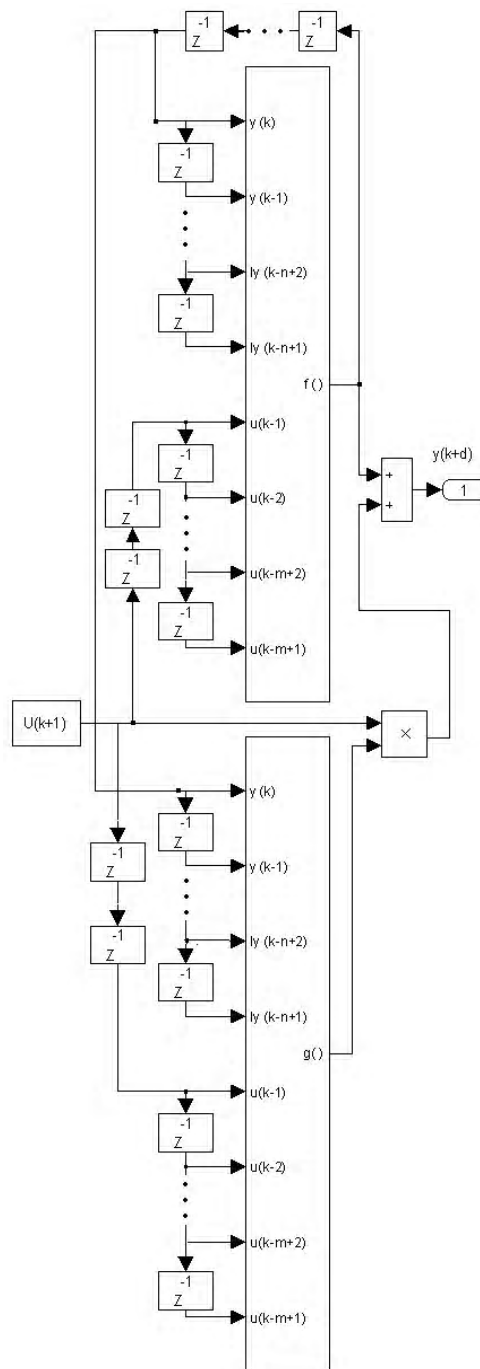


Рис. 1. Модель динамічного об'єкту у контролері NARMA_L2

Перевага формули (8) у тому, що поточний сигнал керування можна безпосередньо обчислювати, якщо відома бажана траєкторія y_r , попередня історія керування $\{u(k-1), \dots, u(k-m+1)\}$, а також попереднє поточне значення виходу $\{y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1)\}$ за формулою

$$u(k) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]} \quad (9)$$

Безпосереднє використання цього відношення для реалізації регулятора викликає труднощі, бо керування $u(k)$ залежить від поточного значення виходу $y(k)$. Тому формула (9) перетворюється наступним чином:

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]} \quad (10)$$

але при цьому параметр передбачення повинен задовольняти умові $d \geq 2$.

Якщо врахувати, що при побудові моделі нелінійного об'єкта функції $f(\cdot)$ та $g(\cdot)$ реалізуються у вигляді тришарової НМ прямого поширення, то при наступному розрахунку керуючого сигналу $u(k+1)$ необхідно точно знати значення вагових коефіцієнтів НМ при цим сигналі (бажано що б ці коефіцієнти безпосередньо були пов'язані з фізичними процесами у об'єкті). До того ж необхідно відзначити, що завдання точної ідентифікації об'єкта, який має кілька нелінійностей, в загальному випадку не вирішена.

Ідея побудови контролера NARMA_L2 бере свій початок від моделі нелінійної авторегресії з зовнішніми входами (Nonlinear Autoregressive with Exogenous inputs Model – NARX) (рис. 2) [16]. У моделі об'єкта контролера NARMA_L1 (рис. 3) вхідні сигнали $u(k-i+1)$ не знаходяться під загальною функцією, як у NARX. При цьому кількість вагових коефіцієнтів у блоках, де є сигнал $u(k+1)$, знижується з $(n+m)q$ – у моделі NARX до $(n+1)q$ – у моделі NARMA_L1, що знижує залежність значення вагового коефіцієнта при $u(k+1)$ від значень інших вагових коефіцієнтів.

У контролері NARMA_L2 для підвищення точності керування, хоча математичну модель представляють спрощено (менш точно), сигнал керування $u(k+1)$ не бере участі у формуванні функцій апроксимації нелінійностей (рис.1), і тому прогнозує керування може бути розраховане за формулою (10).

Нейрокерування з еталонною моделлю (MRC). MRC (рис. 4) – варіант нейрокерування за методом зворотного поширення похибки через прямий нейроемулятор, з додатково впровадженою в схему еталонною моделлю. Це робиться з метою підвищення стійкості перехідного процесу: у разі, коли перехід об'єкта в цільове положення за один такт неможливий, траєкторія руху і час перехідного проце-

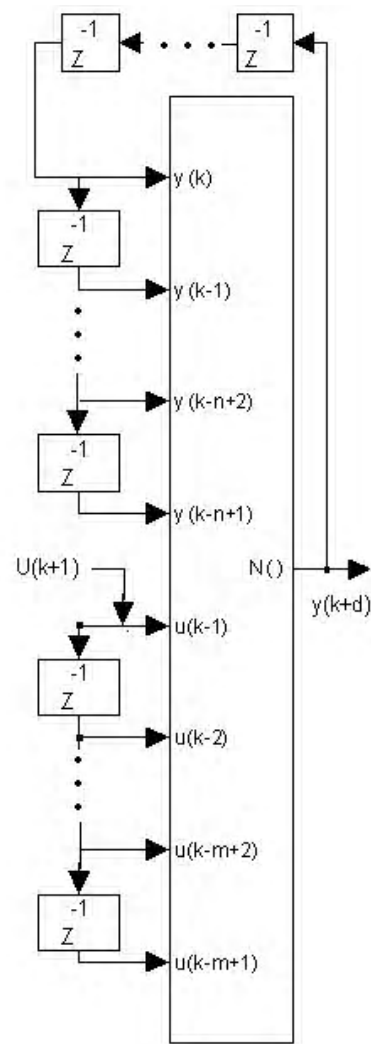


Рис. 2. Модель динамічного об'єкта у вигляді NARX

су становляться погано прогнозованими величинами і можуть призвести до небажаних режимів роботи системи.

Для зменшення цієї невизначеності між уставкою і НК вводиться еталонна модель, яка є, як правило, лінійна динамічна система невисокого порядку з бажаним стійким перехідним процесом. У ході навчання, так і керування, еталонна модель отримує на вхід завдання r і генерує опорну траєкторію r' , яка далі надходить на НК у якості нової уставки, яку потрібно виконати. Еталонна модель підбирається таким чином, що б опорна траєкторія, яка генерується нею на кожному такті, була досяжна для об'єкта керування.

Навіть у ДЕМО прикладі системи MATLAB після налаштування контролера MRC є значна статична помилка близько 30%. Навчання регулятора займає значний час [15] часто не забезпечує бажані результати через застосуваного динамічного варіанту навчання методом зворотного поширення похибки.

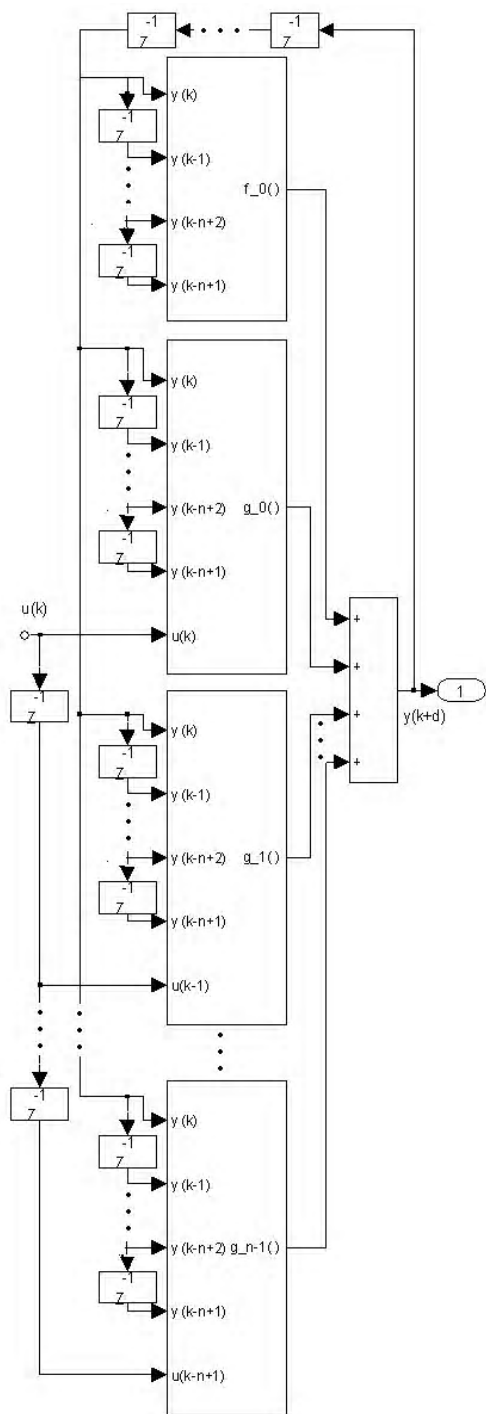


Рис. 3. Модель динамічного об'єкту у контролері NARMA_L1

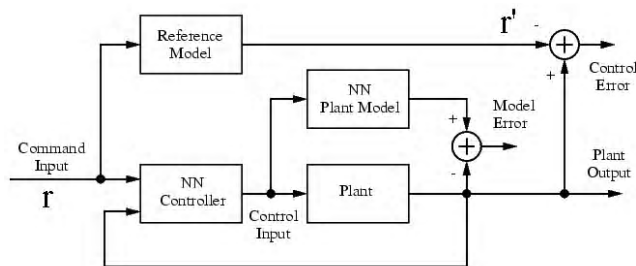


Рис. 4. Схема НК MRC

Таким чином, про властивості НК з їх математичного опису можна зробити наступні висновки.

Системи з NPC дозволяють отримати якісні перехідні процеси, працюють у режимі реального часу, але потребують отримання найкращої стратегії дії за час одного такту, що унеможливує їх застосування у системах з великою частотою дискретизації. До того ж такі системи потребують знаходження з великою точністю вагових коефіцієнтів НМ, через які підключається прогнозуючий сигнал керування.

У контролері NARMA_L2 досягається значно більша швидкодія, тому що математичну модель представляють спрощено, так що б сигнал керування на наступному кроці не брав участі у формуванні функції апроксимації нелінійностей, при цьому точність керування досягається достатньо високою.

Система керування з MRC значно простіша, але застосування динамічного варіанту навчання регулятора у вигляді НМ методом зворотного поширення похибки займає значний час та часто не забезпечує бажані результати.

РЕАЛІЗАЦІЯ НК У СИСТЕМІ MATLAB

Реалізація NPC. У системі MATLAB у пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox запропоновано для використання та дослідження NPC (рис 5, а). Створено графічний інтерфейс, який керує діями користувача для налагодження НК [3, 15]. Існують можливості встановлення параметрів L_1, L_2, L_u та ρ (5), завдання порогу зменшення показника якості для алгоритму навчання (пошуку прогнозуючого сигналу керування), числа ітерацій на один такт дискретності, вибір процедури одномірного пошуку.

При отриманні моделі об'єкту у вигляді НМ задаються розмір прихованого шару, такт дискретності вимірювання даних, кількість елементів затримки для вхідних сигналів, довжина навчальної вибірки, максимальне і мінімальне значення вхідного і вихідного сигналів, максимальний і мінімальний інтервали ідентифікації, завдання навчальної функції і кількості циклів навчання, використання контрольного та тестового підмножин. Є можливість імпорту та експорту навчальних даних

Реалізація NARMA-L2 (рис. 5, б, рис. 6). При отриманні математичної моделі у контролері NARMA-L2 існують такі ж самі можливості, як і у контролері NPC.

Реалізація MRC (рис. 5, в). У системі MATLAB створено два графічних інтерфейси, які керують діями користувача для налагодження НК MRC.

Перший налаштовує регулятор НК. В ньому крім можливості завдання таких же параметрів, як у контролері NPC, задається кількість елементів затримки для вхідних сигналів об'єкта та регулятора НК.

Другий графічний інтерфейс ідентифікує об'єкт керування. В ньому практично задаються такі ж параметри, як і при отриманні моделі у контролері NPC.

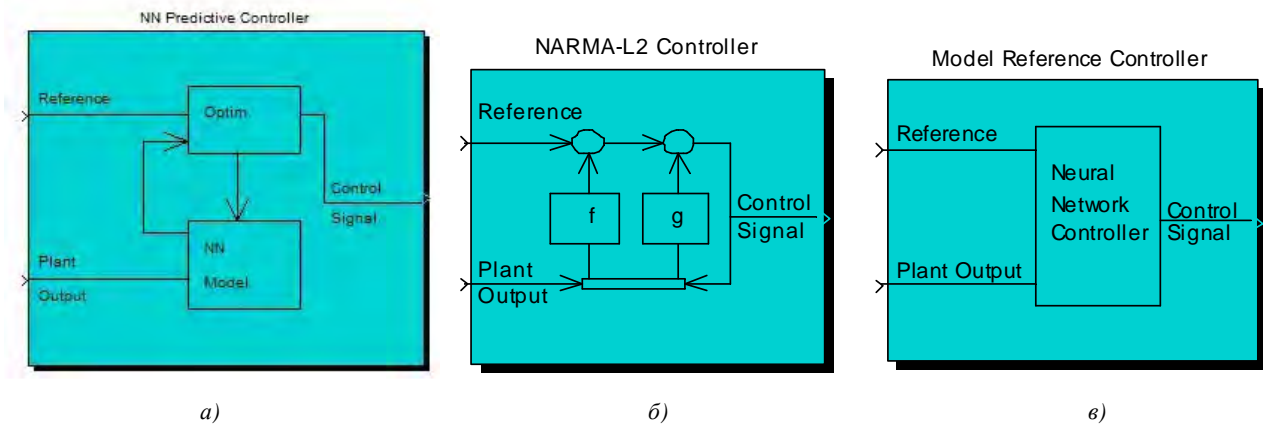


Рис. 5. Вигляд блоків НК; а – NPC, б – NARMA-L2, в – MRC

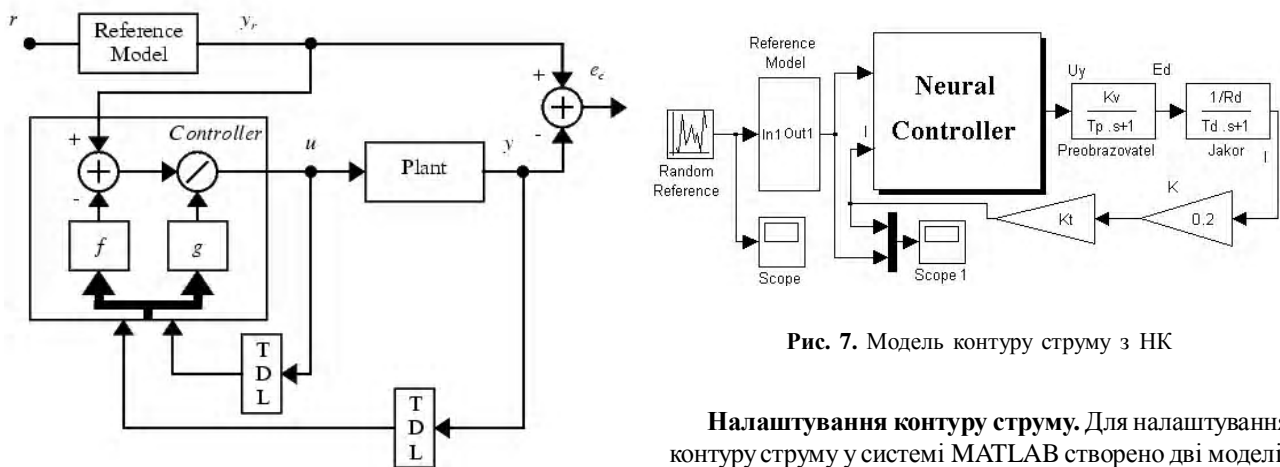


Рис. 6. Схема НК NARMA-L2

ПРИКЛАД РОЗРОБКИ ОДНО- ТА ДВОМАСОВИХ ЕМС З РІЗНИМИ ТИПАМИ НК В КОНТУРАХ СТРУМУ ТА ШВИДКОСТІ

Перед налаштуванням СК проведено аналіз керованості об'єкта. Об'єкт розглядався, як лінійний. Для цього складені матриці керованості контурів струму та швидкості для одно та двомасових ЕМС, знайдено їх ранг [16]. При цьому ранг матриць був повний (дорівнював розмірності простору стану), з цього зроблено висновок про керованість систем, що розглядаються.

Використання різних типів НК досліджено на моделі електропривода постійного струму з підпорядкованою СК. Структурні схеми електропривода у системі MATLAB наведено на наступних рисунках: рис. 7 – контур струму; рис. 8 – контур швидкості одномасової ЕМС; рис. 9 – контур швидкості двомасової системи. При математичному моделюванні задавалися наступні значення параметрів контурів електропривода $K_V=178$; $T_P=0,0025$ с; $R_d=0,0091$ Ом; $T_d=0,037$ с; $K_t=0,00047$ В/А; $T_s=0,002$ с; $T_l=0,092$ с; $CF=13,51$ В·с; $J_d=4400$ кг·м²; коефіцієнт жорсткості – $c=4117400$ Нм/град; люфт – $\delta=0,05$ рад.

Рис. 7. Модель контуру струму з НК

Налаштування контуру струму. Для налаштування контуру струму у системі MATLAB створено дві моделі. Одна для формування даних (рис. 10), де блок Zadaucha model (рис. 11) реалізує модель контуру струму з ПІ-регулятором та номінальними незмінними параметрами. На виході цієї моделі формується бажаний перехідний процес. Друга модель – для демонстрації роботи налагодженого контуру струму з НК.

При формуванні даних контуру струму для навчання його моделі у вигляді НМ випадкові сигнали з блоку Random Reference потрапляють спочатку в задаючу модель, тому входними сигналами контуру струму є бажані сигнали (вихідні сигнали блоку Zadaucha model), які необхідно отримати на його виході і входні та вихідні сигнали (In1, Out) об'єкта (експериментальна модель), що зберігається у робочому просторі системи MATLAB (блоки To Workspace). Час моделювання – 10 с, при цьому отримано 5000 значень навчальних наборів. У реальних умовах параметри об'єкта змінюються, тому при дослідженні моделі об'єкта зменшено коефіцієнт передачі контуру струму у 5 разів.

Навчання НК (рис. 7) відбувалося у такій послідовності:

1) Сформовано (рис. 10) навчальні дані, введено їх у НК за допомогою функції імпорту даних (Import Data) та прийнято їх (Accept Data).

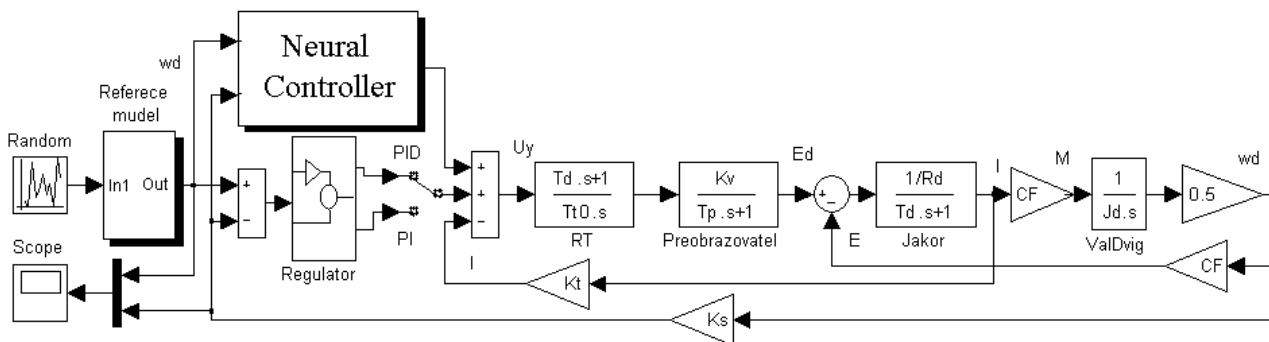


Рис. 8. Модель контуру швидкості з НК

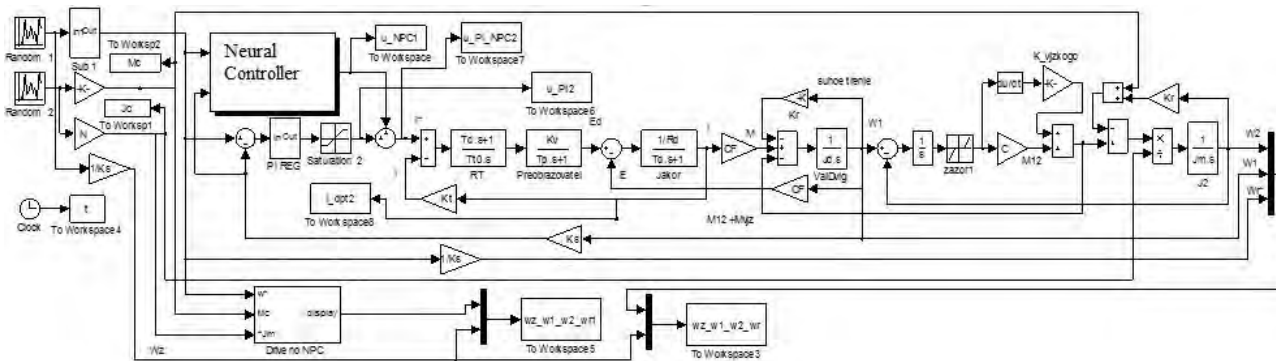


Рис. 9. Модель контуру швидкості двомасової системи з НК

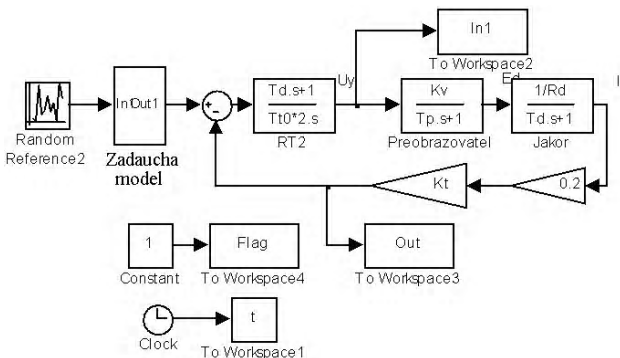


Рис. 10. Схема формування даних контуру струму

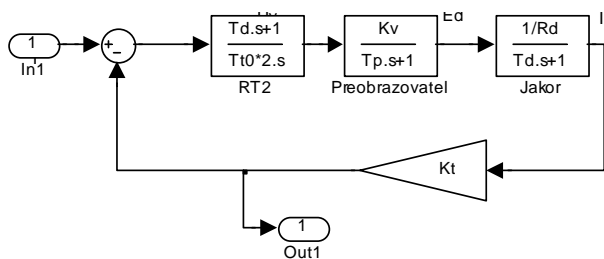


Рис. 11. Схема задаючої моделі (блок Zadaucha model) формування бажаного перехідного процесу

2) Задано параметри налаштування НК:
 – NPC та NARMA-L2 – по одному шару прихованих нейронів, по дві затримки вхідних і вихідних сигналів;
 – MRC – ідентифікатор: 1 шар прихованих нейронів, по дві затримки вхідних і вихідних сигналів регулятора, регулятор – 1 шар прихованих нейронів, по дві затримки для вхідних сигналів еталонної моделі, вихідних сигналів об'єкта та НК.

3) Виконано навчання НК з використанням поточних, контрольних і тестових даних:
 – NPC – на протязі 1000 епох, середньо квадратична похибка навчання складала $1 \cdot 10^{-3}$.
 – NARMA-L2 – на протязі 1000 епох, середньо квадратична похибка складала $1,1 \cdot 10^{-3}$.
 – MRC – ідентифікатор – на протязі 300 епох, середньо квадратична похибка навчання складала $1,7 \cdot 10^{-3}$, для НК – на протязі 100 епох по 10 сегментів.

На рис. 12–рис. 14 наведені графіки перехідних процесів ЕМС з різними НК, де *a* – результати при використанні НК NPC; *b* – NARMA-L2; *c* – MRC.

Як видно з (рис. 12), отримано перехідні процеси, у яких перерегулювання складає 0,01 %, запізнення 0,004 с., що дорівнює подвоєному значенню часу дискретизації сигналів при зберіганні даних. Значення струму в експериментальній моделі I_2 з MRC відрізняється від еталонної I_1 на 4 А (40 %), що є великою різницею. Подібні результати отримані і у ДЕМО прикладі системи MATLAB.

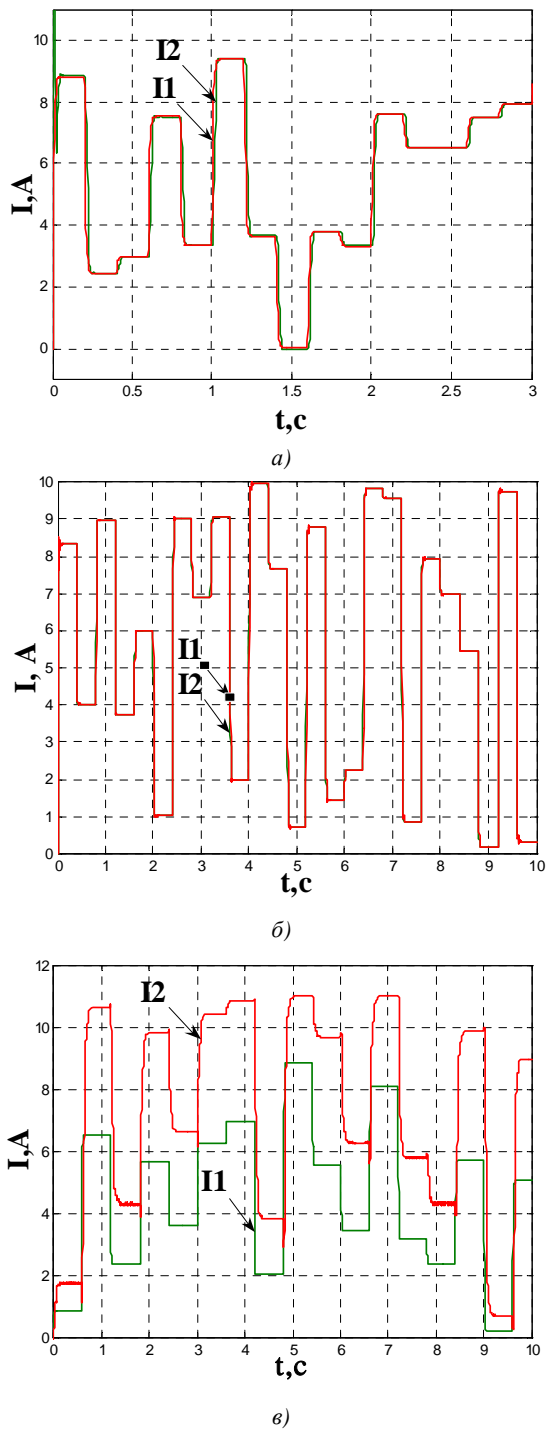


Рис. 12. Перехідний процес у контурі струму еталонної та експериментальної моделей

Налаштування контуру швидкості. НК у контурі швидкості підмакався паралельно розрахованому на номінальні данні ПІ-регулятору. Формування даних контуру швидкості виконувалося аналогічно контуру струму. Час перехідного процесу формування навчальних даних склав 200 с, отримано 100000 значень навчальних наборів. Для того, щоб реальні умови в моделі формування даних й експериментальній моделі відрізнялись від умов задаючої моделі було вдвічі зменшено момент інерції.

Навчання НК швидкості виконувалося за такою схемою:

1) Сформовані навчальні дані введено у НК за допомогою функції імпорту даних.

2) Задано параметри налаштування НК:

– NPC – 7 шарів прихованих нейронів, по три затримки вхідних і вихідних сигналів;

– NARMA-L2 – 2 шару прихованих нейронів, по однієї затримці вхідних і вихідних сигналів;

– MRC – 1 шар прихованих нейронів, по дві затримки для вхідних сигналів еталонної моделі, вихідних сигналів об'єкта та НК.

3) Навчання НК з використанням поточних, контрольних і тестових даних:

– NPC – на протязі 1000 епох, середньо квадратична похибка навчання – $1 \cdot 10^{-3}$.

– NARMA-L2 – на протязі 1000 епох, середньо квадратична похибка навчання – 0,01.

– MRC – ідентифікатор: на протязі 3000 епох, НК: 100 епох по 10 сегментів, похибка складала – 15–20 %.

Як видно з перехідних процесів швидкості у одномасовій системі (рис. 13) при використанні НК MPC та NARMA-L2 практично відсутня статична похибка, при цьому динамічна похибка з НК NPC значно більша. НК MRC забезпечує не значну динамічну похибку, але статична похибка значна.

Налаштування контуру швидкості двомасової системи (рис. 9). Час перехідного процесу формування навчальних даних склав 400 с, отримано 200000 значень навчальних наборів. Навчання НК виконувалося за такою схемою:

1) Сформовані навчальні дані введено у НК за допомогою функції імпорту даних.

2) Задано параметри налаштування:

– NPC – 8 шарів прихованих нейронів, по три затримки вхідних і вихідних сигналів;

– NARMA-L2 – 2 шари прихованих нейронів, по однієї затримці вхідних і вихідних сигналів;

– MRC – 1 шар прихованих нейронів, по дві затримки для вхідних сигналів еталонної моделі, вихідних сигналів об'єкта та НК.

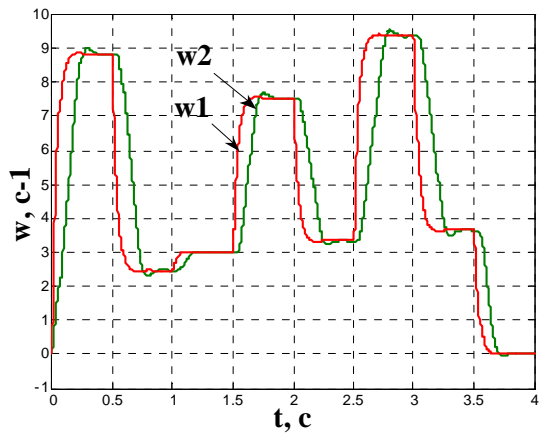
3) Виконано навчання НК з використанням поточних, контрольних і тестових даних:

– NPC – на протязі 1000 епох, середньо квадратична похибка навчання складала $1 \cdot 10^{-3}$.

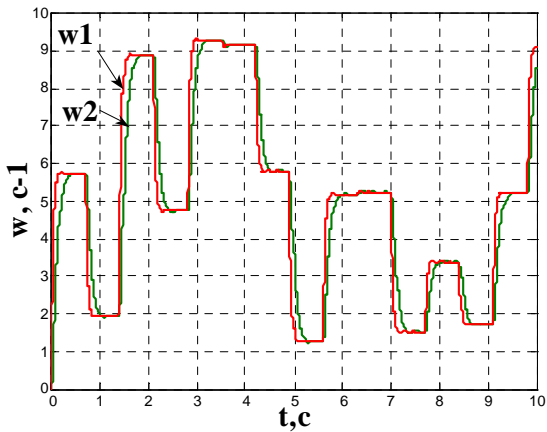
– NARMA-L2 – на протязі 1000 епох, середньо квадратична похибка навчання – 0,01.

– MRC – ідентифікатор – на протязі 300 епох, НК: 50 епох по 10 сегментів, середньо квадратична похибка навчання – 0,01.

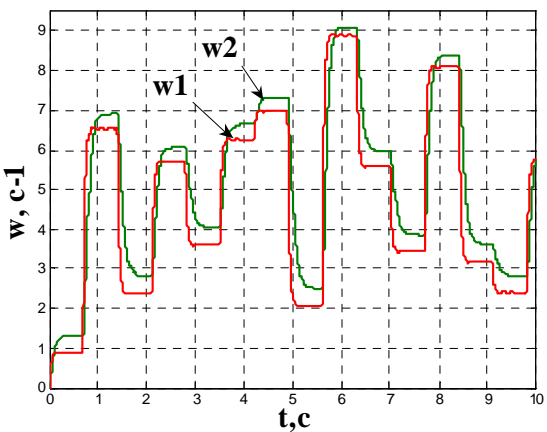
Перехідні процеси та похибки в контурі швидкості двомасової системи з різними видами НК наведені на рис. 14 та рис. 15. Перехідний процес коливальний. Статичні похибки з контролерами NPC та MRC більші ніж з контролером NARMA-L2, при цьому динамічні похибки приблизно однакові (рис. 15).



a)



б)

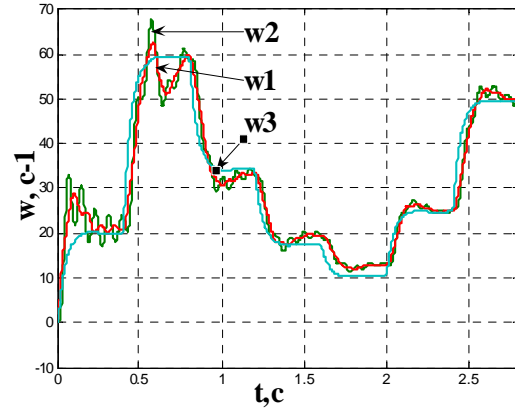


в)

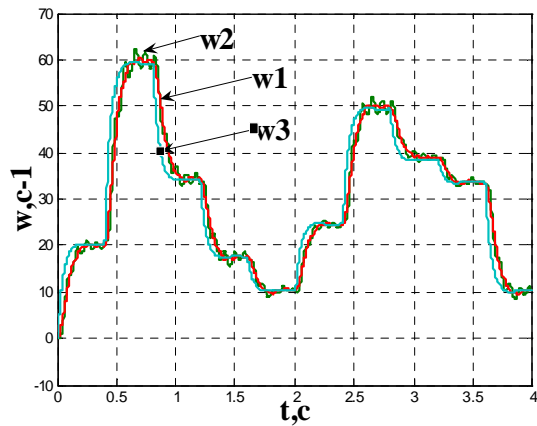
Рис. 13. Перехідні процеси у контурі швидкості одномасової системи

Динамічні ΔI , $\Delta \omega$ та статичні δI , $\delta \omega$ характеристики отримані в результаті моделювання контуру струму та контуру швидкості одно та двомасового електромеханічного об'єкту з використанням НК зведені у порівняльну табл. 1.

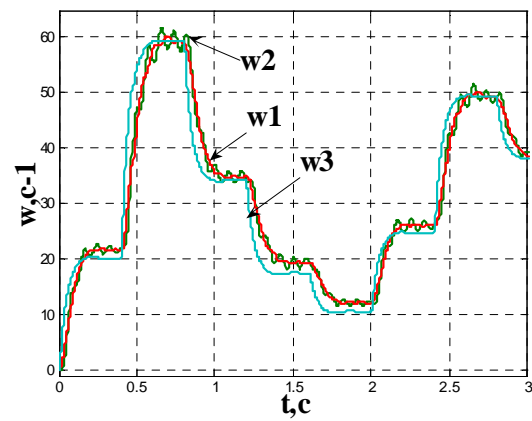
Аналіз властивостей НК, відповідно табл. 1 показує наступне. У НК NPC та NARMA_L2 статична похибка у



a)



б)



в)

Рис. 14. Перехідний процес в контурі швидкості

контурі струму та швидкості, як у одно та двомасових системах практично дорівнюють нулю. Статична похибка у контролері NARMA_L2 значна до 42 % у контурі струму та 5 % у контурі швидкості одномасової EMC. Динамічна похибка для усіх контролерів у контурі струму значно менша ніж у контурі швидкості.

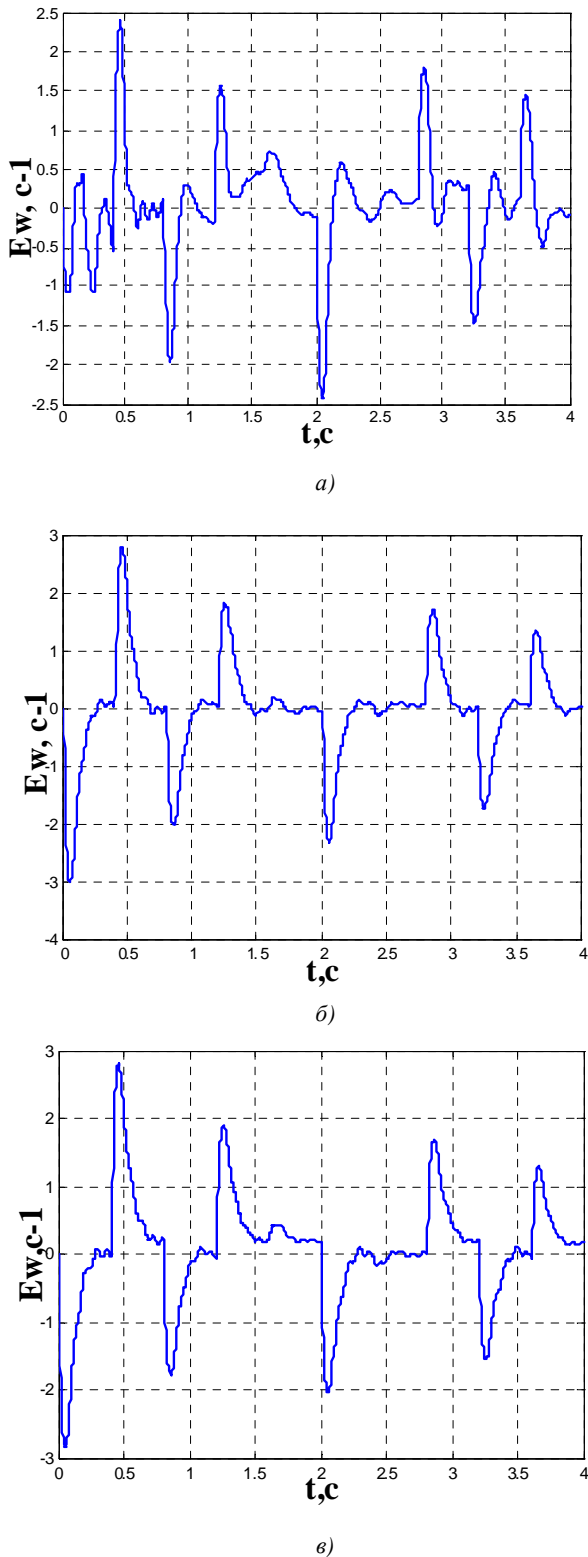


Рис. 15. Похибка контуру швидкості двомасової системи з різними видами НК:
а) – NPC, б) – NARMA-L2, в) – MRC

Таблиця 1. Динамічні та статичні характеристики ЕМС з НК

Вид НК	Контур струму			
	Статична похибка		Динамічна похибка	
	$\Delta I, A$	$\Delta I, \%$	$\delta I, A$	$\delta I, \%$
NPC	0	0	0,2	2
NARMA-L2	0	0	0,1	1
MRC	4,2	42	0,8	8
Вид НК и ЕМС	Контур швидкості			
	Статична похибка		Динамічна похибка	
	$\Delta \omega, c^{-1}$	$\Delta \omega, \%$	$\delta \omega, c^{-1}$	$\delta \omega, \%$
NPC, одно двомасова	0	0	4,5	45
NARMA-L2 одно двомасова	0,15	1,5	2,5	25
MRC одно двомасова	0	0	2	20
	0,1	1	2,8	28
	0,5	5	2	20
	0,25	2,5	2,8	28

ВИСНОВКИ

1. Дослідження методом математичного моделювання використання різних типів НК на конкретних прикладах одно та двомасових ЕМС показало можливість отримання високої точності керування не усіма НК. Так найбільш висока точність досягалася з НК NARMA_L2 та NPC. До того ж НК NARMA-L2 мав найменший час налаштування. Контролер MRC потребував забагато часу навчання (десятки хвилини) при цьому якість перехідного процесу була невисока.

2. Наведений математичний опис НК дозволяє не строго пояснити властивості досліджених СК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов, Б. И. Синтез нейросетевого регулятора NARMA-L2 controller для системы наведения и стабилизации / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 4. – С. 41–46.
2. Чернодуб, А. Н. Обзор методов нейруправления / А. Н. Чернодуб, Д. А. Дзюба // Проблемы программирования. – 2011. – № 2. – С. 79–94.
3. Медведев, В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-МИФИ. – 2002. – 496 с
4. Soloway, D. Neural Generalized Predictive Control / D. Soloway, P. J. Haley // Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control. – 15–18 September 1996. – P. 277–281.
5. Кузнецов, Б. И. Синтез нейроконтроллера с предсказанием для двухмассовой электромеханической системы / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // Электротехника и электромеханика. – 2008. – Т. 3. – С. 27–32.
6. Gu, D. Neural Predictive Control for a Car-like Mobile Robot / D. Gu and H. Hu // International Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2002. – Vol. 39, No. 2. – P. 73–86.

7. Орловский, И. А. Использование нейроконтроллера с прогнозированием для управления электромеханическим объектом / И. А. Орловский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електромеханіка і енергетика». – Донецьк :ДонНТУ, 2013. – № 1. – С. 200–205.
8. Орловский, И. А. Использование нейроконтроллера с прогнозированием для управления двухмассовым электромеханическим объектом / И. А. Орловский, Е. И. Горобец // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Збірник наукових праць. Серія: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Х. : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 36 (1009) – С. 483–484.
9. Подпорин, С. А. Нейронный управляющий контроллер в задаче автоматического управления судном на меняющемся курсе / С. А. Подпорин // Судовождение : Сб. научных трудов. – ОНМА, Одесса. – 2010. – Вып. 19. – С. 157–166.
10. Chetouane F. and Darenfed S. Neural Network NARMA Control of a Gyroscopic Inverted Pendulum (Advance online publication: 20 August 2008) Engineering Letters, 16:3, EL_16_3_01.
11. Adaptive Control of Nonlinear Multivariable Systems Using Neural Networks and Approximate Models / T. A. Al-Zohary, A. M. Wahdan, M.A.R. Ghonaimy, A. A. Elshamy http://faculty.ksu.edu.sa/73586/Documents/paper_4.pdf, 18 p.
12. Narendra, K. S. Adaptive control of nonlinear multivariable systems using neural networks / K. S. Narendra, S. Mukhopahyay // Neural Networks. – 1994. – vol. 7, No. 5. – P. 737–752.
13. Pirabakaran, K. PID autotuning using neural networks and Model Reference Adaptive Control / K. Pirabakaran, V. M. Becerra // 15th Triennial World Congress. IFAC. Barcelona. Spain. – 2002. – 6 p.
14. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков : ТЕЛТЕХ, 2004. – 372 с.
15. Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + SIMULINK 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. Серия «Библиотека профессионала»: – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.
16. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / С. Хайкин. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

Стаття надійшла до редакції 13.01.2014.

Орловский И. А.¹, Горобец Е. И.²

¹Д-р техн. наук, профессор, Запорожский национальный технический университет, Украина

²Магистр, Запорожский национальный технический университет, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОКОНТРОЛЛЕРОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Приведено математическое описание и использование в электромеханических системах трех нейроконтроллеров: с прогнозируемым управлением, на основе модели нелинейной авторегрессии со скользящим средним и нейроконтроллера с эталонной моделью. Описаны имеющиеся в системе MATLAB инструменты исследования этих нейроконтроллеров и с их использованием синтезированы и исследованы системы управления одно и двухмассовых электромеханических систем с электроприводом постоянного тока. По результатам моделирования выполнено сравнение свойства синтезированных систем

Ключевые слова: нейруправление, нейроконтроллер, нейронная сеть, электромеханическая система, математическая модель, математическое моделирование.

Orlovskiy I. A.¹, Gorobec E. I.²

¹Doctor of Science, Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

²Master of Science, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

USE OF NEURAL CONTROLLER IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

The paper deals with the relevance of improved synthesis methods for control systems of nonlinear objects using neural networks, as those allowing to substantially remove the mathematical problems of analytical synthesis and the designed system analysis. Besides, the review of the articles and mathematical description of three neural controllers (NC) are presented: predictive control based on the model of nonlinear autoregressive moving average and NC with the reference model. NC research tools of MATLAB are described. Current control and speed control loops for one-component and two-component electromechanical systems with DC electric drive are conducted. Mathematical modeling showed the possibility of high precision control of NC based on model of nonlinear autoregressive with moving average predictor and predictive control. NC with reference model needed too much training time, the quality of the transition process was low.

Keywords: neural control, neural controller, neural network, electromechanical systems, mathematical model, mathematical modeling.

REFERENCES

1. Kuznecov B. I., Vasilec T. E., Varfolomeev A. A. Sintez nejrosetevogo reguljatora NARMA-L2 controller dlja sistemy navedenija i stabilizacii, *Elektrotehnika i Elektromehanika*, 2011, No. 4, pp. 41–46.
2. Chernodub A. N., Dzjuba D.A. Obzor metodov nejroupravljenija, *Problemy programirovanija*, 2011, No 2, pp. 79–94.
3. Medvedev V. S., Potjomkin V. G. Nejronnye seti. MATLAB 6. Moscow, Dialog-MIFI, 2002, 496 p.
4. Soloway D., Haley P. J. Neural Generalized Predictive Control, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 15–18 September, 1996, pp. 277–281.
5. Kuznecov B. I., Vasilec T. E., Varfolomeev A. A. Sintez nejrokontrollera s predskazaniem dlja dvuhmassovoj jelektromehaničkoj sistemy, *Jelektrotehnika i jelektromehanika*, 2008, vol. 3, pp. 27–32.
6. Gu D. and Hu H. Neural Predictive Control for a Car-like Mobile Robot, *International Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 2002, Vol. 39, No. 2, pp. 73–86.
7. Orlovskij I. A. Ispol'zovanie nejrokontrollera s prognozirovaniem dlja upravlenija jelektromehaničkoj ob#ektom, *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo*

- tehnichnogo universitetu. Serija «Elektromehanika i energetika», Donec'k, DonNTU, 2013, No. 1, pp. 200–205.*
8. Orlovskij I. A., Gorobec E. I. Ispol'zovanie nejrokontrollera s prognozirovaniem dlja upravlenija dvuhmassovym jelektromehaničeskim objektom, *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teorija i praktika», Kharkiv, NTU «HPI», 2013, No. 36 (1009), pp. 483–484.*
 9. Podporin S. A. Nejronnyj upravljajushhij kontroler v zadache avtomatičeskogo upravlenija sudnom na menjajushhemsja kurse, *Sudovozhdenie, Sb. nauchnyh trudov. ONMA, Odessa, 2010, Vyp. 19, pp. 157–166.*
 10. Chetouane F. and Darenfed S. Neural Network NARMA Control of a Gyroscopic Inverted Pendulum (Advance online publication: 20 August 2008) *Engineering Letters*, 16:3, EL_16_3_01.
 11. Al-Zohary T. A., Wahdan A. M., Ghonaimy M.A.R., Elshamy A. A. Adaptive Control of Nonlinear Multivariable Systems Using Neural Networks and Approximate Models / http://faculty.ksu.edu.sa/73586/Documents/paper_4.pdf, 18 p.
 12. Narendra K. S., Mukhopahyay S., Adaptive control of nonlinear multivariable systems using neural networks, *Neural Networks*, 1994, vol. 7, no. 5, pp. 737–752.
 13. Pirabakaran K., Becerra V. M. PID autotuning using neural networks and Model Reference Adaptive Control, 15th Triennial World Congress. IFAC. Barcelona. Spain, 2002, 6 p.
 14. Bodjanskij E. V., Rudenko O. G. *Iskusstvennye nejronnye seti: arhitektury, obuchenie, primenenija.* Har'kov, TELETEH, 2004, 372 p.
 15. D'jakonov V. P., Kruglov V. V. *MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + SIMULINK 5/6. Instrumenty iskusstvennogo intelekta i bioinformatiki / V.P. D'jakonov, Serija «Biblioteka professionala», Moscow, SOLON-PRESS, 2006, 456 p.*
 16. Hajkin S. *Nejronnye seti: polnyj kurs, 2-e izdanie.* Moscow, Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2006, 1104 p.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (PIU) призначений для публікації найбільш значимих наукових і практичних результатів досліджень учених вищих навчальних закладів і наукових організацій.

Журнал включений у перелік наукових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття вчених ступенів доктора і кандидата технічних наук і фізико-математичних наук (радіофізика).

Статті, що опубліковано в журналі, реферуються в реферативних журналах і базах даних ВІНІТІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Журнал міститься у міжнародній базі наукових видань Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>). Інтернет-сторінка журналу:

<http://journal.zntu.edu.ua/ric/index.php?page=index>.

Журнал видається двічі на рік і розповсюджується за Кагалогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

Для розгляду питання про публікацію статті до редакції журналу необхідно вислати поштою або представити особисто наступне:

1) рукопис (роздруковку) статті, підписаний на останній сторінці всіма авторами, в двох примірниках;

2) відомості про авторів (українською, російською, англійською мовами);

3) оригінал експертного висновку про можливість відкритого опублікування статті;

4) супровідний лист-клопотання з організації, де була виконана робота (або лист автора);

5) рецензію від фахівця в даній галузі з вченим ступенем доктора наук. Підпис рецензента обов'язково мусить бути завірнений.

6) диск з наступними файлами:

- електронна версія статті, повністю ідентична роздруковці;
- відомості про авторів;
- рисунки у графічному форматі .tif.

Файли з матеріалами статті можна надіслати електронною поштою або передати особисто на оптичному диску або USB-накопичувачі.

Вимоги до оформлення статті. Приймаються статті, набрані в редакторі Microsoft Word.

Параметри сторінки:

- розмір паперу – А4 (210x297);
- орієнтація – книжкова;
- шрифт – Times New Roman, розмір – 12 pt;
- міжрядковий інтервал – полуторний;
- верхнє поле – 20 мм, нижнє – 20 мм, лівє – 25 мм, правє – 15 мм.

Сторінки рукопису повинні бути пронумеровані. Не допускаються розбіжності рукопису з електронною версією статті. Текст рукопису не повинен мати рукописних виправлень та позначок.

Послідовність розміщення матеріалу статті:

- 1) індекс УДК;
- 2) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова мовою статті;
- 3) текст статті;
- 4) список літератури;
- 5) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова російською мовою (якщо мова статті – українська) або українською (якщо мова статті – російська);
- 6) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова англійською мовою;
- 7) транслітерований список літератури.

Анотації повинні бути інформативними, змістовними (відбивати основний зміст статті та результати досліджень) та структурованими (відбивати логіку опису результатів у статті). **Рекомендований обсяг україномовної та російськомовної анотації приблизно 50 слів, англійськомовної – 100–150 слів (вимоги науково-метричної бази SCOPUS).**

Ключові слова наводяться в називному відмінку у кількості до десяти слів.

Текст статті. Приймаються статті російською, українською та англійською мовами. Розмір статті до 0,5 авторського аркуша. У статті слід уникати зайвої деталізації, проміжних формул і висновків; не слід наводити відомі факти, повторювати зміст таблиць і ілюстрацій у тексті. Стаття не повинна мати граматичних або інших помилок, а також повинна відповідати тематиці журналу й вимогам щодо фахових видань.

Структура тексту статті мусить містити такі необхідні елементи: постановка проблеми в загальному виді і її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато розв'язання даної проблеми, і на які опирається автор; виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, висновки по даному дослідженню й перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Матеріал публікації мусить бути розбитий на підрозділи не більше двох рівнів.

Рисунки розміщуються в тексті й додатково додаються в окремих файлах (формат .tif з роздільною здатністю 150–300 dpi, чорно-білі або у градаціях сірого). Розмір рисунків не повинен перевищувати ширини сторінки (17 см) або ширини колонки (8 см). Написи на рисунках бажано виконувати шрифтом Times New Roman, розмір 10. Рисунки нумерують і підписують унизу.

Формули виконуються за допомогою вбудованого в Word редактора Microsoft Equation. Формули нумерують у круглих дужках праворуч. Формули великого розміру записуються в кілька рядків.

Нумерація рисунків, формул і таблиць наскрізна однорівнева.

Список літератури наприкінці статті подається мовою оригіналу і складається в порядку згадування посилань у тексті й відповідно до діючого стандарту на бібліографічний опис. Посилання на літературу в тексті нумеруються послідовно й позначаються цифрою у квадратних дужках.

Транслітерований список літератури, відповідно до вимог науково-метричної бази SCOPUS, є повним аналогом списку літератури і виконується на основі транслітерації мови оригіналу латиницею.

Посилання на англійськомовні джерела не транслітеруються. Транслітерація української мови латиницею виконується на основі Постанови КМУ №55 від 27 січня 2010 р., російської – на основі ГОСТ 7.79-2000 (ISO 9-95). Приклади транслітерації розміщені на сайті журналу.

У відомостях про авторів необхідно навести:

- 1) прізвище, ім'я, по батькові (повністю);
- 2) учений ступінь;
- 3) посаду;
- 4) місце роботи;
- 5) електронну адресу;
- 6) робочий, домашній, мобільний телефони.

Статті, які не відповідають зазначеним вимогам, не приймаються до розгляду.

Всі статті проходять закриті рецензування і в разі потреби можуть бути повернуті автору на доробку. Редакція залишає за собою право на літературну редакцію тексту статті без повідомлення автору.

Рукописи й диски не вертаються, коректура та відбитки статей авторам не надсилаються.

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, редакція журналу «PIU».

Тел. (061) 7-698-2-96 – редакційно-видавничий відділ.

Тел./факс: (061) 7-644-6-62 – головний редактор.

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 1/2014

Науковий журнал

Головний редактор – д-р фіз.-мат. наук Погосов В. В.

Заст. головного редактора – канд. техн. наук Дубровін В. І.

Комп'ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

Зуб С. В.
Субботін С. О.

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 10.06.2014. Формат 60×84/8.
Папір офс.Різогр. друк Ум. друк. арк. 22,09.
Тираж 300 прим. Зам. № 653.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.