

Рис. 2. Схема алгоритма поиска оптимального плана эксперимента на основе симплекс-метода

Был проведен сравнительный анализ разработанного программного обеспечения с известной программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента. Объектом сравнения являлся процесс оптимизации многоуровневых планов многофакторного эксперимента для количества факторов $k=3$ с количеством уровней факторов от 2 до 8. Сравнительный анализ производился по следующим функциональным параметрам оптимизации: полученное оптимальное или близкое к оптимальному значение стоимости реализации плана эксперимента, количество рассмотренных вариантов перестановок, время счета программы, выигрыш по стоимости реализации плана эксперимента, определяемый как отношение стоимостей реализации исходного и полученного планов эксперимента. Результат проведенного сравнительного анализа представлен в табл. 1.

Для известной программы поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента при оптимизации многоуровневых планов с количеством уровней факторов от 3 до 8 были введены ограничения на количество рассмотренных вариантов перестановок в связи с большими временными затратами на проведение процесса поиска.

На основании представленных данных, видно, что разработанное программное обеспечение позволяет получить значительный выигрыш по стоимостным и временным характеристикам при оптимизации многоуровневых планов многофакторного эксперимента.

Динамика изменения количества рассматриваемых вариантов перестановок при увеличении количества уровней факторов для анализируемых программ представлена на рис. 3.

Таблица 1. Сравнительный анализ разработанной и известной программ

Кол-во уровней факторов	Стоимость реализации исходной матрицы, усл.ед.	Программа поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента				Разработанное программное обеспечение			
		оптимальная стоимость, усл.ед.	количество рассмотренных вариантов, шт.	время счета, сек.	выигрыш по стоимости реализации	оптимальная стоимость, усл.ед.	количество рассмотренных вариантов, шт.	время счета, сек.	выигрыш по стоимости реализации
2	18	9	40320	1	2,0000	9	8	< 0,01	2,0000
3	126	106	1000000	69	1,1887	39	27	< 0,01	3,2307
4	235	220	500000	1825	1,0682	69	64	< 0,01	3,4058
5	529	517	500000	5572	1,0232	148	125	0,25	3,5743
6	682	671	500000	6470	1,0164	242	216	0,12	2,8182
7	2074	2053	500000	6538	1,0102	411	343	0,87	5,0462
8	2124	2109	500000	6673	1,0071	594	512	1,33	3,5758



Рис. 3. Зависимость количества рассматриваемых вариантов от количества уровней факторов

Из рис. 3 видно, что для известной программы поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента характерно резкое возрастание количества рассматриваемых вариантов перестановок с увеличением количества уровней факторов. В то время, как разработанное программное обеспечение позволяет производить поиск оптимального или близкого к оптимальному по стоимости реализации плана эксперимента без полного перебора всех вариантов перестановок.

Зависимость быстродействия сравниваемых программ от количества уровней факторов представлена на рис. 4.

Видно, что для этих программ показатели быстродействия при реализации планов эксперимента, факторы ко-

торых варьируются на 2 или 3 уровнях, сходны. При дальнейшем увеличении количества уровней факторов происходит значительное увеличение времени счета известной программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента.

Выигрыш по стоимости реализации плана эксперимента в зависимости от количества уровней факторов для анализируемых программ представлен на рис. 5. Показано, что разработанное программное обеспечение имеет более высокий показатель выигрыша по стоимости реализации по сравнению с известной программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента.

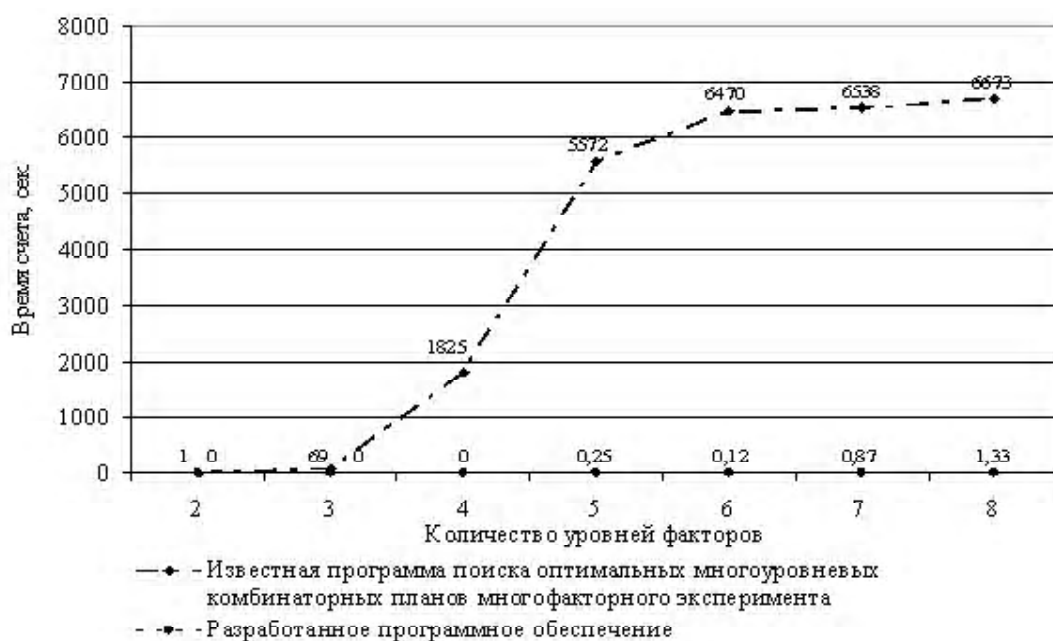


Рис. 4. Зависимость времени счета от количества уровней факторов

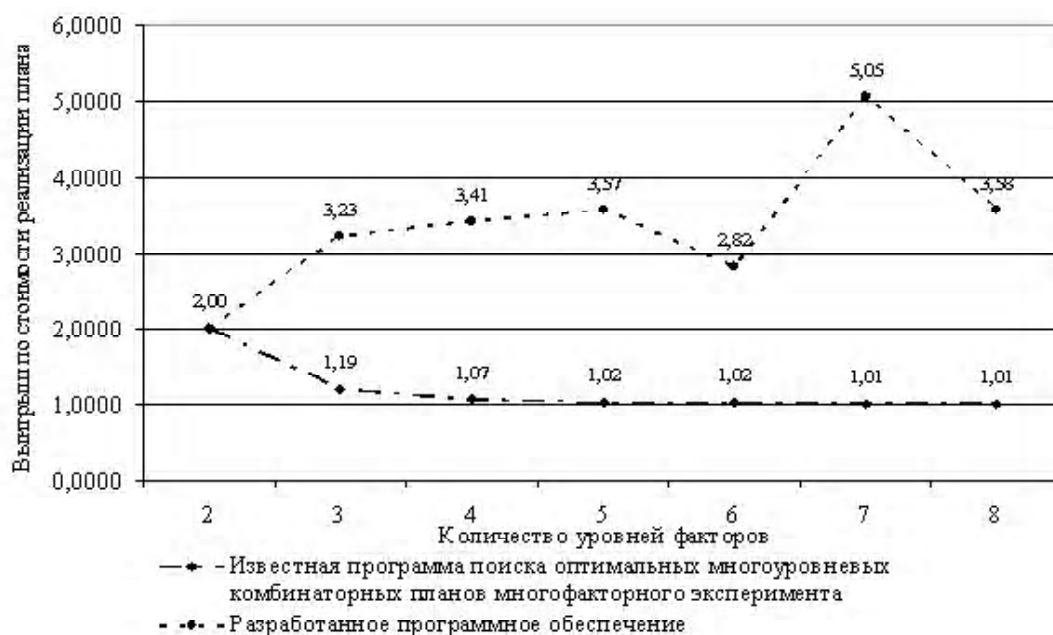


Рис. 5. Зависимость выигрыша по стоимости реализации плана эксперимента от количества уровней факторов

ВЫВОДЫ

Предложен метод поиска оптимального или близкого к оптимальному по стоимости реализации многоуровневого плана многофакторного эксперимента, позволяющий получать такие планы без необходимости перебора всех вариантов перестановок, что дает возможность значительно сократить время поиска. Для автоматизации процесса поиска с использованием предложенного метода разработано программное обеспечение.

Проведен сравнительный анализ разработанного программного обеспечения с известной программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента. Показано, что разработанное программное обеспечение позволяет получать значительный выигрыш по стоимостным и временным характеристикам при оптимизации многоуровневых планов многофакторного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошовий, М. Д. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багаторівневого експерименту» / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко, В. А. Дергачов. – Зареєстр. в Держ. департаменту інтелектуальної власності Міністерства освіти і науки України; Реєстр. 28.01.2010, Свід. про реєстр. автор. права на твір № 31824

Стаття надійшла до редакції 09.02.2012.

УДК 378.14:004.421

КОШОВИЙ М. Д., СУХОБРУС О. А. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ БАГАТОРІВНЕВИХ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Запропоновано метод пошуку оптимального або близького до оптимального за вартістю реалізації багаторівневого плану багаторівневого експерименту. Для автоматизації процесу пошуку з використанням запропонованого методу розроблено програмне забезпечення. Проведено порівняльний аналіз розробленого програмного забезпечення з програмою пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багаторівневого експерименту, яка реалізує метод генерації перестановок з мінімальним числом транспозицій сусідніх елементів.

Ключові слова: програмне забезпечення, симплекс-метод, швидкодія.

Koshevoy N. D., Sukhobrus E. A. THE COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS OF MULTILEVEL MULTIFACTOR EXPERIMENT PLANS

A method for finding the optimal or close to the optimum implementation value of a multi-level multifactorial experiment plan are proposed. To automate the search process using the proposed method, the software was developed. A comparative analysis of the developed software with multi-level program for finding the optimal combinatorial plans of multifactor experiment, which implements the generating permutations method with a minimal number of adjacent elements transpositions are implemented.

Key words: software, simplex method, speed.

Кулик А. С.¹, Пищухина О. А.², Клочок А. Ю.³

¹Д-р техн. наук, професор, Национального аерокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

²Канд. техн. наук, доцент Национального аерокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

³Ассистент Национального аерокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ОШИБОК ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ

Предложен алгоритм диагностирования ошибок в компьютерной обучающей программе решения характеристического уравнения системы управления с использованием численного метода, особенностью которого является формирование продукционной базы знаний поиска ошибок и использование дихотомического дерева в процессе диагностирования.

Ключевые слова: компьютерные обучающие программы, диагностирование, дихотомическое дерево.

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре систем управления летательными аппаратами Национального аерокосмічного університету ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ» с 2004 г. непрерывно формируется и обновляется комплекс компьютерных обучающих программ, каждая из которых представляет собой независимые модули, объединяемые в единую структуру [1, 2]. Выбор задач, предназначенных для ре-

ализации в рамках компьютерного обучения, осуществляется из предметной области, сформированной в результате системного анализа структуры учебных планов и выявления наиболее важных и (или) сложных тем для усвоения обучающимися, а также энергоемких задач, требующих длительных поэтапных расчетов, решение которых затруднено вследствие ограничения аудиторного времени. Так, в ходе разработок созданы обучающие про-

граммы расчета основных характеристик и показателей качества систем управления [3, 4], определения корней дифференциальных уравнений различными методами [5, 6], программа изучения определений и терминов базовых курсов, а также компьютерные приложения для решения задач в условиях реального времени [7].

Особенностью разработанных компьютерных программ является их интерактивная и интеллектуальная составляющие, т. е. способность не только предоставлять теоретический материал или осуществлять тестовый контроль знаний с дальнейшим оцениванием, но и помогать обучаемым в процессе решения конкретной математической или технической задачи путем выявления мест допускаемых ошибок и предоставления рекомендаций для их устранения [8]. Сформированные компьютерные средства обучения содержат блоки диагностирования ошибок, реализующие обратную связь процесса обучения после каждого этапа алгоритма решения путем разбиения последовательности ответов на правильные (1) и неверные (0) в виде дихотомического дерева. Каждая задача требует формирования уникального алгоритма поиска ошибок с использованием единого подхода, учитывающего особенности решаемой задачи, количество итераций, ожидаемый результат [9].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В результате проведенных исследований в области существующих компьютерных обучающих программ были определены следующие задачи для разработки, реализации и верификации алгоритма диагностирования ошибок:

- 1) сформировать предметную область исследований для формирования продукционной базы знаний поиска ошибок;
- 2) определить особенности выбранного метода для реализации процесса обучения и формирования дихотомического дерева;
- 3) разработать алгоритм диагностирования ошибок в ответах обучаемого лица в виде дихотомического дерева, а также компьютерную оболочку системы обучения.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время создание интеллектуальных компьютерных обучающих программ является одним из приоритетных направлений развития кафедры систем управления летательными аппаратами, разработки которых осуществляются в течение последнего десятилетия. В результате анализа учебных планов и программ были выделены группы ключевых дисциплин и задач, связанные с моделированием и исследованием процессов управления в сложных технических системах, решение которых требует компьютерной поддержки в рамках использования обучающих программ.

Одной из таких задач является нахождение корней характеристического уравнения, отражающего основные показатели качества системы, с использованием численного метода Лобачевского-Греффе-Данделена с целью дальнейшего определения устойчивости рассматриваемой

системы как необходимого условия ее работоспособности [10]. Характеристическое уравнение представляет собой алгебраическое уравнение, для определения корней которого в случае низших порядков используются общеизвестные формулы. Для уравнений третьей и четвертой степеней также могут быть приведены формулы, которые выражают корни через коэффициенты при помощи радикалов, но для уравнений пятого и более порядков таких формул не существует, и возникает проблема определения корней.

Среди известных методов решения подобных уравнений выделяют методы, которые достаточно просты для понимания, но неэффективны с точки зрения точности вычисленных корней, а также методы, которые являются эффективными, однако их численная реализация является очень сложной для восприятия и использования. Наиболее совершенным методом, позволяющим приближенно вычислить не только действительные, но и комплексные корни, является метод Лобачевского-Греффе-Данделена, который заключается в применении процесса квадрирования к исходному уравнению. В результате квадрирования переходят к новому уравнению, корни которого равны квадратам корней предыдущего уравнения, а переход осуществляется при помощи рекуррентных формул.

Правило перехода от исходного уравнения к базовому уравнению состоит в следующем. Пусть количество итераций m равно единице, тогда коэффициенты преобразованного уравнения A_0, A_1, \dots, A_n получаются из коэффициентов исходного уравнения по следующей схеме:

$$a_0^2 S^n + \left\{ \begin{array}{c} a_1^2 \\ -2a_0a_2 \end{array} \right\} S^{n-1} + \left\{ \begin{array}{c} a_2^2 \\ -2a_1a_3 \\ +2a_0a_4 \end{array} \right\} S^{n-2} + \dots + a_n^2 S^0 = 0, \quad (1)$$

т. е. $A_0 = a_0^2; A_1 = a_1^2 - 2a_0a_2; A_2 = a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4; A_n = a_n^2$.

Последовательное m -разовое использование схемы позволяет получить базовое уравнение, имеющее корни: $-S_1^{2m}, -S_2^{2m}, \dots, -S_n^{2m}$. Наличие пары комплексно-сопряженных корней среди корней характеристического уравнения характеризуется колебаниями знака одного из коэффициентов A_k при возрастании m . Модуль комплексных корней находится из соотношения:

$$|\rho| = \left(\frac{A_{k+1}}{A_{k-1}} \right)^{1/2^m}. \quad (2)$$

Действительную и мнимую части комплексно-сопряженных корней определяют по следующим соотношениям:

$$\alpha = -0,5 \cdot \left(\frac{a_1}{a_0} + S_1 + S_2 + \dots + S_n \right), \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\rho^2 + \alpha^2}. \quad (4)$$

Особенность рассматриваемого метода заключается в том, что для его реализации необходимо определить, какое количество итераций необходимо выполнить для достижения желаемой точности в определении корней. Для решения поставленной задачи проведено исследование ряда характеристических уравнений третьего порядка, имеющих действительные и комплексные корни. Результаты данного метода сравнивались с результатами, полученными методом радикалов, а также с корнями, рассчитанными в пакете MatLab при помощи стандартных функций. Было проведено исследование точности корней уравнения при различном количестве итераций m . В результате проведения численных экспериментов сделан вывод о том, что при увеличении m увеличивается точность решения (в качестве показателя точности выбран третий знак после запятой). Также экспериментальным путем было доказано, что максимально возможное по точности решение достигается уже на седьмой итерации, и полученные корни совпадают с корнями, полученными в математических пакетах.

Алгоритм диагностирования возникновения ошибок при решении характеристических уравнений методом Лобачевского-Греффе-Данделена сформирован в виде дихотомического дерева (рис. 1). Данное дихотомическое дерево получено для характеристического уравнения второго порядка с комплексно-сопряженными корнями, где α – действительная часть, β – мнимая. При построении бинарного дерева использовался алгоритм поиска ошибок «снизу-вверх», поэтому анализ возможных ошибок начинается с определения адекватности мнимой и действительной частей корней характеристического уравнения правильному решению и заканчивается проверкой правильности начальных коэффициентов квадрирования. В рассмотренном дихотомическом дереве учтены ошибки, которые могут возникнуть в результате недостаточных навыков работы с предлагаемым методом, а также ошибки, связанные с возможными пробелами в знаниях элементарной математики у обучающегося. К ошибкам, возникающим в результате плохой ориентации в методе Лобачевского-Греффе-Данделена,

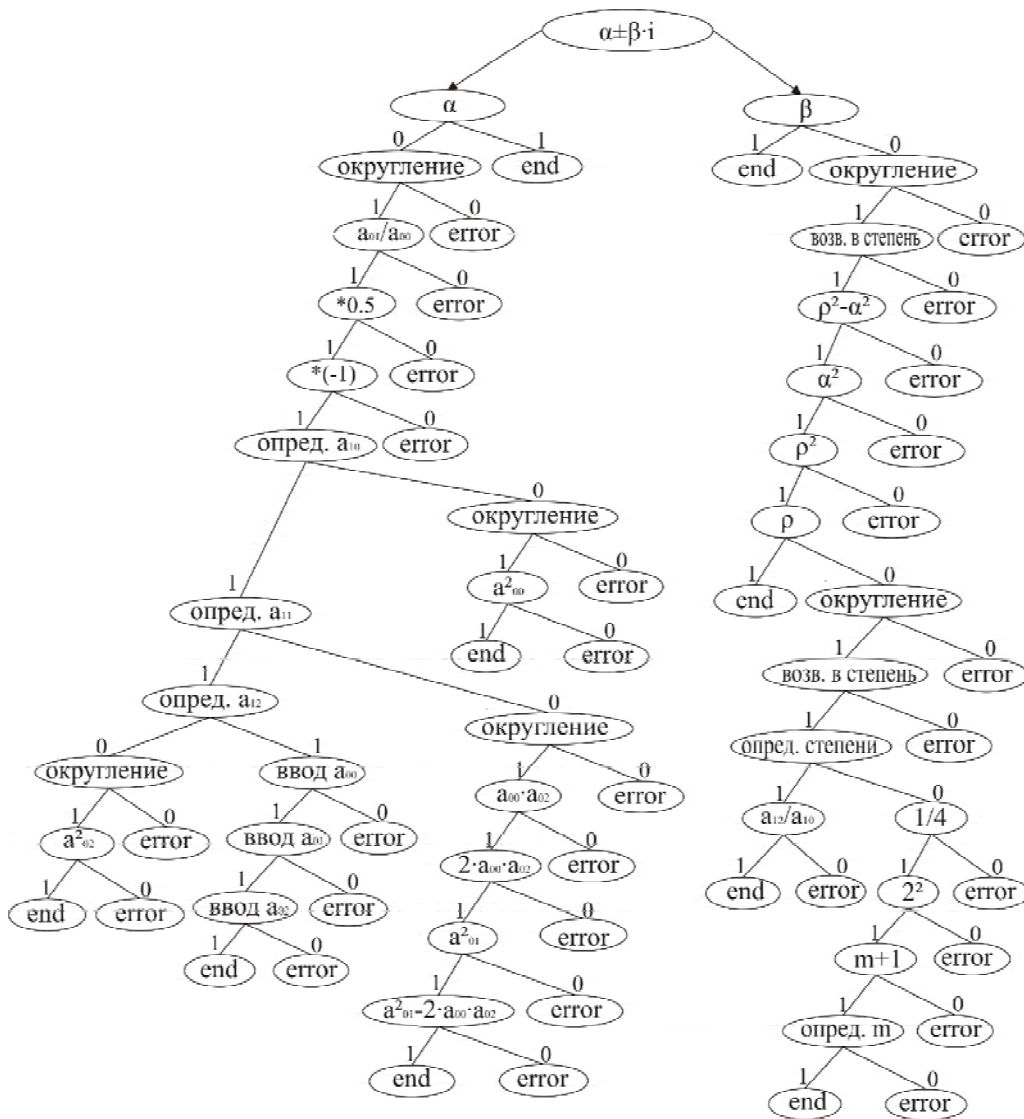


Рис. 1. Дихотомическое дерево поиска ошибок

относятся ошибки, связанные с введением неправильных коэффициентов квадрирования, с недостаточным количеством итераций, а также ошибки, допущенные при определении модуля комплексных корней. К ошибкам второго вида можно отнести ошибки, которые возникают при следующих математических операциях: округление, возведение в степень, умножение, деление, суммирование, вычитание. При повышении порядка уравнения возникает большее количество ошибок в его решении, а, следовательно, мощность дихотомического дерева значительно увеличивается.

Сформированный алгоритм диагностирования реализован в виде компьютерной оболочки, отражающей итерационную особенность нахождения корней характеристического уравнения данным методом и учитывающей возможные варианты их существования.

Компьютерная оболочка сформирована в рамках универсальной среды разработки компьютерных обучающих программ [3], особенностью которой является интерактивное обучение студентов при получении профессиональных знаний и умений, диагностирование места возникновения ошибки в ходе решения задачи и определение ее вида, а также информирование обучаемого о допущенных ошибках и последующее его оценивание с учетом результатов диагностирования. Экранные формы компьютерной оболочки приведены на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данной разработки при изучении базовых дисциплин кафедры систем управления летательных аппаратов позволяет обеспечить не только ознакомление студентов с предложенным теоретическим материалом, но и выработать у них профессиональное умение решать описанную задачу, а также закрепить полученный навык нахождения корней характеристического уравнения, необходимый для моделирования и про-

ектирования систем управления. Следует отметить, что рассмотренный метод Лобачевского-Греффе-Данделена достаточно формализован, поддается алгоритмизации, и, следовательно, может быть использован для обучения студентов технических специальностей, связанных с изучением основ теории и систем автоматического управления. Предложенный результат по оценке точности нахождения корней может быть применен для расширения возможностей математических пакетов анализа и синтеза систем управления.

Особенность предложенной модели поиска ошибок и алгоритма их диагностирования, сформированного в виде дихотомического дерева, состоит в пошаговом контроле усвоения информации, формировании сообщения о неправильном прохождении определенного этапа алгоритма сразу после допущенной ошибки, что более эффективно и целесообразно с педагогической точки зрения, а также помогает обучаемому самостоятельно устранить ошибку и понять причины ее возникновения.

Дальнейший этап исследований представляет собой тестирование компьютерной оболочки, проведение численных экспериментов с участием обучаемых, а также оценку адекватности разработанной системы процессу обучения и психологических особенностей восприятия студентами предложенного численного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационно-аналитические модели управления технически высшими учебными заведениями / [Гуржий А. Н., Кривцов В. С., Кулик А. С., Мирная Е. В., Чухрай А. Г.]. – Х. : ХАИ, 2004. – 386 с.
2. Пищухина, О. А. Информационная технология разработки компьютерных обучающих программ / О. А. Пищухина, Д. В. Бирюкова, О. В. Клименко // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – № 2 (14). – С. 57–62.
3. Development of the universal environment for creation and translation of intelligent tutoring programs / [A. Kulik,

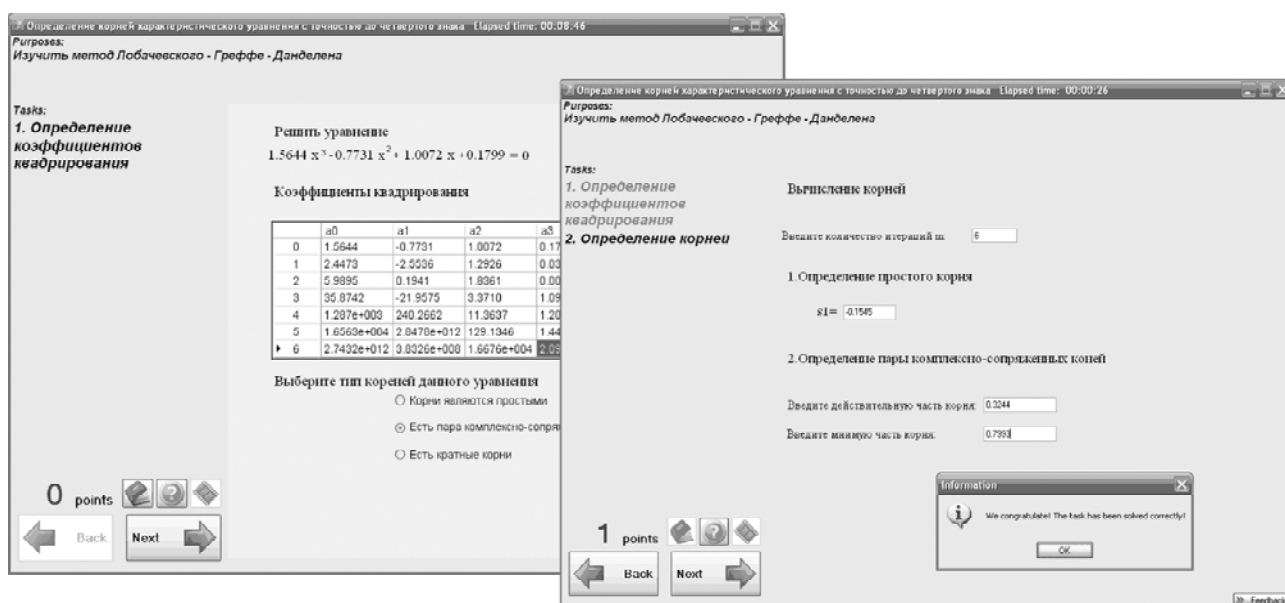


Рис. 2. Экранные формы компьютерной оболочки

- A. Chukhray, S. Pedan, T. Kulik]. – In Proceedings of the International Conference of «Interactive computer aided learning» ICL 2009 : EPortfolio and Quality in e-Learning, Austria, Villach, 2009. – P. 579–588.
4. Педан, С. И. Модели и методы интеллектуальной компьютерной поддержки приобретения профессиональных знаний и умений / Педан С. И. // Системи управління, навігації та зв'язку : збірник наукових праць. – К., 2011. – Вип. 4 (20). – С. 177–190.
 5. Свідоцтво № 17725. Комп'ютерна програма «Навчальна програма розв'язання диференційних рівнянь операторним методом» / О. О. Піщухіна, Д. В. Бірюкова, О. В. Клименко (Україна) – Дата реєстрації 28.08.06.
 6. Свідоцтво № 17651. Комп'ютерна програма «Навчальна програма розв'язання диференційних рівнянь методом Ейлера» / О. О. Піщухіна, Д. В. Бірюкова, О. В. Клименко (Україна) – Дата реєстрації 15.08.06.
 7. Дергачев, К. Ю. Формирование комплекса интеллектуальных обучающих программ при решении навигационных задач / Дергачев К. Ю., Пищухина О. А., Клочок А. Ю. // Людина і космос. – 2011. – С. 211.
 8. Пищухина, О. А. Подход к формированию обратной связи в интеллектуальных обучающих системах в сфере высшего технического образования / О. А. Пищухина, А. Ю. Клочок // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 2. – С.107–110.
 9. Кулик, А. С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления / А. С. Кулик – Х. : Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ», Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
 10. Демидович, Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М. : Наука, 1986. – 664 с.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2012.

Кулік А. С., Піщухіна О. О., Клочок А. Ю.
МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ПОШУКУ ПОМИЛОК ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБІВ НАВЧАННЯ

Запропоновано алгоритм діагностування помилок в комп'ютерній навчальній програмі розв'язання характеристичного рівняння системи управління з використанням чисельного методу, особливістю якого є формування продукційної бази знань пошуку помилок і використання дихотомічного дерева в процесі діагностування.

Ключові слова: комп'ютерні навчальні програми, діагностування, дихотомічне дерево.

Kulik A. S., Pishchukhina O. A., Klochok A. Yu.
MODELS AND ALGORITHMS FOR FINDING ERRORS WHILE SOLVING TASKS USING COMPUTER-ASSISTED LEARNING

An algorithm for diagnosing errors in a computer training program for solutions of the control system characteristic equation using a numerical method is offered. Its feature is the formation of a product knowledge base for searching errors and using dichotomous tree in the process of diagnosis.

Key words: computer training programs, diagnosis, dichotomous tree.

УДК 004.652.4+004.827

Мельникова Н. І.

Асистент Національного університету «Львівська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРТНИХ СИСТЕМ ПРИЗНАЧЕННЯ ЛІКУВАННЯ

У статті розроблено моделі лікувальної експертної системи, що оптимізують процес призначення лікування та забезпечують підвищення ефективності одужання пацієнтів.

Ключові слова: модель експертної системи, оптимізація процесу, медичні системи.

ВСТУП

Безліч чинників і складність взаємодії в ході прийняття рішень роблять медицину однією з галузей де процедура отримання оптимальних рішень ускладнюється. Ситуацію посилює відсутність стандартизації в термінології, форматі, шкалах вимірювання. Ще немає гнучких і легко використовуваних комп'ютерних методів машинного представлення медичних знань, а також формалізації прийняття рішень. Більш того, на сьогодні практично не існує аналогів лікувальних експертних систем (ЕС), які давали б практичному лікарю-фахівцю структуровані терапевтичні схеми медикаментозного призначення для лікування різних патологій. Складність полягає в створенні інформаційної моделі представлення знань даної предметної області (ПО), яка вимагає знань кваліфікованого експерта в даній області. Внаслідок цього лікувальні

інформаційні системи (ІС) дають потенційну платформу для подальших досліджень та обробок.

Основними задачами, що виникають при моделюванні інформаційних медичних систем, є наступні:

– узагальнення методів представлення складно-формалізованих даних та забезпечення коректного вирішення задач в предметних областях медицини;

– розроблення моделі та методів функціонування лікувальної ІС;

– розроблення алгоритмів підбору оптимального механізму лікувальних фармацевтичних схем;

– розробка системи підтримки лікувальних рішень, які поєднують переваги традиційних методів подання експертних знань;

– впровадження прототипу лікувальної системи в медичному закладі та апробація результатів роботи розроблених алгоритмів.

1. ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ ЛІКУВАЛЬНОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

Описані особливості ЕС призвели до необхідності введення формальної моделі лікувальної експертної системи (ЛЕС). Для формалізованого представлення ЛЕС, завданням якої є підбір оптимального механізму лікувальної фармацевтичної схеми, ми беремо за основу структурну модель продукційної ЕС, яку зазвичай використовують для вирішення такого класу задач.

База знань у відповідності до структурної схеми ЕС полягає в підборі певної множини правил $P[1]$:

$$P = \{P_1, \dots, P_n\}, \tag{1}$$

де продукція

$$P_i = s_{i_1} \wedge s_{i_2} \wedge \dots \wedge s_{i_k} \rightarrow s_j, \tag{2}$$

та скінченної множини фактів S :

$$S = \{s_1, \dots, s_k\}. \tag{3}$$

Усі правила, керуючись механізмом виводу ЛЕС, можна відобразити у вигляді підмножин правил:

$$P: \Psi \rightarrow \Omega, \tag{4}$$

де $\Psi = \Psi(s_i), s_i \in S$ та $\Omega = \Omega(s_j), s_j \in S$, Ω – схема лікування, Ψ – множина чітких та нечітких параметрів пацієнта.

Прикладом фактів є нечіткі параметри: бактеріальна флора, локалізація запального процесу, анатомічна локалізація, супутня патологія та ін.

Прикладом правил є підбір препаратів на основі обраних чітких та нечітких параметрів.

Можемо стверджувати, що ЛЕС характеризується множиною вхідних та вихідних параметрів:

$$LS = \langle S, A, P, Z, G, gf, ge, F \rangle, \tag{5}$$

де Z – множина всіх можливих вихідних даних; G – кінцева множина станів діалогової системи; gf – початковий стан системи, $gf \in G$; ge – кінцевий стан системи, $ge \in G$; F – множина процедур прийняття рішень; P – множина правил; A – множина чітких даних; S – множина нечітких даних, яка складається з двох підмножин S_1 та S_0 , що представлено на рис. 1:

$$S = S_0 \cup S_1, \tag{6}$$

де S_1 будемо вважати множиною констатованих параметрів та S_0 – множиною непомічених параметрів. На початку роботи ЕС множина S_1 містить параметри, які в процесі системи поповнюються елементами множини S_0 :

$$S_0 = S_{0use} \cup S_{0unuse}, \tag{7}$$

$$S_1 = S_1 \cup S_{0use}, \tag{8}$$

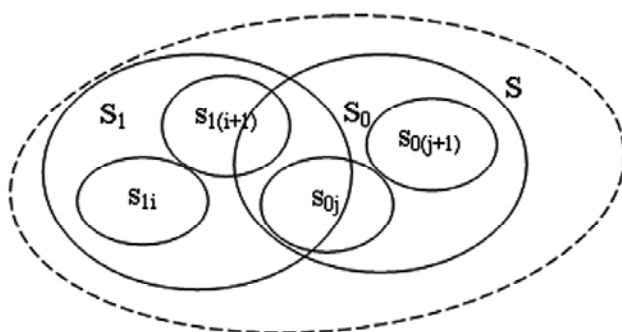


Рис. 1. Формування множини нечітких параметрів

$$S_0 = S_0 \setminus S_{0unuse}. \tag{9}$$

Правила $\Psi \rightarrow \Omega$ інтерпретуються за допомогою конструкції:

ЯКЩО Ψ ТОДІ Ω .

Отже механізм виводу передбачає виконання правила, ліва частина якого Ψ співставляється з існуючими параметрами у множині S_1 і набуває істини. В результаті множина S_1 поповнюється за рахунок фактів, що констатуються у правій частині продукції Ω . Це породжує ланцюг виводів проміжних та остаточних рішень [1].

Множини продукцій та вихідних даних організовані в деяку систему, представлену у вигляді дерева рішень. Фрагмент такого дерева підбору терапевтичних схем лікування з вершинами-препаратами z_1, z_2, \dots, z_{12} представлений на рис. 2.

На основі формулювання математичної моделі ЛЕС була створена концептуальна модель, яка представляє змістовний опис механізму підбору терапевтичної схеми лікування хворих.

На даній схемі до множини чітких даних (A) входять параметри, що характеризують особливості певного лікарського засобу, які можна вважати сталими величинами (рис. 3).

Розглядаючи множину нечітких даних (S), можна стверджувати, що вони взаємозалежні, так як множина S складається з двох підмножин S_0 та S_1 (рис. 4). При наявності даних підмножини S_1 формуються дані підмножини S_0 .

Запропонована концептуальна модель (рис. 5) дозволяє оптимізувати процес реалізації в залежності від поширення, характеру диференціювання процесу і, таким чином, забезпечити підвищення ефективності лікування хворих: зменшення частоти повторів захворювання, скорочення тривалості періоду лікування.

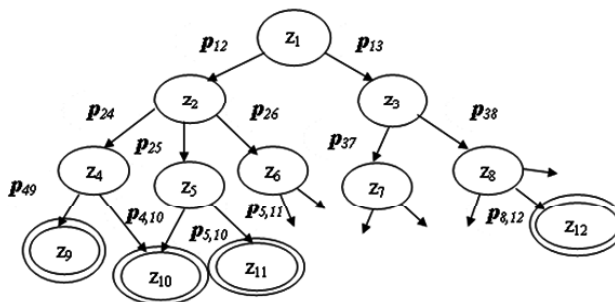


Рис. 2. Граф підбору терапевтичних схем лікування

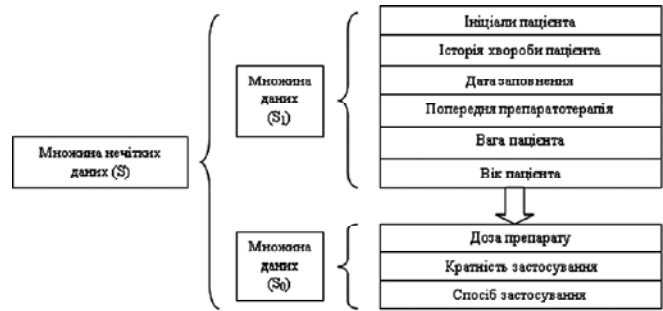
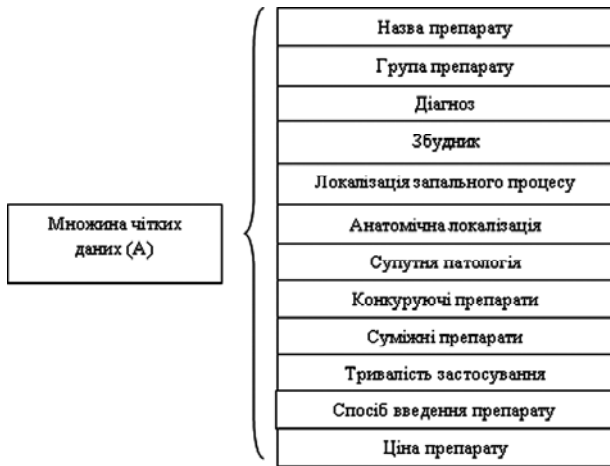


Рис. 4. Перелік параметрів, які входять у групу даних, що належать множині S

Рис. 3. Перелік параметрів, які входять у групу даних, що належать множині A

Лікувальна експертна система

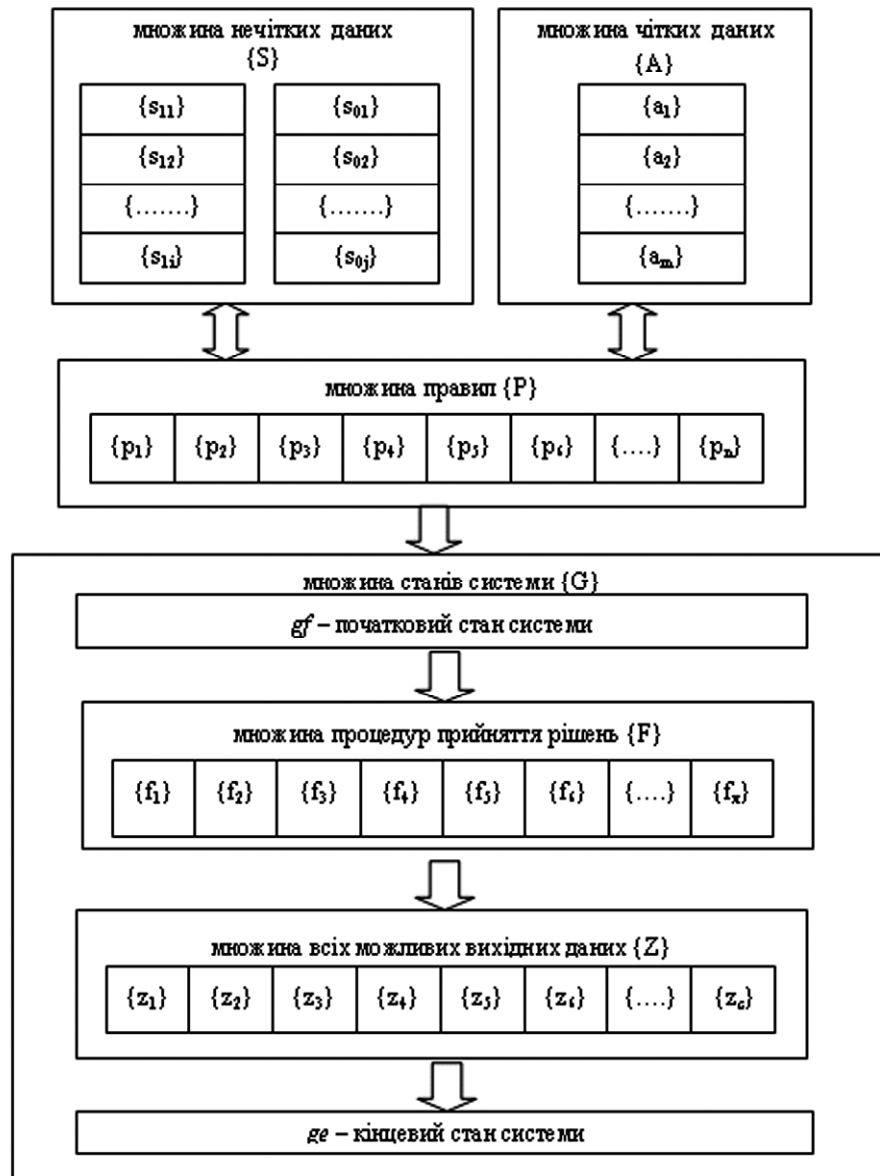


Рис. 5. Концептуальна модель підбору терапевтичної схеми лікування в ЛЕС

2. МАТЕМАТИЧНІ АПАРАТИ ОБРОБКИ СКЛАДНО ФОРМАЛІЗОВАНИХ ДАНИХ МЕДИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ЛІКУВАННЯ

Теорія автоматів – логіко-математична теорія, об'єктом дослідження якої є абстрактні дискретні автомати – перервні перетворювачі інформації [2, 11]. У дискретній математиці, інформатиці теорія автоматів вивчає абстрактні машини у вигляді математичних моделей і проблеми, які вони можуть вирішувати. За допомогою автомата розв'язано широкий ряд проблем, а саме:

- проблеми «гедделівського типу» (повнота, розв'язність тощо);
- проблеми самовдосконалення;
- проблеми самоорганізації;
- проблеми самопроекування.

На даному етапі розгляду перспективності застосування теорії автоматів при вирішенні великого ряду задач динамічних процесів прийняття рішень, можемо стверджувати, що розглянута вище лікувальна експертна система є прототипом скінченного автомата. Концепція запропонованих функціональної схеми та концептуальної моделі ЛЕС базується на опрацюванні вхідних сигналів (множини S та A), які характеризують загальний стан пацієнта, правил (множина P), на підставі яких працюють процедури прийняття рішень (множина F) при підборі відповідного консервативного лікування патологічного процесу хворого та вихідних сигналів у вигляді підібраних фармакологічних схем лікування (множина Z).

Теорія автоматів тісно переплітається з основними принципами теорії алгоритмів. Ідея формується на підставі того, що автомат перетворює дискретну інформацію поетапно в дискретні моменти часу і формує результуючу інформацію по кроках заданого алгоритму. Ці перетворення реалізуються за допомогою технічних та програмних засобів [9, 11, 12]. На підставі цього інформаційна експертна система за ідеологічним та функціональним призначенням є автоматом, який відображається у вигляді певного пристрою, тобто програмного продукту, куди подаються вхідні сигнали (S та A) і знімаються вихідні (Z), що обумовлюється присутністю внутрішніх станів (P, F, G).

Приклад:

У нашому випадку, нехай програмний продукт – це ЛЕС (LS);

– **вихідні сигнали** – це параметри, що характеризують стан пацієнта, а саме:

- діагноз – мастит;
- локалізація запального процесу – молочна залоза;
- попередня препаратотерапія – парацетамол;
- бактеріальна флора – стафілокок, та ін.;

– **внутрішні стани** – це правила, процедури підбору відповідного лікування (P, F) та стани системи, що відтворюють результат взаємодії комуніканта та системи (G). Нехай на підставі введених вхідних даних формується запит на мові високого рівня, що конкретизує вибір подальших станів, а саме:

– на підставі діагнозу, локалізації, попередньої препаратотерапії та флори підбираємо ліки. Якщо інформація

за запитом відсутня, генерується повідомлення про пусту множину вихідних даних;

– **вихідні сигнали** – це підібрані терапевтичні схеми лікування хворого (Z), а саме: ампіцилін, диклобрю та відповідні схеми застосування.

Можемо описати структуру елементів автомата у вигляді взаємозалежності множин параметрів системи.

Отже,

$$LS = S \times A \cup P \times F \times G \cup Z. \quad (10)$$

Особливістю ІЕС (інформаційно-експертних систем) є автоматизація вибору і прийняття оптимальних рішень на основі отриманого людиною досвіду та раціонального аналізу зовнішніх дій, описаних у термінах моделі ПО. Керуючись теорією автоматів, реалізація процесу прийняття рішень в ІЕС характеризується вхідними сигналами системи у вигляді даних ПО, їхню обробкою, що забезпечує наявність внутрішніх станів та виведенням кінцевого висновку у вигляді вихідних сигналів.

3. ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРИЗНАЧЕННЯ ЛІКУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СКІНЧЕНОГО АВТОМАТА

Процес призначення лікування, що змодельований за допомогою скінченного автомата (CA), є особливим видом автомата-абстракції, що використовується для опису шляху зміни стану об'єкта (програмного продукту) в залежності від досягнутого стану та інформації [2, 4, 6], отриманої ззовні. Його особливістю є скінченність множини станів. Кількість елементів множини вхідних даних Ψ системи прийняття рішень є скінченна, тобто існує:

– натуральне число k , що є числом елементів множин нечітких даних S ;

– натуральне число m , що є числом елементів множин чітких даних A .

Отже,

$$\Psi = S \cup A, \quad (11)$$

де A – множина чітких даних, $A \in \Psi$; S – множина нечітких даних, $S \in \Psi$; Ψ – множина чітких та нечітких параметрів пацієнта.

Теорія скінчених автоматів, що є основою складовою частиною загальної теорії автоматів, має велике прикладне значення. CA можуть розв'язувати велику кількість задач, серед яких автоматизація проектування електронних приладів, проектування комунікаційних протоколів, синтаксичний аналіз та інші інженерні застосування. В біології та медицині і дослідженнях штучного інтелекту автомати або їхні ієрархії іноді використовуються для описання неврологічних систем і в лінгвістиці для описання граматики природних мов. На прикладі ЛЕС теорія скінченного автомата дає підґрунтя для формалізації процесу прийняття рішень при підборі та призначенні терапевтичного лікування пацієнтів [2, 3, 10]:

$$LS = \Psi \cup P \times F \times G \cup Z. \quad (12)$$

Отже, на підставі введеної множини Ψ , що містить підмножини S і A , множини правил P , множини проце-

дур F , множини станів системи та множини вихідних параметрів Z можемо промоделювати етапи призначення консервативного лікування пацієнтів за допомогою основних складових характеристик скінченного автомата, тобто множин «входів-внутрішніх станів-виходів».

4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СА НА ПРИКЛАДІ ЛЕС

Поняття СА було запропоновано в якості математичної моделі (ММ) технічних приладів дискретної дії, оскільки будь-який такий пристрій (через скінченність своїх розмірів) може мати тільки скінченну кількість станів. ММ – система математичних співвідношень, що описують досліджуваній процес або явище, що дозволяють передбачити хід процесу, розрахувати цільову функцію (вихідні параметри процесу), керувати процесом, проєктувати системи з бажаними характеристиками [5, 6].

Якщо співвідношення задаються аналітично, то їх можна розв'язати в замкнутому вигляді (явно) відносно шуканих змінних як функції від параметрів моделі, або в частково замкнутому вигляді (неявно), коли шукані змінні залежать від одного або багатьох параметрів моделі. До моделей цього класу належать диференційні, інтегральні, різницеві рівняння, ймовірнісні моделі, моделі математичного програмування та інші.

Базуючись на розробленій моделі ЛЕС, можна формалізувати лікувальну експертну систему у вигляді СА, який характеризується шістьма елементами:

$$\langle G, \Psi, Z, \alpha, \beta, g_0 \rangle, \quad (13)$$

де G – скінченна множина внутрішніх станів (внутрішній алфавіт або алфавіт станів); Ψ – скінченна множина входних сигналів (вхідний алфавіт); Z – скінченна множина вихідних сигналів (вихідний алфавіт); g_0 – початковий стан, $g_0 \in G$; α – функція переходів, β – функція виходів:

$$\alpha : G \times \Psi \rightarrow G, \quad (14)$$

$$\beta : G \times \Psi \rightarrow Z, \quad (15)$$

$\alpha(g, \psi)$ та $\beta(g, \psi)$ – однозначні функції, тобто автомат належить до класу детермінованих. В детермінованих автоматах кожен стан має лише один перехід для кожного входу. В недетермінованих автоматах вхід може призвести до одного, більше, ніж одного або зовсім без переходу для даного стану. Ця різниця важлива на практиці, але не в теорії, через існування алгоритму трансформації будь-якого недетермінованого СА в більш складний детермінований СА з однаковою функціональністю [3].

Для обох детермінованих і недетермінованих СА зручно припустити, що α неповна функція, тобто $\alpha(g, \psi)$ не має бути визначеною для кожної комбінації $g \in G$ та $\psi \in \Psi$. Якщо СА знаходиться в стані g , і $\alpha(g, \psi)$ не визначена, тоді система може повідомити про помилку (тобто відхилити ввід).

Якщо функція виходу є функцією стану і вхідного алфавіту ($\beta : G \times \Psi \rightarrow Z$), таке визначення відповідає моделі Мілі, і вона може бути виконана як автомат Мілі. Якщо функція виходу залежить тільки від стану ($\beta : G \rightarrow Z$), тоді таке визначення відповідає моделі Мура, і функція може бути виконана як автомат Мура. Скінченний автомат без функції виходу відомий як напівавтомат або як модель станів і переходів [6, 7, 12]. Отже, у даному прикладі ЛЕС скінченний автомат характеризується на основі концепції теорії автомата Мілі, і функція вихідних сигналів залежить від множини станів системи та вхідних сигналів, тобто параметрів стану пацієнта. В наступному розгляді модель ЛЕС буде базуватись на моделі автомата Мілі.

Станам автомата відповідають вершини графа, функції переходів – орієнтовані ребра, зважені символами, за якими відбувається перехід. Заключні стани позначаються подвійним кругом. Початковий та заключний стани автомата позначаються стрілками (рис. 6).

Автомат, що задається LC_2 -схемою, яка характеризує процеси прийняття рішень в ЛЕС:

$$LC_2 = \langle G, \Psi, Z, \alpha, \beta, g_0 \rangle; \quad (16)$$

функціонує в дискретному автоматному часі, моментами якого є такти, тобто суміжні рівні інтервали часу, кожному з яких відповідають однакові значення вхідних і вихідних сигналів та внутрішнього стану.

Позначимо $g(t)$, $\psi(t)$, $z(t)$ – внутрішній стан, вхідний та вихідний сигнал t -го такту, $g(0) = g_0$.

При вирішенні задач прийняття рішень мінімізують кількість станів автомата для роботи згідно з заданим алгоритмом, зокрема такий автомат називають абстрактним. Схема абстрактного автомата ЛЕС зображена на рис. 7.

В момент часу t абстрактний автомат може сприйняти вхідний сигнал $\psi(t) \in \Psi$, встановити вихідний сигнал $z(t) \in Z$, $z(t) = \beta[g(t), \psi(t)]$ і перейти зі стану $g(t) \in G$ в стан $g(t+1) \in G$, $g(t+1) = \alpha[g(t), \psi(t)]$. Функціональна схема абстрактного автомата зображена на рис. 8.

Виходячи з вищесказаного, автомат Мілі на прикладі ЛЕС, тобто LC_2 -автомат першого роду, можна описати такими рівняннями, де стани системи $g(t+1)$ у певний період часу описуються функціями переходів

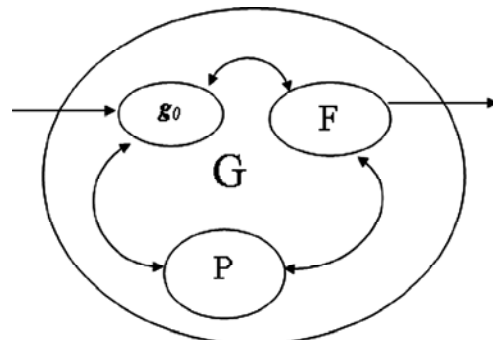


Рис. 6. Діаграма внутрішніх станів автомата

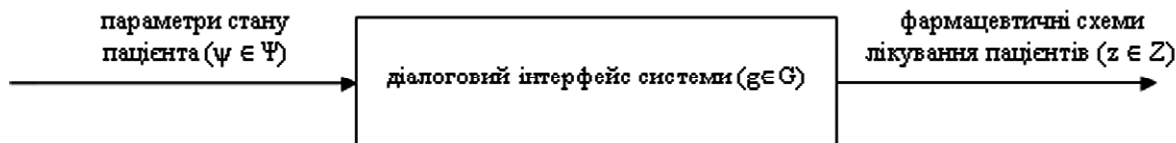


Рис. 7. Схема абстрактного автомата ЛЕС

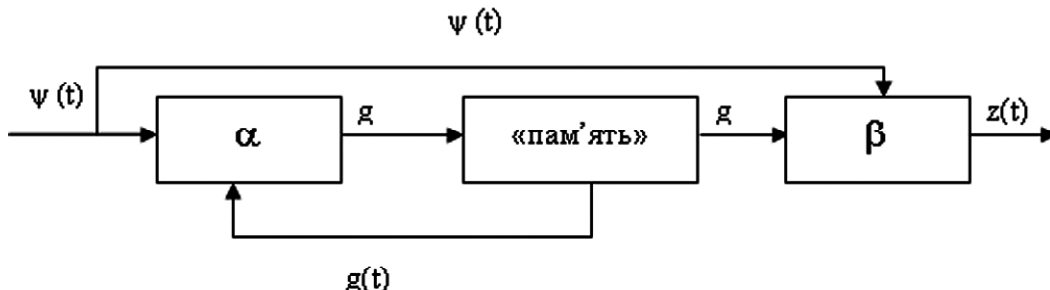


Рис. 8. Функціональна схема абстрактного автомата

$\alpha[g(t), \psi(t)]$, елементи множини виходів $z(t)$ – функціями виходів, тобто відповідними схемами лікування $\beta[g(t), \psi(t)]$, параметрами яких служать елементи множин станів системи та множини вхідних сигналів:

$$g(t+1) = \alpha[g(t), \psi(t)], \quad t=0, 1, 2, \dots, \quad (17)$$

$$z(t) = \beta[g(t), \psi(t)], \quad t=0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

LC_2 -автомат, що має більше одного стану, називають автоматом з пам'яттю, автомати без пам'яті мають лише один стан [39, 42]. Робота автоматів без пам'яті (комбінаційні або логічні схеми) полягає в тому, що кожному вхідному сигналу ставиться у відповідність один вихідний сигнал.

Опис скінченних LC_2 -автоматів (задання всіх елементів множини $LC_2 = \langle G, \Psi, Z, \alpha, \beta, g_0 \rangle$) на прикладі ЛЕС здійснимо табличним, графічним та матричним способами.

Найпростіший спосіб – табличний. Він ґрунтується на використанні таблиць переходів і виходів, рядки яких відповідають вхідним сигналам автомата, а стовпці – його станам. При цьому звичайно перший зліва стовпець відповідає початковому стану g_0 . На перетині i -го рядка та k -го стовпця таблиці переходів знаходиться відповідне значення функції переходів $\alpha(g_k, \psi_i)$, а в таблиці виходів – відповідне значення функції виходів $\beta(g_k, \psi_i)$, тобто схем лікування (табл. 1, 2).

Для ЛЕС функція виходу $\beta(g, \psi)$ залежить від множини станів G та вхідного алфавіту Ψ . Це дає нам підстави керуватись засадами, на яких ґрунтується модель автомата Мілі. Приклад табличного задання автомата Мілі LC_2 з трьома станами двома вхідними і двома вихідними сигналами представлено в табл. 3.

При іншому способі опису LC_2 -автомата використовується поняття направленої графа. Граф автомата – це набір вершин, які відповідають певним станам, і дуг,

Таблиця 1. Таблиця переходів Мілі LC_2 автомата

$\Psi \backslash G$	g_1	g_2	...	g_k
Ψ_1	опрацювання запиту 1.1	опрацювання запиту 2.1	...	опрацювання запиту $k.1$
Ψ_2	опрацювання запиту 1.2	опрацювання запиту 2.2	...	опрацювання запиту $k.2$
...
$\Psi_{i,i}$	опрацювання запиту 1. i	опрацювання запиту 2. i	...	опрацювання запиту $k.i$

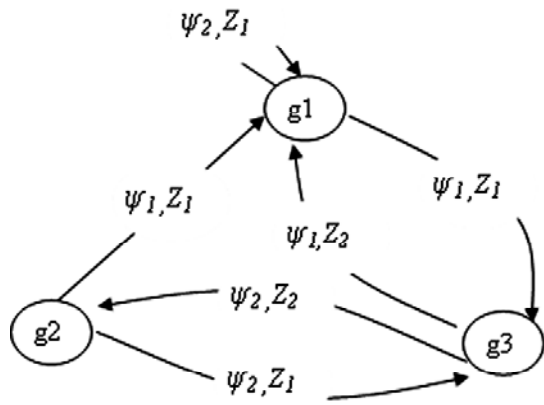
Таблиця 2. Таблиця виходів Мілі LC_2 автомата

$\Psi \backslash G$	g_1	g_2	...	g_k
Ψ_1	схема 1.1	схема 2.1	...	схема $k.1$
Ψ_2	схема 2.2	схема 2.2	...	схема $k.2$
...
Ψ_i	схема 1. i	схема 2. i	...	схема $k.i$

Таблиця 3. Таблиця переходів та виходів автомата Мілі LC_2

$\Psi \backslash G$	запит на діагноз	запит на флору	запит на суп. пат.
<i>Переходи</i>			
діагноз	запит на суп. пат.	запит на діагноз	запит на діагноз
бактеріальна флора	запит на діагноз	запит на суп. пат.	запит на флору
<i>Виходи</i>			
діагноз	схема 1	схема 1	схема 2
бактеріальна флора	схема 1	схема 2	схема 1

що з'єднують ці вершини та відповідають переходам з одного стану в інший. Якщо вхідний сигнал ψ_k викликає перехід автомата зі стану g_i в стан g_j , то на графі автомата дуга, що виходить з вершини g_i і входить в вершину g_j , позначається ψ_k . Для автомата Мілі на цій же дузі позначається вихідний сигнал (рис. 9).

Рис. 9. Граф автомата Мілі LC_2

Математично найзручнішою є матрична форма опису СА. При цьому матриця з'єднань автомата – це квадратна матриця $C = \|c_{ij}\|$, рядки якої відповідають вихідним станам, а стовпці – станам переходу. Для автомата Мілі елемент $c_{ij} = \psi_k / z_s$, що стоїть на перетині i -го рядка і j -го стовпця, відповідає вхідному сигналу ψ_k , що викликає перехід зі стану g_i в стан g_j , і вихідному сигналу z_s , що видається при цьому переході. Для розглянутого вище автомата LC_2 матриця з'єднань матиме вигляд:

$$C_1 = \begin{pmatrix} \psi_2 / z_1 & - & \psi_1 / z_1 \\ \psi_1 / z_1 & - & \psi_2 / z_2 \\ \psi_1 / z_2 & \psi_2 / z_1 & - \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Якщо перехід зі стану g_i в стан g_j відбувається під дією декількох сигналів, то елемент матриці c_{ij} є множиною пар «вхід-вихід» для цього переходу, з'єднаних знаком диз'юнкції.

Стан g_k називається стійким, якщо для довільного вхідного сигналу $\psi_i \in \Psi_1$ стану $g_j \in G$, для яких $\alpha(g_j, \psi_i) = g_k$, виконується умова $\alpha(g_k, \psi_i) = g_k$ та $\beta(g_k, \psi_i) = z_k$. Таким чином, LC_2 -автомат називається асинхронним, якщо кожен його стан $g_k \in G$ є стійким. В асинхронних автоматах зчитування вхідного сигналу відбувається неперервно і, реагуючи на вхідний сигнал певної тривалості, автомат може декілька раз змінювати стан і видавати відповідні вихідні сигнали, поки не перейде в стійкий стан, який вже не може змінитися під дією даного вхідного сигналу [7, 10, 11].

На практиці, автомати завжди є асинхронними, а стійкість їх станів досягається різними способами, наприклад, введенням сигналів синхронізації. Але на рівні абстрактної моделі деколи легше оперувати синхронними скінченними автоматами [3, 6, 7].

ВИСНОВКИ

У даній роботі розроблено формальну модель ЛЕС, яка формалізує поведінку людини-експерта при підборі

схеми лікування пацієнтів. Ця модель характеризується сукупністю множин, підмножин чітких і нечітких вхідних параметрів, множини вихідних даних, множини процедур прийняття рішень та множини станів системи.

Запропонована концептуальна модель дозволяє оптимізувати та індивідуалізувати процес реалізації в залежності від поширення, характеру диференціювання процесу захворювання і, таким чином, забезпечити підвищення ефективності лікування хворих: зменшення частоти повторів захворювання, скорочення тривалості періоду лікування.

Припускаємо, що інформаційна експертна система за ідеологічним та функціональним призначенням нагадує автомат, який відображається у вигляді певного пристрою, тобто програмного продукту, куди подаються вхідні сигнали і знімаються вихідні, що обумовлюється присутністю внутрішніх станів. Це дало підстави формалізувати модель ЛЕС на основі концепції теорії автомата Мілі, що підтверджує існування функції вихідних сигналів, яка залежить від множини станів системи та вхідних сигналів, тобто параметрів пацієнта.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – С. Пб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
2. Глушков, В. М. Энциклопедия кибернетики / ред. В. М. Глушков, в 2 т., АН УРСР. – К. : Голов. ред. Укр. рад. енциклопедії, 1973. – 584, [12] с.
3. Шинкарука, В. І. Філософський словник / ред. В. І. Шинкарука. – 2-ге вид. – К. : Голов. Ред. УРЕ, 1986. – 476 с.
4. Савельев, А. Я. Прикладная теория цифровых автоматов : учеб. [для вузов по спец. ЭВМ] / А. Я. Савельев. – М. : Высшая школа, 1987. – 272 с.
5. Прикладная теория цифровых автоматов / [К. Г. Самофалов, А. М. Романкевич, В. Н. Валуйский та ін.]. – К. : Вища школа. Головне видавництво, 1987. – 375 с.
6. Майоров, С. А. Структура электронных вычислительных машин / С. А. Майоров, Г. И. Новиков. – Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. – 384 с.
7. Каган, Б. М. Электронные вычислительные машины и системы : учеб. пособие [для вузов] / Б. М. Каган. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 592 с.
8. Самофалов, К. Г. Цифровые ЭВМ : теория и проектирование / К. Г. Самофалов, В. И. Корнейчук, В. П. Тарасенко. – К. : Вища школа. Головне видавництво, 1989. – 424 с.
9. Савельев, А. Я. Арифметические и логические основы цифровых автоматов / А. Я. Савельев. – М. : Высшая школа, 1999. – 255 с.
10. Савельев, А. Я. Прикладная теория цифровых автоматов / А. Я. Савельев. – М. : Высшая школа, 2007. – 272 с.
11. Вавилов, Е. Н. Синтез схем электронных цифровых машин / Е. Н. Вавилов, Г. П. Портной. – М. : Советское радио, 2003. – 440 с.
12. Соловьев, Г. Н. Арифметические устройства ЭВМ / Г. Н. Соловьев. – М. : Энергия, 1978. – 177 с.

Стаття надійшла до редакції 22.08.2011.

Мельникова Н. И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ НАЗНАЧЕНИЯ ЛЕЧЕНИЯ

Разработаны модели лечебной экспертной системы, которые оптимизируют процесс назначения лечения и обеспечивают повышение эффективности выздоровления пациентов.

Ключевые слова: модель экспертной системы, оптимизация процесса, медицинские системы.

Melnykova N. I.

MODELING OF EXPERT SYSTEM ASSIGNMENT TREATMENT

Developed models expert system of treatment, that optimize the assignment of treatment and providing efficiency convalescence of patients.

Key words: model of expert system, optimization of the process, medical systems.

УДК 539.3

Сабо И. И.¹, Толоч В. А.²¹Аспирант Запорожского национального университета²Д-р техн. наук, профессор Запорожского национального технического университета

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О ШТАМПе В ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

В данной работе строится решение двумерной задачи теории упругости (плоская деформация) о действии штампа на упругую полуплоскость при помощи символического метода Власова В. З. [1] и точного решения гармонического уравнения для полуплоскости. Замена символических функций соответствующими гармоническими функциями позволяет получить точное решение рассматриваемой задачи.

Ключевые слова: символический метод, штамп, полуплоскость, гармоническое уравнение, символическая функция, гармоническая функция, точное решение.

ВВЕДЕНИЕ

Символическое решение Власова В. З., полученное методом начальных функций, находит широкое применение при решении задач теории упругости. Суть метода начальных функций состоит в поиске начальных функций. В случае плоской задачи – это поиск функций напряжений и перемещений на плоскости $y=0$ [1]: $U_0(x) = Gu(x,0)$, $V_0(x) = Gv(x,0)$, $Y_0(x) = \sigma_y(x,0)$, $X_0(x) = \tau_{xy}(x,0)$. Решение представляется в виде суммы произведений дифференциальных операторов и соответствующих начальных функций [1]:

$$U(x, y) = Gu(x, y) = L_{UU}U_0(x) + L_{UV}V_0(x) + L_{UY}Y_0(x) + L_{UX}X_0(x),$$

$$V(x, y) = Gv(x, y) = L_{VU}U_0(x) + L_{VV}V_0(x) + L_{VY}Y_0(x) + L_{VX}X_0(x),$$

$$Y(x, y) = \sigma_y(x, y) = L_{YU}U_0(x) + L_{YV}V_0(x) + L_{YY}Y_0(x) + L_{YX}X_0(x),$$

$$X(x, y) = \tau_{xy}(x, y) = L_{XU}U_0(x) + L_{XV}V_0(x) + L_{XY}Y_0(x) + L_{XX}X_0(x),$$

$$\sigma_x(x, y) = A_U U_0(x) + A_V V_0(x) + A_Y Y_0(x) + A_X X_0(x).$$

Дифференциальные операторы могут быть представлены либо в виде бесконечных операционных рядов, либо в виде символических формул (для плоско-деформируемого состояния) [1]:

$$\frac{1-\nu}{\pi G} \int_{-a}^a p(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi = f(x_1) + h - z_0,$$

$$L_{UV} = -\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \sin(\alpha y) - \frac{\alpha y}{2(1-\nu)} \cos(\alpha y),$$

$$L_{UY} = -\frac{y}{4(1-\nu)} \sin(\alpha y),$$

$$L_{UX} = \frac{1}{\alpha} \sin(\alpha y) - \frac{\sin(\alpha y)}{4\alpha(1-\nu)} - \frac{\alpha y \cos(\alpha y)}{4\alpha(1-\nu)},$$

$$L_{VU} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \sin(\alpha y) - \frac{\alpha y}{2(1-\nu)} \cos(\alpha y),$$

$$L_{VV} = \frac{\alpha y}{2(1-\nu)} \sin(\alpha y) + \cos(\alpha y),$$

$$L_{VY} = \frac{(3-4\nu) \sin(\alpha y)}{4(1-\nu)\alpha} - \frac{y}{4(1-\nu)} \cos(\alpha y),$$

$$L_{VX} = L_{UY},$$

$$L_{YU} = \frac{\alpha^2 y}{1-\nu} \sin(\alpha y),$$

$$L_{YV} = \frac{\alpha}{1-\nu} (\sin(\alpha y) - \alpha y \cos(\alpha y)),$$

$$L_{YY} = L_{VV}, L_{YX} = L_{UV},$$

$$L_{XU} = -\frac{\alpha}{1-\nu} (\sin(\alpha y) + \alpha y \cos(\alpha y)),$$

$$L_{XV} = L_{YU}, L_{XY} = L_{VU}, L_{XX} = L_{UU},$$

$$A_U = \frac{2\alpha}{1-\nu} \cos(\alpha y) - \frac{y\alpha^2}{1-\nu} \sin(\alpha y),$$

$$A_V = -\frac{\alpha}{1-\nu} (\sin(\alpha y) + \alpha y \cos(\alpha y)),$$

$$A_Y = \frac{\nu}{1-\nu} \cos(\alpha y) - \frac{y\alpha}{2(1-\nu)} \sin(\alpha y),$$

$$A_X = \frac{y\alpha}{2(1-\nu)} \cos(\alpha y) + \frac{3-2\nu}{2(1-\nu)} \sin(\alpha y),$$

где $\alpha = \frac{\partial}{\partial x}$; $f_0(x) \cos(\alpha y)$ и $f_0(x) \sin(\alpha y)$ – гармонические функции.

В данной работе производится замена дифференциальных операторов гармоническими решениями. Это позволяет получить точное решение задачи о штампе.

ЗАМЕНА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ ГАРМОНИЧЕСКИМИ РЕШЕНИЯМИ

Рассмотрим гармоническую функцию следующего вида:

$$f(x, y) = f_0(x) \cos(y\alpha). \quad (1)$$

Известно, что если гармоническая функция задана на области: $-\infty < x < \infty, 0 \leq y < \infty$; а также задано граничное условие: $f(x, y) = f_0(x)$ при $y = 0$ (первая краевая задача); то решением будет следующее выражение [2]:

$$Y(x_1, 0) = Y_0(x_1) = \frac{1}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_0(\xi)}{(x_1 - \xi)^2} d\xi. \quad (2)$$

Сопряженной к (1) является следующая функция [3]:

$$f(x, y) = f_0(x) \sin(y\alpha). \quad (3)$$

Ее решением является следующее выражение [4, 5]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x - \xi) f_0(\xi)}{(x - \xi)^2 + y^2} d\xi. \quad (4)$$

Учитывая решения (2) и (4) дифференциальные операторы примут следующий вид [6]:

$$L_{UU} f_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi - \frac{y}{2(1-\nu)} \times$$

$$\times \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x - \xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{UV} f_0(x) = \frac{2\nu - 1}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x - \xi}{R^2} f_0(\xi) d\xi +$$

$$+ \frac{y}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2y(x - \xi)}{R^4} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{UY} f_0(x) = -\frac{y}{4(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x - \xi}{R^2} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{UX} f_0(x) = \frac{3 - 4\nu}{4(1-\nu)} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln(R^2) f_0(\xi) d\xi +$$

$$+ \frac{y}{4(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{VU} f_0(x) = \frac{1 - 2\nu}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x - \xi}{R^2} f_0(\xi) d\xi +$$

$$+ \frac{y}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2y(x - \xi)}{R^4} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{VV} f_0(x) = \frac{y}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x - \xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi +$$

$$+ \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{VY} f_0(x) = \frac{3 - 4\nu}{4(1-\nu)} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln(R^2) f_0(\xi) d\xi -$$

$$- \frac{y}{4(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{VX} = L_{UY},$$

$$L_{YU} f_0(x) = \frac{y}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2(x - \xi)^3 - 6y^2(x - \xi)}{R^6} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{YV} f_0(x) = -\frac{1}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x - \xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi +$$

$$+ \frac{y}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{6y(x - \xi)^2 - 2y^3}{R^6} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{YY} = L_{VV}, L_{YX} = L_{UV},$$

$$L_{XU} f_0(x) = -\frac{1}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x-\xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi -$$

$$-\frac{y}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{6y(x-\xi)^2 - 2y^3}{R^6} f_0(\xi) d\xi$$

$$L_{XV} = L_{YU}, L_{XY} = L_{VU}, L_{XX} = L_{UU},$$

$$A_U f_0(x) = -\frac{2}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2y(x-\xi)}{R^4} f_0(\xi) d\xi -$$

$$-\frac{y}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2(x-\xi)^3 - 6y^2(x-\xi)}{R^6} f_0(\xi) d\xi,$$

$$A_V f_0(x) = -\frac{1}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x-\xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi -$$

$$-\frac{y}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{6y(x-\xi)^2 - 2y^3}{R^6} f_0(\xi) d\xi,$$

$$A_Y f_0(x) = \frac{\nu}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi -$$

$$-\frac{y}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x-\xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi,$$

$$A_X f_0(x) = -\frac{y}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2y(x-\xi)}{R^4} f_0(\xi) d\xi +$$

$$+\frac{3-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-\xi}{R^2} f_0(\xi) d\xi,$$

где $R^2 = (x - \xi)^2 + y^2$.

Полученные соотношения удовлетворяют уравнениям теории упругости.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ШТАМПЕ НА УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ

Пусть в однородную изотропную линейно упругую полуплоскость $x_3 \geq 0$ вертикально без трения вдавлируется плоский симметричный недеформируемый штамп (рис. 1) [7].

Ось $0x_3$ совместим с осью симметрии штампа, а начало системы координат $0x_1x_3$ расположим на границе полуплоскости. Нижний торец штампа ограничен «подшовой» – гладкой невогнутой поверхностью, уравнение которой в связанной со штампом системе координат 0_1x_1z (0_1z совпадает с $0x_3$, z_0 – расстояние между 0_1 и лобовой точкой M – вершиной подошвы) имеет вид [7]:

$$z = f(x_1). \tag{5}$$

Здесь $f(x_1)$ – четная функция, $f(0) = z_0$ и $f''(x_1) \leq 0$.

Обозначая глубину погружения штампа (перемещение вдоль оси $0x_3$ его лобовой точки) через h , учитывая формулу (5) и связь координат $z = x_3 + z_0 - h$ (рис. 1), получаем уравнение подошвы в системе $0x_1x_3$ [7]:

$$x_3 = f(x_1) + h - z_0. \tag{6}$$

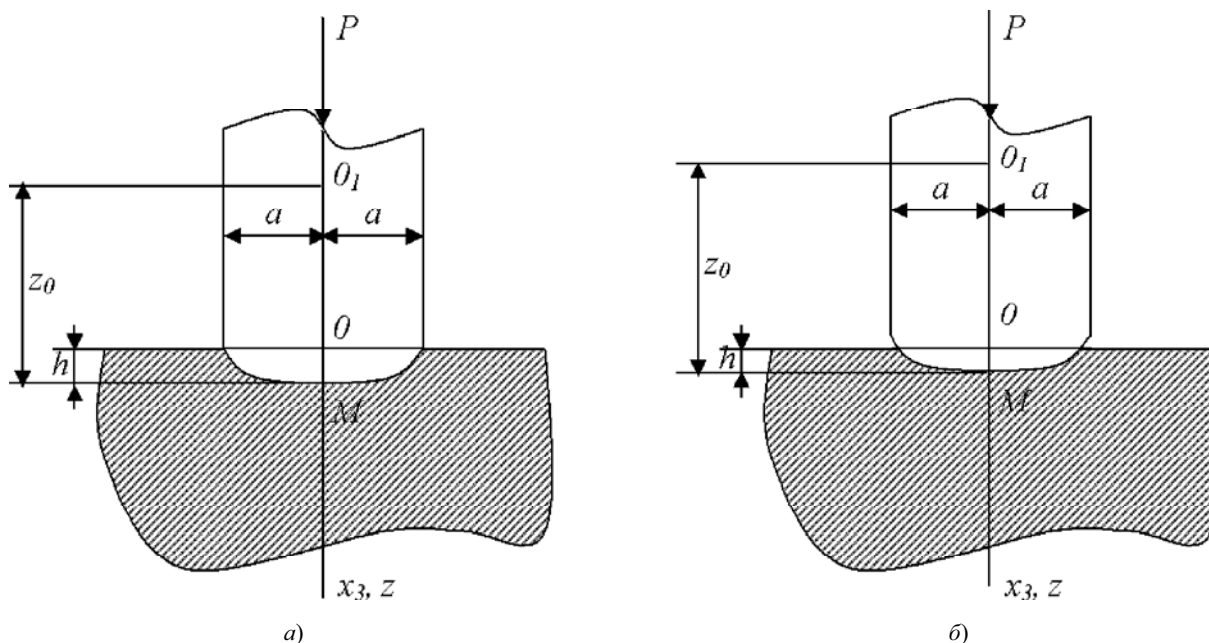


Рис. 1. Штамп на упругой полуплоскости

Правая часть равенства (6) задает нормальные перемещения границы полуплоскости в области контакта.

Будем полагать, что на штамп действует направленная вдоль оси Ox_3 сила P . На поверхности контакта касательные напряжения равны нулю (контакт происходит в условиях полного проскальзывания), а вне этой поверхности граница полуплоскости является свободной. Соответствующая краевая задача включает в себя взятые в той или иной форме уравнения, описывающие плоское деформированное состояние, условие ограниченности решения на бесконечности, а также условия на границе полуплоскости [7]:

$$u_3|_{x_3=0} = f(x_1) + h - z_0 (|x_1| \leq a), \quad (7)$$

$$\sigma_{33}|_{x_3=0} = 0 (|x_1| > a), \quad (8)$$

$$\sigma_{13}|_{x_3=0} = 0 (-\infty < x_1 < \infty). \quad (9)$$

Здесь h – неизвестная глубина погружения штампа.

В силу линейности задачи условия (7)–(9) снесены на недеформированную границу полуплоскости. Поверхность контакта заменена областью контакта – отрезком $|x_1| \leq a$. Кроме того, в (7)–(9) сделано еще одно соответствующее линейной теории приближение – не учтены касательные составляющие перемещений материальных точек. Это означает, что точки границы штампа и полупространства, находящиеся в начальный момент взаимодействия на одной вертикальной прямой, остаются на этой же прямой и в процессе контакта. Следовательно, нормальные перемещения в области контакта совпадают с правой частью уравнения (6). В зависимости от геометрии задачи радиус области контакта a либо задан (рис. 1, а), либо неизвестен (рис. 1, б) [7].

Замыкает задачу условие равновесия штампа [7]:

$$\int_{-a}^a p(\xi) d\xi = P, \quad (10)$$

$$p(x_1) = -\sigma_{33}(x_1, 0), \quad (11)$$

где p – контактное давление.

Перепишем все условия задачи в более удобной форме:

$$V(x_1, 0) = V_0(x_1) = -G(f(x_1) + h - z_0), |x_1| \leq a; \quad (12)$$

$$X(x_1, 0) = X_0(x_1) = 0; \quad (13)$$

$$Y(x_1, 0) = Y_0(x_1) = -p(x_1), |x_1| \leq a; \quad (14)$$

$$Y(x_1, 0) = Y_0(x_1) = 0, |x_1| > a;$$

$$\int_{-a}^a p(x_1) dx_1 = - \int_{-a}^a Y_0(x_1) dx_1 = P. \quad (15)$$

Начальные функции с учетом интегральных операторов примут следующий вид:

$$U(x_1, 0) = U_0(x_1) = -\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi,$$

$$V(x_1, 0) = V_0(x_1) = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi + \frac{3-4\nu}{4(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln|x_1 - \xi| Y_0(\xi) d\xi, \quad (16)$$

$$Y(x_1, 0) = Y_0(x_1) = \frac{1}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_0(\xi)}{(x_1 - \xi)^2} d\xi,$$

$$X(x_1, 0) = X_0(x_1) = \frac{1}{1-\nu} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{(x_1 - \xi)^2} d\xi + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Y_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi. \quad (17)$$

Подставим выражение (17) в условие (13):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{(x_1 - \xi)^2} d\xi = \frac{2\nu-1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Y_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi. \quad (18)$$

Проинтегрируем обе части равенства (18) по x_1 :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi = \frac{1-2\nu}{2} \int_{-\infty}^{\infty} Y_0(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi. \quad (19)$$

Подставим выражение (16) в условие (12):

$$\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi + \frac{3-4\nu}{4(1-\nu)} \times$$

$$\times \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln|x_1 - \xi| Y_0(\xi) d\xi = -G(f(x_1) + h - z_0), |x_1| \leq a. \quad (20)$$

Подставим равенство (19) в выражение (20):

$$-\frac{1-\nu}{\pi G} \int_{-\infty}^{\infty} Y_0(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi = f(x_1) + h - z_0,$$

$$-\frac{1-\nu}{\pi G} \int_{-a}^a Y_0(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi = f(x_1) + h - z_0. \quad (21)$$

Подставим равенство (14) в выражение (21):

$$\frac{1-\nu}{\pi G} \int_{-a}^a p(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi = f(x_1) + h - z_0. \quad (22)$$

Выражение (22) в классическом решении получено путем сведения задачи к интегральному уравнению относительно контактного давления и решении задачи о сосредоточенной нагрузке на границе полуплоскости. Дальнейший алгоритм решения является классическим [7].

Дифференцируя уравнение (22) по x_1 , приходим к уравнению Прандтля. Решение этого уравнения [7]:

$$p(x_1) = \frac{1}{\pi \sqrt{a^2 - x_1^2}} \left(P + \frac{\mu}{1-\nu} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{a^2 - \xi^2}}{x_1 - \xi} f'(\xi) d\xi \right). \quad (23)$$

Если радиус области контакта a известен (рис. 1, а), то давление (23) и есть решение задачи. Если радиус области контакта a неизвестен (рис. 1, б), то для его определения используют условие ограниченности контактного давления (нормального напряжения на границе полуплоскости) [7].

Поскольку $f(0) = z_0$, то из интегрального уравнения (22) с учетом четности контактного давления, а также равенства (15) получаем следующую формулу для глубины погружения штампа [7]:

$$h = \frac{1-\nu}{\pi \mu} \left(CP + 2 \int_0^a p(\xi) \ln(\xi) d\xi \right). \quad (24)$$

Равенства (23) и (24) являются решением данной задачи при различных формах подошвы штампа (5).

ВЫВОДЫ

Замена дифференциальных операторов гармоническими решениями позволяет получать точное решение задачи теории упругости. Эффективность метода показана на примере решения задачи о штампе на упругой полуплоскости. Заменяв дифференциальные операторы точными решениями гармонического уравнения для полуплоскости, мы получили тот же промежуточный результат, что и в классическом решении. Но, в отличие от классического решения, не пришлось использовать функцию влияния и решение задачи о сосредоточенной нагрузке на границе полуплоскости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов, В. З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – М. : Физматгиз, 1960. – 491 с.
2. Полянин, А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / А. Д. Полянин. – М. : Физматлит, 2001. – 576 с.
3. Зельдович, Я. Б. Элементы прикладной математики / Я. Б. Зельдович, А. Д. Мышкис. – М. : Наука, 1967. – 648 с.
4. Толлок, В. А. Операторно-символьные ряды Власова В. З. в решении задач теории упругости в системе Maple / В. А. Толлок, В. В. Шапар // Гідроакустичний журнал. – 2006. – № 3. – С. 66–74.
5. Овский, А. Г. Использование системы Maple при реализации метода начальных функций Власова / Е. Е. Галан, А. Г. Овский, В. А. Толлок // Вісник Запорізького національного університету: Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. – 2008. – № 1. – С. 16–26.
6. Овский, А. Г. Моделирование схемы решения трехмерной задачи теории упругости в системе Maple / А. Г. Овский, В. О. Толлок // Гідроакустичний журнал. – 2008. – № 3. – С. 88–97.
7. Горшков, А. Г. Теория упругости и пластичности / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, Д. В. Тарлаковский. – М. : Физматлит, 2002. – 416 с.

Стаття надійшла до редакції 24.12.2010.

Після доробки 09.03.2011.

Сабо І. І., Толлок В. О.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ПРО ШТАМП У ДВО-ВИМІРНІЙ ПОСТАНОВЦІ

У даній роботі будується розв'язок двовимірної задачі теорії пружності (плоска деформація) про дію штампа на пружну півплощину за допомогою символічного методу Власова В. З. [1] і точного розв'язку гармонічного рівняння для півплощини. Заміна символічних функцій відповідними гармонічними функціями дозволяє отримати точний розв'язок розглянутої задачі.

Ключові слова: символічний метод, штамп, півплощина, гармонічне рівняння, символічна функція, гармонічна функція, точний розв'язок.

Sabo I. I., Tolok V. O.

MODELLING THE STAMP PROBLEM IN TWO-DIMENSIONAL FORMULATION

In this paper we construct a solution of the two-dimensional elasticity problem (plane deformation) about stamp action on an elastic half-plane by using the symbolic method of Vlasov V. Z. [1] and the exact solution of the harmonic equation for the half-plane. The substitution of symbolic functions to appropriate harmonic functions allows us to get the exact solution of this problem.

Key words: symbolic method, stamp, half-plane, harmonic equation, symbolic function, harmonic function, exact solution.

ОПЕРАЦИОННАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТНО-РЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ

Статья посвящена разработке общих принципов формирования операционной спецификации объектно-реляционной модели данных. Формально определены основные операции, определен базис операционной спецификации объектно-реляционной модели данных. Предлагается использовать аппарат реляционной алгебры с рекурсивной составляющей для выполнения операций над отношениями, которые содержат вложенные неатомарные атрибуты.

Ключевые слова: объектно-реляционная модель данных, вложенные атрибуты, рекурсивная реляционная алгебра, операционная спецификация.

ВВЕДЕНИЕ

Модели данных являются ключевыми компонентами архитектуры современных систем управления базами данных (СУБД) и служат основой разработки общей методологии проектирования информационных систем.

Объективные обстоятельства, такие как: различные способы формального описания объектов в математике; разнообразие структур данных и средств манипулирования данными, развитых в языках программирования; разнообразие предметных областей, отображаемых в базах данных, способствовали неограниченному росту числа моделей данных и поддерживающих их СУБД. В 1977 году А. Макионучи предложил упростить требования, которые выдвигались к первой нормальной форме реляционной модели данных. В дальнейшем такие ученые как Л. Колби, М. Левен, Х. Ли, С. Абитебол, Н. Бидоит, и др. развивали данное направление и предложили ряд моделей данных, которые основывались на этом упрощении.

Подход на основе слабо нормализованных отношений использовался для решения таких задач как обработка текста, проектирование автоматизированных систем документооборота, обработку составных пользовательских типов данных и многих других.

Преимущества такой нормализации отношения позволяет преодолеть ряд ограничений, которые присутствуют в первой нормальной форме. Использование ННФ позволяет представить данные об объекте в одном отношении, а не распределять по нескольким. Одним из главных преимуществ данного подхода является минимальное использование операции соединения отношений, на которую приходится большие временные затраты при выполнении запросов.

Модель базы данных, основанная на принципах ННФ, или объектно-реляционная модель данных [1, 5] позволяет отношению хранить атрибуты, которые содержат неатомарные значения, таким образом, такие атрибуты сами являются отношениями (подсхемами).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статья посвящена разработке общих принципов формирования операционной спецификации объектно-реляционной модели данных. Предлагается использовать аппарат реляционной алгебры с рекурсивной составляющей для выполнения операций над отношениями, которые содержат вложенные неатомарные атрибуты.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕКТНО-РЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Модели ННФ были разработаны и разделены на две категории. Модели первой категории назывались нерекурсивными моделями [1, 3, 4], а модели второй категории – рекурсивными моделями [1, 2]. Основным отличием является рекурсивный и нерекурсивный характер операторов модели. Рекурсивные операторы могут неоднократно применяться к вложенным отношениям (подсхемам) на его различных уровнях. Нерекурсивные операторы не обладают такими свойствами. Модели, которые поддерживают вложенность или рекурсию имеют ряд преимуществ по сравнению с нерекурсивными, так как являются универсальными для реляционной модели и объектно-реляционной модели. Этот вывод основан на следующих утверждениях:

– для модели, которая содержит вложенные отношения, основным принципом является сокращение числа обрабатываемых кортежей при выполнении операций;

– традиционные методы оптимизации запросов могут использоваться в операциях рекурсивной алгебры. Кроме того, такие методы могут применяться к запросам, которые выражены с помощью рекурсивной алгебры с рекурсивными операциями на любом уровне вложенности;

– в операциях нерекурсивной алгебры действия производятся только на всем кортеже. Рекурсивная алгебра решает прямые манипуляции с кортежем, как на верхнем уровне, так и на нижнем уровне вложенных отношений [2].

Для определения операций объектно-реляционной модели данных используем аппарат рекурсивной реляционной алгебры.

Применение операций рекурсивной реляционной алгебры не ограничено количеством уровней вложенности отношений. Такие операции как объединение, разность, пересечение, проекция, селекция, декартово произведение, θ -соединение формально определены и используют рекурсивное определение вложенных отношений. Для каждой рекурсивной операции базовым является определение аналогичной нерекурсивной. Рекурсивное определение может быть переведено в одно нерекурсивное, где отношения не содержат других вложенных атрибутов. Рекурсивные операции для вложенных отношений так же формально определены.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ РЕКУРСИВНОЙ РЕЛЯЦИОННОЙ АЛГЕБРЫ

Для рекурсивных вложенных операций объединения, разности и пересечения необходимо наличие двух вложенных (в общем случае) отношений r и q со схемами отношений R и Q соответственно. Необходимым условием для выполнения операций является так же идентичность схем отношений:

$$R = Q; R = \{S(R), R_1, R_2, \dots, R_n\}, \quad (1)$$

где $S(R)$ – множество ключей вложенных атрибутов и все атомарные атрибуты R и Q (одинаковые для двух отношений); $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ – неключевые вложенные атрибуты R и Q .

$\text{Attr}(R)$ – множество всех атрибутов (атомарных и вложенных) двух схем отношений R и Q , t_r и t_q – кортежи отношений r и q соответственно в итоговом отношении.

Каждое определение для рекурсивных операций реляционной алгебры состоит из двух частей: для плоских отношений и вложенных. При этом, нерекурсивная опе-

рация является частным случаем рекурсивной. Выполнения операций рекурсивной реляционной алгебры рассматриваются на примерах схем отношений с вложенными атрибутами (рис. 1).

Рекурсивная операция объединения ($\dot{\cup}$)

Определение операции объединения двух отношений r и q , $r \dot{\cup} q$ является комплексным – состоит из двух определений:

- 1) нерекурсивная операция объединения для плоских отношений $r \cup q$;
- 2) рекурсивная операция объединения для вложенных отношений $r \dot{\cup} q$:

$$r \dot{\cup} q = \{t | ((\exists t \in r) \wedge (\forall t_q \in q)(t[S(R)] \neq t_q[S(R)])) \wedge ((\exists t \in r) \wedge (\forall t_r \in q)(t[S(R)] \neq t_r[S(R)])) \wedge ((\exists t_r \in r)(\exists t_q \in q)(t[S(R)] = t_r[S(R)] = t_q[S(R)])) \wedge (t[R_1] = t_r[R_1] \dot{\cup} t_q[R_1] \wedge \dots \wedge (t[R_n] = t_r[R_n] \dot{\cup} t_q[R_n])))\}. \quad (2)$$

Пример 1. Объединение отношений R и Q .

$T_1 = R \dot{\cup} Q$. Результирующее отношение T_1 имеет вид (рис. 2).

A	B		
	C	D	
		M	N
01	a1	1	F
		2	G
02	a2	4	F
		2	G
		1	H
03	a3	1	H
	a4	2	H
04	a5	3	K
		4	H
	a6	1	T
		2	P

Рис. 2. Результат операции объединения вложенных отношений

A	B		
	C	D	
		M	N
01	a1	1	F
		2	G
02	a2	4	F
		1	H
03	a3	1	H
	a4	2	H

а) Отношение R

Z	K		
	L	K	
		X	Y
01	a1	1	F
		2	G
02	a2	4	F
		2	G
04	a5	3	K
		4	H
	a6	1	T
		2	P

б) Отношение Q

F	K	
	P	O
		abc
def	n	5
	m	
ert	y	1
	x	5

в) Отношение D

Рис. 1. Схемы отношений R, Q, D

В общем случае, результатом двух операций селекции является операция пересечение двух селекций:

$$\bar{\delta}_c(r L_\delta) = \bar{\delta}_{c_{a1}, \dots, c_{ak}, c_{n1}, \dots, c_{nm}}(r L_\delta) = \bar{\delta}_{c_{a1}, \dots, c_{ak}}(r) \bar{\delta}_{c_{n1}, \dots, c_{nm}}(r L_\delta). \quad (7)$$

Пример 5. На рис. 6 представлен результат выполнения операции селекции $T_5 = \bar{\sigma}_{(A=02 \text{ AND } B(D(M))<3)}(R)$.

Для отношений с вложенными атрибутами определена операция декартового произведения.

Пусть r и q два вложенных (в общем случае) отношения со схемами R и Q соответственно. Пусть $\text{Attr}(R)$ – все атрибуты (вложенные и атомарные) R , а $\text{Attr}(Q)$ – все атрибуты Q , а L – путь соединения в R . Определим, также, что R_i – вложенные атрибуты R , L_i – путь R_i , t_r – кортеж в отношении r , t_q – кортеж отношения q , t – кортеж результирующего отношения, тогда:

$$\begin{aligned} (rL \bar{\times} q) &= (r(R_i L_i) \bar{\times} q) \equiv (q \bar{\times} r(R_i L_i)) = \\ &= \{t \mid (\exists t_r \in r)((t[\text{Attr}(R)] - \{R_i\}) \wedge t[R_i]_i) = \\ &= (t_r[R_i] L_i \bar{\times} q)\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для данной операции выполняется свойство коммутативности. Следовательно, верно равенство:

$$(r(R_i L_i) \bar{\times} q) \equiv (q \bar{\times} r(R_i L_i)). \quad (9)$$

Особенностью данной операции декартового произведения является возможность ее выполнения на разных уровнях вложенности, в зависимости от пути атрибутов L . Для двух вложенных отношений операция $\bar{\theta}$ -соединения базируется на операторах сравнения, где $\theta = \{>, <, =, \leq, \geq, \neq\}$.

Частным случаем является операция естественного соединения, где в качестве оператора сравнения используется равенство ($=$).

Операция $\bar{\theta}$ -соединения выполняется путем применения операции селекции к результатам операции декартового произведения двух отношений. Операция сводится к сравнению двух атрибутов в результирующем отношении. Два атрибута должны иметь одинаковый уровень вложенности в итоговом отношении.

Пусть r и q два вложенных (в общем случае) отношения со схемами R и Q соответственно. Пусть X и Y – два атомарных атрибута, которые принадлежат отношениям R и Q соответственно, $\bar{\theta}$ – условие, которое должно выполняться. Без потери общности, $L_{\delta Y' \rightarrow Y}$ – путь селекции Y , который начинается с Y' , который, в свою очередь, принадлежит такому же уровню вложенности как и X .

A	B		
	C	D	
		M	N
02	a2	1	H

Рис. 6. Операция селекции для вложенных отношений

Тогда, рекурсивное вложенное соединение двух отношений r и q можно определить как:

$$r \bar{\theta} q = \bar{\delta}((r \times q)_{X \theta Y} L_{\delta Y' \rightarrow Y}). \quad (10)$$

Пример 6. Операция естественного соединения для отношений R и D представлена в виде $T_8 = R(B, (C, (D))) [M \equiv O] D(F, (K))$, при этом, на первом этапе, выполняется операция декартового произведения $R(B, (C, D)) \bar{\times} D(F, (K))$, затем – операция селекции, согласно условию. В результате отношение T_8 имеет вид (рис. 7).

Пример иллюстрирует, что если список селекции пуст, то итоговое отношение так же не содержит значений атрибутов на всех уровнях вложенности. Таким образом, в отношении T_8 исключен атрибут $A = \{02\}$, т. к. в данном кортеже не найдено подстроки, удовлетворяющей условию $R(\dots) [M \equiv O] D(\dots)$. Таким образом, очевидно, что результат операции $\bar{\theta}$ -соединения зависит от списка селекции, и соответственно, от результата выполнения промежуточной операции декартового произведения.

ВЫВОДЫ

В качестве математического аппарата для описания операционной спецификации объектно-реляционной модели данных предлагается использовать рекурсивную реляционную алгебру. В статье исследованы и усовершенствованы основные операции, с помощью которых может обеспечиваться выполнение действий над вложен-

A	B(C, D, K, F)					F
	C	D		K		
		M	N	P	O	
01	a1	1	F	a	1	abc
		2	G	a	2	
		1	F	a	2	
		2	G	a	1	
02	a2	4	F	n	5	def
		1	H	m	5	
		4	F	n	5	
		1	H	m	5	
03	a3	1	H	y	1	ert
		1	H	x	5	
	a4	2	H	y	1	ert
		2	H	x	5	

а) $R(B, (C, D)) \bar{\times} D(F, (K))$

A	B(C, D, K, F)					F
	C	D		K		
		M	N	P	O	
01	a1	1	F	a	1	abc
03	a3	1	H	y	1	ert

б) $T_8 = R(B, (C, (D))) [M \equiv O] D(F, (K))$

Рис. 7. Отношение T_8 – результат операции $\bar{\theta}$ -соединения

ными отношениями. Предложена общая интерпретация операции декартового произведения, и соответственно, производных операций. Существует ряд СУБД, в которых реализован объектно-реляционный подход, но такая реализация не содержит комплексной поддержки всех компонент объектно-реляционной модели, в том числе и операционной спецификации. В данной работе операционная спецификация объектно-реляционной модели представлена в общем виде, сохраняя общность с реляционной моделью данных, и не ассоциирована с конкретной реализацией в СУБД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Makinouchi, A.* A consideration on Normal Form of Not-Necessarily-Normalized Relations in the Relational Data Model [Text] // in Proc. of the 3rd International Conference on Very Large Data Bases. – Tokyo, 1977. – P. 447–453.
2. *Garani, G.* Generalized Relation Data Model [Text]: // International Journal of Computer Systems Science and Engineering (IJCSSES). – 2007. – vol. 4, N 1. –P. 43–59.
3. *Мейер, Д.* Теория реляционных баз данных [Текст] : пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – С. 45–48.
4. *Тиори, Т.* Проектирование структур баз данных: в 2-х кн. [Текст] / Т. Тиори, Дж. Фрай. – М. : Мир, 1985. – Кн. 1. – С. 287 : Кн. 2 – С. 320.
5. *Чапланова, Е. Б.* Об одном подходе к построению объектно-реляционной модели данных [Текст] / Н. В. Касаткина, С. С. Тянянский, Е. Б. Чапланова // Збірник наукових праць

Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2009. – Вип. 20. – С. 141–146.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2012.

Чапланова О. Б.

ОПЕРАЦІЙНА СПЕЦИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТНО-РЕЛЯЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДАНИХ

Стаття присвячена розробці загальних принципів формування операційної специфікації об'єктно-реляційної моделі даних. Формально визначено основні операції, визначено базис операційної специфікації об'єктно-реляційної моделі даних. Пропонується використовувати апарат реляційної алгебри з рекурсивної складової для виконання операцій над відносинами, які містять вкладені неатомарні атрибути.

Ключові слова: об'єктно-реляційна модель даних, вкладені атрибути, рекурсивна реляційна алгебра, операційна специфікація.

Chaplanova E.

OPERATING SPECIFICATIONS OF THE OBJECT-RELATIONAL DATA MODEL

The article proposed the development of general principles of formation of the operating specifications of object-relational data model. Formally defined the basic operations, and defined basis of the operating specifications of object-relational data model. It is proposed to use the apparatus of the relational algebra with a recursive component to perform operations on relations, which contain nested non-atomic attributes.

Key words: object-relational data model, nested attributes recursive relational algebra, the operating specification.

УДК 519.6

Хомченко А. Н.¹, Мотайло А. П.²

¹Д-р. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой Херсонского национального технического университета

²Старший преподаватель Херсонского национального технического университета

ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛОГ ИНТЕГРАЛА ПУАССОНА ДЛЯ ШАРА

В работе решена задача Дирихле для шара с дискретно заданными условиями на границе. В роли вычислительного шаблона использована конструкция из гексаэдра и октаэдра, вписанных в шар. Получен дискретный аналог интегральной формулы Пуассона в виде пропорциональной стратифицированной выборки.

Ключевые слова: задача Дирихле, шар, интеграл Пуассона, шаблон, гексаэдр, октаэдр.

ВВЕДЕНИЕ

В 1820 г. французский математик, механик и физик Пуассон нашел интегральное представление решения уравнения Лапласа в круге с граничными условиями Дирихле. Трехмерное обобщение интеграла Пуассона для круга называют интегралом Пуассона для шара. Эффективность практических применений интеграла Пуассона и точность вычислений существенно зависят не только от ядра Пуассона, но и от характера заданных граничных условий. Недостатки интеграла Пуассона общеизвестны. Преодолеть некоторые из них можно путем замены интеграла подходящей интегральной сум-

мой. Для шара это непросто, поскольку весовые коэффициенты должны быть непрерывными функциями координат контрольной точки внутри шара. Кроме того, они должны сохранить усредняющие свойства ядра Пуассона. Ниже рассматриваются вычислительные шаблоны, позволяющие построить дискретный аналог интеграла Пуассона для шара. В качестве весовых коэффициентов, «следящих» за внутренней контрольной точкой, используются базисные интерполяционные функции гексаэдра и октаэдра, вписанные в шар. Для октаэдра это новое применение, поскольку базис октаэдра появился совсем недавно. Предложенный дискретный аналог осу-

ществляет монте-карловское усреднение граничного потенциала, а весовыми коэффициентами являются гармонические функции.

АНАЛИЗ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЙ, ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Интегральная формула Пуассона [1, 2] для круга (шара) определяет потенциал в любой внутренней точке области в форме взвешенного среднего граничного потенциала. Анализ формулы Пуассона показывает, что по мере приближения контрольной точки к границе области заметно возрастает погрешность вычислений. Вот почему вблизи границы потенциал приходится вычислять с помощью рядов. Можно воспользоваться адаптируемыми шаблонами МКР [3], однако этот подход связан с составлением и решением СЛАУ. Чтобы избежать громоздких процедур матричной алгебры, мы предлагаем достаточно простой (несеточный) метод усреднения граничных потенциалов в шаре. Используемые здесь адаптируемые шаблоны «следят» за координатами контрольной точки внутри шара, непрерывно изменяя весовые коэффициенты усреднения. В какой-то мере это похоже на алгоритм «блужданий по сферам». Существенное отличие в том, что здесь точка старта (контрольная точка) может быть выбрана произвольно. Такое допущение, безусловно, вызывает специфические трудности, поскольку конечно-разностный шаблон принципиально отличается от стандартного (консервативного). Он не является фрагментом ортогональной или какой-либо другой застывшей решетки. «Центральный» узел шаблона имеет прямой «канал связи» с каждым граничным узлом на поверхности шара. По этим каналам в центральный узел транслируется уже усредненная информация. Самый простой адаптируемый шаблон имеет четыре канала, проложенных из контрольной точки внутри шара в вершины вписанного тетраэдра. Наш опыт показал, что для достижения приемлемой точности нужно использовать несколько «стоп-кадров» – вписанных тетраэдров. В роли весовых коэффициентов выступают барицентрические координаты тетраэдра. В данной работе мы используем вписанные гексаэдр и октаэдр. Усреднение на 8-маршрутном шаблоне осуществляется с помощью трилинейного базиса гексаэдра [4], а на 6-маршрутном – с помощью кусочно-линейного базиса октаэдра [5]. Построенный в [6] базис центрированного октаэдра в данном случае не подходит, хотя способ построения позволяет получать базисы как центрированного, так и нецентрированного октаэдра.

Цель статьи – предложить простой и удобный способ приближенного вычисления интеграла Пуассона для шара.

ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО АНАЛОГА ИНТЕГРАЛА ПУАССОНА ДЛЯ ШАРА

На рис. 1 изображен шар ($R = 1$) с 14 расчетными узлами на поверхности. Первые 8 узлов расположены в вершинах вписанного гексаэдра, узлы с 9 по 14 – в вер-

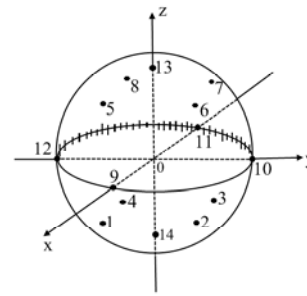


Рис. 1. Шар с расчетными граничными узлами

шинах вписанного октаэдра. Оси ортогональной системы координат $Oxyz$ проходят через противоположные вершины октаэдра и через барицентры граней гексаэдра.

Классическая формулировка задачи такова: внутри шара $x^2 + y^2 + z^2 \leq R^2$ найти функцию $u(x, y, z)$, удовлетворяющую уравнению Лапласа $\Delta u = 0$, если на границе шара σ искомая функция известна $u|_{\sigma} = f$.

Интеграл Пуассона для шара имеет вид [2]:

$$u(P_0) = \frac{1}{4\pi R} \iint_{\sigma} \frac{R^2 - r_0^2}{\left(\sqrt{R^2 + r_0^2 - 2Rr_0 \cos \gamma}\right)^3} \cdot f(Q) dS, \quad (1)$$

где r_0 – длина вектора $\overline{OP_0}$; P_0 – контрольная точка внутри шара; Q – точка на поверхности сферы σ ; γ – угол между векторами $\overline{OP_0}$ и \overline{OQ} ; $f(Q)$ – заданная функция на поверхности σ .

Физическая интерпретация задачи такова: найти температуру внутри шара, если на поверхности шара температура известна. Слово «дискретный» в названии работы отражает характер задания граничных условий на сфере. В данном случае температурное поле моделируется с помощью 14 термоэлементов (термостатов), прикрепленных к поверхности шара. Граничная информация представлена выборкой из 14 значений функции $f(Q)$. Это типичный пример стратифицированной (двухслойной) выборки. Граничная информация усредняется отдельно на каждом шаблоне. Усреднение по вершинам гексаэдра (8 граничных узлов) осуществляется по формуле:

$$\bar{U}_8(P_0) = \sum_{i=1}^8 N_i(x, y, z) \cdot f_i, \quad (2)$$

где f_i – значения функции $f(Q)$ в вершинах гексаэдра $\left(|x| \leq \frac{\sqrt{3}}{3}; |y| \leq \frac{\sqrt{3}}{3}; |z| \leq \frac{\sqrt{3}}{3}\right)$, а базис гексаэдра имеет вид:

$$N_i(x, y, z) = \frac{1}{8} (1 + \sqrt{3}x_i x) (1 + \sqrt{3}y_i y) (1 + \sqrt{3}z_i z), \quad (3)$$

$$x_i, y_i, z_i = \pm 1.$$

Функции $N_i(x, y, z)$ удовлетворяют интерполяционной гипотезе типа Лагранжа:

$$N_i(x_k, y_k, z_k) = \delta_{ik}, \sum_{i=1}^8 N_i(x, y, z) = 1, \quad (4)$$

где δ_{ik} – символ Кронекера, i – номер функции, k – номер расчетного узла на поверхности шара.

Усреднение по вершинам октаэдра (6 граничных узлов) осуществляется по формуле:

$$\bar{U}_6(P_0) = \sum_{i=9}^{14} N_i(x, y, z) \cdot f_i, \quad (5)$$

где

$$N_{9,11}(x, y, z) = \frac{1}{6}(1 + 2|x| \pm 3x - |y| - |z|),$$

$$N_{10,12}(x, y, z) = \frac{1}{6}(1 + 2|y| \pm 3y - |z| - |x|),$$

$$N_{13,14}(x, y, z) = \frac{1}{6}(1 + 2|z| \pm 3z - |x| - |y|). \quad (6)$$

Понятно, что функции (6) обладают свойствами (4). Очень важно, что оба решения (2) и (5) удовлетворяют уравнению Лапласа. Поскольку выборка стратифицирована, эти два средних значения в точке P_0 еще раз усредняются с коэффициентами $\frac{3}{7}$ и $\frac{4}{7}$:

$$\bar{U}(P_0) = \frac{3}{7} \cdot \bar{U}_8(P_0) + \frac{4}{7} \cdot \bar{U}_6(P_0). \quad (7)$$

Такая выборка называется пропорциональной стратифицированной. Формула (7) является дискретным аналогом интеграла Пуассона (1) для шара. Нетрудно заметить, что эта простая формула является статистической оценкой математического ожидания. Роль простых моделей в математическом моделировании трудно переоценить. По мнению академика В.В.Новожилова [7], простая модель свидетельствует о глубоком проникновении автора в существо явления (процесса). Даже если простая модель недостаточно точная, она служит хорошим нулевым приближением в итерационных процедурах. Очень часто усовершенствование модели достигается усреднением простых моделей. Достаточно вспомнить общеизвестные формулы приближенного интегрирования Ньютона-Котеса. Например, формула парабол получается взвешенным усреднением формулы центральных прямоугольников и формулы трапеций. А формула «трех восьмых» – результат взвешенного усреднения двух формул трапеций (для внутренних и граничных узлов). Легко убедиться, что этот упрощенный прием распространяется на двумерные и трехмерные модели.

Для проверки точности формулы (7) мы воспользовались результатами вычислений интеграла Пуассона, приведенными в работе [2]. В.И.Левин вычислил значения интеграла (1) для трех точек на вертикальном диа-

метре шара: $O(0,0,0)$, $A(0,0,-\frac{1}{2})$, $B(0,0,\frac{1}{2})$. Граничные

условия очень просты: на верхней полусфере поддерживается температура 1°C , на нижней – температура 0°C . Вычисления по формуле (7) дали следующие результаты: $\bar{U}(0) = 0,5^\circ$; $\bar{U}(A) = 0,171^\circ$; $\bar{U}(B) = 0,829^\circ$, что в точности совпадает с результатами [2]. Чем сложнее граничные условия задачи, тем отчетливее проявляются преимущества формулы (7) перед формулой (1).

Замечание. В тех точках шара, в которых формула (2) превышает результат, формула (5) его занижает, и наоборот. Погрешность в какой-то мере уменьшает арифметическое усреднение. И только взвешенное усреднение по формуле (7) практически устраняет погрешность. Это означает, что пропорциональная стратифицированная выборка эффективнее простой выборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получен дискретный аналог интеграла Пуассона для шара, использование которого приводит к точным результатам в контрольных точках вертикального диаметра внутри шара [2].

Научная новизна работы заключается в использовании нового вычислительного шаблона на основе комбинации октаэдра и гексаэдра в задаче Дирихле для шара [2], которая является первой тестовой задачей для функций кусочно-линейного базиса шестигрального октаэдра, полученного авторами в работе [8].

Практическая ценность работы состоит в том, что состояние стационарного поля в любой точке внутри шара может быть определено как взвешенное среднее узловых граничных значений, расположенных в вершинах октаэдра и гексаэдра, вписанных в шар.

Использование тел Платона в роли вычислительных шаблонов для определения температурного поля в шаре стало возможным после появления интерполяционных базисов гексаэдра и октаэдра. Нет сомнений, что с появлением базиса икосаэдра мы получим не менее эффективную вычислительную формулу на основе простой выборки из 12 граничных значений искомой функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фарлоу, С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров / С. Фарлоу. – М. : Мир, 1985. – 384 с.
2. Левин, В. И. Методы математической физики / В. И. Левин. – М. : Учпедгиз, 1956. – 243 с.
3. Хомченко, А. Н. Две модели усреднения граничных потенциалов на адаптируемом шаблоне / А. Н. Хомченко, М. Т. Наджафов, Н. В. Валько // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2004. – № 8. – С. 26–30.

4. Козуб, Н. А. От равномерного распределения случайных точек к базису трилинейной интерполяции / Н. А. Козуб, А. Н. Хомченко // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2006. – № 1(24). – С. 99–102.
5. Хомченко, А. Н. Барицентрическая задача Мебиуса и одношаговые блуждания со случайным стартом / А. Н. Хомченко, А. П. Мотайло // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2011. – № 2(41). – С. 23–26.
6. Хомченко, А. Н. Вероятностная концепция полиномиальной интерполяции в октаэдре / А. Н. Хомченко, А. П. Мотайло // Проблемы математического моделирования: междерж. науч.-метод. конф., 25–27 мая 2011 г.: тезисы доп. – Днепропетровск, 2011. – С. 20–22.
7. Новожилков, В. В. Вопросы механики сплошной среды / В. В. Новожилков. – Л.: Судостроение, 1989. – 400 с.
8. Мотайло, А. П. Базисы шестиугольного октаэдра [Электронный ресурс] / А. П. Мотайло. // Перспективные научные исследования – 2011: междунар. науч.-практич. конф., 17–25 февр. 2011 г.: тезисы докл. – София, Болгария, 2011. – Режим доступа: <http://www.rusnauka.com>.

Стаття надійшла до редакції 29.06.2011.
Після доробки 15.11.2011.

УДК 681.5.004.94

Хомченко А. Н., Мотайло А. П.
ДИСКРЕТНИЙ АНАЛОГ ІНТЕГРАЛА ПУАССОНА ДЛЯ КУЛІ

У роботі розв'язана задача Діріхле для кулі з дискретно заданими умовами на границі. У ролі обчислювального шаблону використано конструкцію із гексаедра та октаедра, вписаних в кулю. Отримано дискретний аналог інтегральної формули Пуассона у вигляді пропорційної стратифікованої вибірки.

Ключові слова: задача Діріхле, куля, інтеграл Пуассона, шаблон, гексаедр, октаедр.

Khomchenko A. N., Motailo A. P.
DISCRETE ANALOGUE OF THE POISSON INTEGRAL FOR A BALL

The Dirichlet problem for the ball with discretely given conditions on the boundary is solved in the work. Construction from hexahedron and octahedron inscribed in a ball is used in the role of computational template. A discrete analogue of the Poisson integral formula in the form of a proportional stratified sampling is obtained.

Key words: Dirichlet problem, ball, Poisson integral, pattern, hexahedron, octahedron.

Высочина О. С.¹, Данич В. Н.², Пархоменко В. П.³

¹Канд. техн. наук, доцент Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля

²Д-р эконом. наук, декан Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля

³Канд. государственного управления, доцент Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ARENA

В статье представлена имитационная модель производственного процесса промышленного предприятия по производству автомобильных клапанов. Приведено описание процесса построения модели и полученных результатов моделирования.

Ключевые слова: Arena, дискретно-событийный подход, имитационное моделирование, моделирование производственных систем.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современный этап развития экономики Украины характеризуется изменением условий хозяйственной деятельности. Для новых, рыночных условий функционирования промышленных предприятий характерны жесткая конкуренция, недостаточные инвестиции в производство, а также многочисленные факторы неопределенности внутренней и внешней среды. В сочетании со сверхнормативным износом оборудования это приводит к появлению разнообразных видов рисков, ставящих под сомнение возможность стабильной работы предприятий. Используемые на предприятиях системы управления производством позволяют осуществлять контроль состояния и распределения ресурсов, диспетчеризацию производства, управление документами, сбор и хранение данных о технологических процессах. Однако указанных возможностей недостаточно для принятия эффективных управленческих решений. В связи с этим

возникает необходимость разработки единой модели производства, позволяющей осуществлять комплексный анализ и прогноз развития предприятия, позволяя при этом оценить возможные риски реализации тех или иных проектов, а также их взаимное влияние. Разработка единой аналитической модели производства на современном этапе развития науки остается неразрешимой задачей, что в совокупности со стремительным прогрессом информационных технологий создает предпосылки к широкому применению средств имитационного моделирования в решении управленческих задач. Поэтому разработка эффективной и гибкой имитационной модели производственных процессов промышленного предприятия является чрезвычайно **актуальной задачей**.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Имитационное моделирование является средством решения задач анализа, планирования и реконструкции произ-

водственных и логистических систем. В настоящее время существует три базовых подхода к созданию имитационных моделей, отображающих процессы в системах такого типа: агентный подход, непрерывный подход в форме системной динамики по Форрестеру и дискретно-событийный подход.

Агентный подход используется для исследования децентрализованных систем, когда глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы. Цель агентных моделей – получение представлений о глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе [1]. Системно-динамический подход представляет собой мощный инструмент для исследования динамических процессов, направленный на изучение сложных систем и позволяющий выявить причинно-следственные связи между объектами и явлениями [2]. Дискретно-событийный подход предполагает абстрагирование от природы событий и рассматривает только основные события моделируемой системы, такие как: «ожидание», «обработка заказа», «движение с грузом», «разгрузка» и другие. В отличие от системно-динамического подхода для управления системным временем используется принцип особых состояний, когда текущее начальное состояние изменяется на величину, определяемую значением ближайшего момента наступления события, что является удобным при описании технологических процессов, когда возникает необходимость отображения в модели таких событий, как «поломка станка», «окончание обработки детали» и т. д. [3]. В работе [4] проведен сравнительный анализ систем имитационного моделирования и сделан вывод о том, что для моделирования производственных процессов на предприятии одним из наиболее эффективных является использование системы имитационного моделирования Agena в рамках дискретно-событийного подхода.

Целью статьи является разработка имитационной модели производственных процессов Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов, которая позволит рассчитывать основные экономические показатели работы предприятия и оценивать мероприятия, направленные на повышение эффективности его функционирования.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс работы Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов можно представить как множество определенным образом организованных материальных, финансовых и информационных потоков. Концептуальная модель представлена на рис. 1, где ⇨ – материальный поток, --- – информационный поток, → – финансовый поток.

Для разработки имитационной модели производственных процессов на предприятии рассматривалось движение материальных потоков. Под материальными потоками понимались как сырье и материалы, так и полуфабрикаты, и готовые изделия, в процессе приложения к ним различных логистических операций и отнесенные к определенному временному интервалу. Под логистическими операциями понимались «отгрузка», «транспортировка», «разгрузка», «комплектация», «складирование», «упаковка», а также другие вспомогательные операции. Движение материальных потоков зависит от содержания информационных потоков, так как в основе процесса управления материальными потоками лежит обработка информации. Информационный поток – совокупность сообщений, циркулирующих как внутри предприятия, так и между предприятием и внешней средой. На базе этих сообщений организуется управление производственными и логистическими процессами на предприятии. Совокупность движения денежных средств во времени, сгруппированных по какому-либо признаку и представленных в виде функции времени, представлена в качестве финансового потока. Материальные потоки на своем пути проходят несколько этапов преобразования. В ходе логистического процесса сырье поступает на предприятие от поставщиков, затем на производственных участках организуется его рациональное использование, на последнем этапе готовая продукция (автомобильные клапана) поставляется потребителям в соответствии с принятыми от них заказами.

Для генерации поступления сырья при построении имитационной модели производственных процессов Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов в системе имитационного моделирования Agena использовался блок ‘CREATE’. Интервал времени

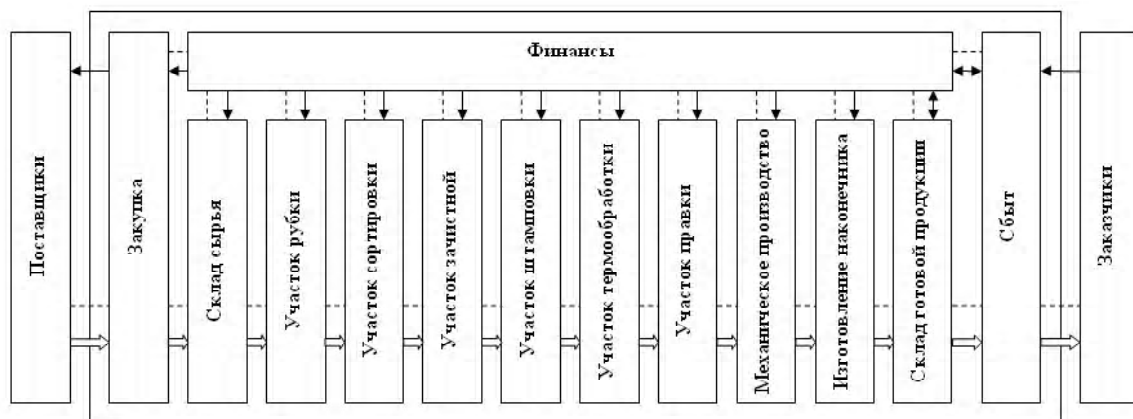


Рис. 1. Концептуальная модель предприятия по производству автомобильных клапанов

між появою вимог складало 0,169 годин, що відповідає реальному інтенсивності надходження деталі з клапанної сталі на даний ділянку підприємства. Блок 'ASSIGN' використовувався для встановлення часу обробки деталі на верстаті. Для кращої візуалізації моделі даний блок представлено для кожного верстата, які оголошені в елементі 'ATTRIBUTES'. Блок 'QUEUE' використовувався для утримання вимог до тих пір, поки верстат не стане доступним. В елементі 'QUEUES' задавалися характеристики черг. При використанні блоку 'SEIZE' за деталлю закріплювався певний ресурс. Блоки 'CREATE', 'ASSIGN', 'QUEUE' і 'SEIZE' представлені на рис. 2.

Для імітації ймовірних і детермінованих рішень використовувався блок 'BRANCH' (см. рис. 3).

Елемент 'RESOURCES' містить всю інформацію, необхідну для повного встановлення ролі пристрою обслуговування (верстата) в моделі. Для імітації обробки кожної деталі на верстаті використовувався блок 'DELAY'. При використанні блоку 'RELEASE' деталь звільняє верстат.

Для зміни потужності ресурсів, а саме для складання графіку роботи верстатів, використовувався елемент 'SCHEDULES' (см. рис. 4).

Для підрахунку кількості вимог, що проходять через певні точки в моделі, разом з елементом 'COUNTERS' використовувався блок 'COUNT'. Для збору статистичних даних про окремі спостереження

в поєднанні з елементом 'TALLIES' використовувався блок 'TALLY' (см. рис. 5).

При використанні блоку 'DISPOSE' моделювався вихід вимог з системи. Елемент 'REPLICATE' використовувався для встановлення багатократних проходів з різними параметрами. Для перевірки логіки моделі використовувалися засоби анімації.

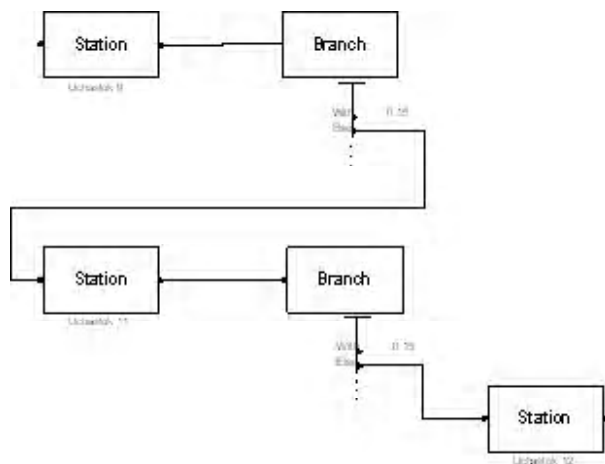


Рис. 3. Використання елемента 'BRANCH' в моделі виробництва автомобільних клапанів в системі імітаційного моделювання Arena

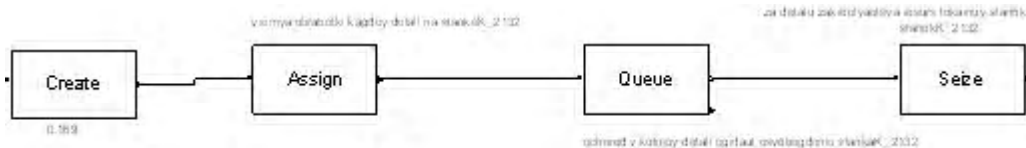


Рис. 2. Використання блоків 'CREATE', 'ASSIGN', 'QUEUE' і 'SEIZE' в моделі виробництва автомобільних клапанів в системі імітаційного моделювання Arena

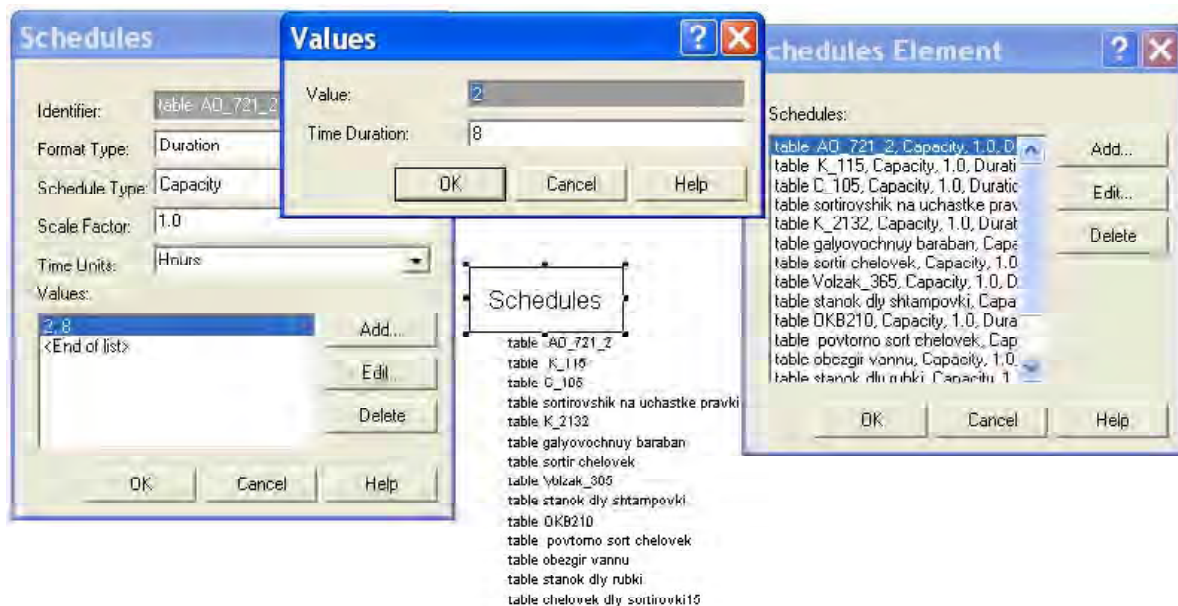


Рис. 4. Використання елемента 'SCHEDULES' в моделі виробництва автомобільних клапанів в системі імітаційного моделювання Arena

Для оценки адекватности разработанной модели проведено сравнение характеристик, полученных при помощи операционного анализа сетей систем массового обслуживания [5], с характеристиками, полученными при моделировании. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что имитационная модель производственных процессов Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов является адекватной.

По результатам имитационного моделирования выявлено, что одним из наиболее проблемных является участок штамповки. За один рабочий день в очереди на обслуживание скапливается 2136 заготовок. Стоимость преса для штамповки клапанов составляет 1800000 грн. Полная стоимость одной единицы клапана составляет 47,66 грн. Себестоимость одной единицы клапана составляет 30,50 грн. Если предприятие приобретет еще один станок, то очередь, в которой детали ожидают освобождения станка, уменьшится в 89 раз (см. рис. 6), производительность предприятия увеличится на 700 единиц в день. Срок окупаемости оборудования составит 7 с половиной месяцев (7,494295), после чего предприятие будет получать чистую прибыль в месяц на 240182,7 грн. больше, чем до покупки оборудования.

ВЫВОДЫ

В рамках дискретно-событийного подхода при помощи системы моделирования Arena разработана имитационная модель производственных процессов Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов.

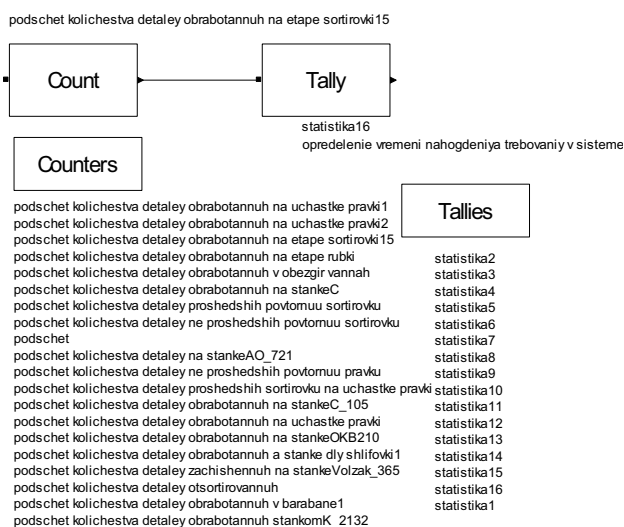


Рис. 5. Сбор статистических данных в модели производства автомобильных клапанов в системе имитационного моделирования Arena

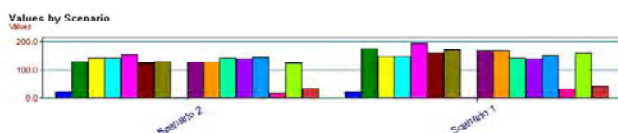


Рис. 6. Сравнительная диаграмма производительности ресурсов, полученная в результате анализа данных при помощи инструмента Process Analyzer (Scenario 1 – состояние очередей в модели до оптимизации, Scenario 2 – состояние очередей в модели после оптимизации)

панов. Рассмотрены основные экономические показатели работы предприятия, на основе анализа полученных результатов выявлено, что наиболее проблемным участком в процессе производства автомобильных клапанов является участок штамповки. Для повышения эффективности функционирования предприятия предложено купить дополнительный пресс для штамповки, тогда по результатам моделирования очередь, в которой детали ожидают освобождения станка для штамповки, уменьшится в 89 раз, производительность предприятия увеличится на 700 единиц в день, срок окупаемости оборудования составит 7 с половиной месяцев, после чего прибыль увеличится на 240182,7 грн. в месяц.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная имитационная модель является мощным научно-прикладным средством для решения задач с целью повышения эффективности работы предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данич, В. Н. Моделирование быстрых и лавинообразных процессов / В. Н. Данич. – Луганск : ВГУ, 2010. – № 3 (145). – С. 86–101.
2. Международное общество системной динамики [Электронный ресурс] = System Dynamics Society : представляет собой профессиональную ассоциацию специалистов в области системной динамики – профессоров ВУЗов, практиков-консультантов и преподавателей со всего мира. – Электрон. дан. – [199-?]. – Режим доступа: <http://www.systemdynamics.org>, свободный – Загл. с экрана. – Яз. англ.
3. Дигрис, А. В. Дискретно-событийное моделирование / А. В. Дигрис. – Минск : БГУ, 2011. – 201 с.
4. Высочина, О. С. Сравнительный анализ систем имитационного моделирования для решения задачи оптимизации производственных процессов промышленного предприятия / О. С. Высочина, В. Н. Данич., М. К. Демин // Вестник Восточноукр. национ. ун-та им. В. Даля – Луганск : ВГУ им. В. Даля, 2012. – № 8 (179), ч. 1. – С. 47–51.
5. Лоу Аверилл, М. Имитационное моделирование / Аверилл М. Лоу, В. Дэвид Кельтон С. Пб. : Питер, 2004. – 848 с.

Статья надійшла до редакції 17.02.2012.

Височина О. С., Данич В. М., Пархоменко В. П.
МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ НА
ПРОМИСЛОВОМУ ПІДПРИЄМСТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ
СИСТЕМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ARENA

У статті представлено імітаційну модель виробничого процесу промислового підприємства з виробництва автомобільних клапанів. Наведено опис процесу побудови моделі та отриманих результатів моделювання.

Ключові слова: Arena, дискретно-подієвий підхід, імітаційне моделювання, моделювання виробничих систем.

Vysochyna O. S. Danich V. N., Parkhomenko V. P.
MANUFACTURING PROCESSES MODELING OF
INDUSTRIAL ENTERPRISES BY MEANS OF ARENA
SYSTEM SIMULATION

The article presents a manufacturing processes simulation model of industrial car valves production enterprises. A description of the model building and simulation results were considered.

Key words: Arena, discrete-event approach, simulation modelling, simulation of manufacturing systems.

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 519.7:004.8

Дейнеко А. О.¹, Плісс І. П.², Бодяньський Є. В.³

¹Аспірантка Харківського національного університету радіоелектроніки
²Канд. техн. наук, провідний науковий співробітник Харківського національного університету радіоелектроніки
³Д-р техн. наук, професор Харківського національного університету радіоелектроніки

КОМБІНОВАНЕ НАВЧАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ НЕЙРО-ФАЗЗИ СИСТЕМИ

Запропоновано архітектуру еволюційної нейро-фаззи системи, що не схильна до прокльону розмірності, здатна обробляти інформацію в режимі реального часу, адаптуючи при цьому свої параметри і структуру до умов задачі. У якості активаційних функцій було використано ядерні функції.

Ключові слова: еволюційна нейро-фаззи система, нормалізована радіально-базисна нейронна мережа, узагальнена регресійна нейро-фаззи мережа, нечітка машина опорних векторів, ядерна функція активації.

ВСТУП

В цей час штучні нейронні мережі отримали широке поширення для вирішення різноманітних задач Data Mining, інтелектуального управління, прогнозування, розпізнавання образів тощо, в умовах невизначеності, нелінійності, стохастичності, хаотичності, різного роду збурень і завад, завдяки своїм універсальним апроксимуючим властивостям і можливостями навчання за даними, що характеризують функціонування явища або об'єкта, що досліджуються.

Процес навчання, як правило, ґрунтується на використанні тієї або іншої процедури оптимізації прийнятого критерію, при цьому швидкість збіжності такої процедури може бути досить низькою, особливо при навчанні багат шарових мереж, що створює істотні проблеми в ситуаціях, коли навчальна вибірка задана не пакетом, а у вигляді послідовності спостережень, що надходять у on-line режимі.

Прискорити цей процес можливо в нейронних мережах, чий вихідний сигнал лінійно залежить від синаптичних ваг, наприклад, радіально-базисних (RBFN) [1, 2] і нормалізованих радіально-базисних (NRBFN) [3, 4] нейронних мереж, однак, їх використання часто ускладнюється, так званим, прокльоном розмірності. І справа тут зовсім не у виникаючих обчислювальних складно-

щах, а в тому, що наявних даних просто може не вистачити для визначення великої кількості синаптичних ваг.

Альтернативою навчанню, яке базується на оптимізації, є навчання, що базується на пам'яті [3] і пов'язане з концепцією «нейрони в точках даних» [5]. Найбільш характерним представником систем, навчання яких засновано на цьому принципі, є узагальнені регресійні нейронні мережі [6], проте, по-перше, вони вирішують задачу інтерполяції, а не апроксимації, а, по-друге, кількість нейронів в цих мережах визначається числом спостережень у навчальній вибірці.

Є доцільною розробка системи, яка в процесі налаштування використовувала б обидва принципи навчання, налаштовуючи при цьому не тільки синаптичні ваги, але і свою архітектуру, еволюціонуючи у часі і пристосовуючись до розв'язуваної задачі [7]. Спроба синтезу такої мережі була зроблена в [8, 9], де запропонована система складалася з кількох паралельно працюючих нейронних мереж з однаковою архітектурою, але навчених на основі різних принципів, і блоку оптимізації, що об'єднує виходи цих мереж та синтезує оптимальний вихідний сигнал системи в цілому.

У порівнянні з нейронними мережами більші можливості мають нейро-фаззи системи [2, 10–12], що поєднують в собі можливості до навчання, апроксимації та

лінгвістичної інтерпретації отриманих результатів. Найбільшого поширення серед цих систем отримала ANFIS [10], вихідний шар якої може бути налаштований за допомогою традиційних процедур ідентифікації. Загалом же абсолютна більшість нейро-фаззі систем навчається на основі тих чи інших процедур оптимізації.

У зв'язку з цим, доцільним є поширення підходу, що використаний у [8, 9], на навчання нейро-фаззі систем.

1. АРХІТЕКТУРА НЕЙРО-ФАЗЗІ СИСТЕМИ ТА ЇЇ НАВЧАННЯ НА ОСНОВІ ОПТИМІЗАЦІЇ

Архітектура еволюційної нейро-фаззі системи, що розглядається, наведена, на рис. 1 і складається з п'ятьох послідовно з'єднаних шарів. На вхідний (нульовий) шар подається $(n \times 1)$ – вимірний вектор вхідних сигналів $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T, k = 1, 2, \dots, N$, що підлягає обробці. Перший прихований шар містить nh функцій належності $\mu_{il}(x), i = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, h$ і виконує фаззіфікацію вхідних змінних, при цьому значення h може змінюватися в процесі навчання (еволюції) системи. Другий прихований шар здійснює агрегування рівнів належностей, обчислених у першому шарі, і складається з h блоків множення. Третій прихований шар – це шар синаптичних ваг, що підлягають визначенню в процесі навчання системи. Четвертий шар утворено двома суматорами й обчислює суми вихідних сигналів другого й третього шарів. І, нарешті, у п'ятому (вихідному) шарі проводиться нормалізація, в результаті якої обчислюється вихідний сигнал системи \hat{y}^{NF} .

Таким чином, якщо на вхід системи поданий векторний сигнал x , елементи першого шару обчислюють рівні належності $0 < \mu_{li} \leq 1$, при цьому в якості функцій належності використовуються дзвонуваті конструкції з не строго локальним рецепторним полем, що дозволяє уникнути виникнення «дір» у фаззіфікованому просторі [4]. Найчастіше це гавсіани

$$\mu_{li}(x) = \exp\left(-\frac{(x_i - c_{li})^2}{2\sigma_i^2}\right),$$

де c_{li} – параметр центру, σ_i – параметр ширини, що обирається емпірично або настроюється в процесі навчання за допомогою процедури зворотного поширення помилок. Помітимо також, що попереднє нормування даних на обмежений інтервал, наприклад, $-1 \leq x_i \leq 1$, у ряді випадків спрощує обчислення, оскільки параметр ширини σ_i може бути прийнятий однаковим для всіх компонентів вхідного вектора-образу.

На виходах другого прихованого шару обчислюються агреговані значення $\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)$, при цьому для гавсіанів з однаковими параметрами ширини σ

$$\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x) = \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i - c_{li})^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\frac{\|x - c_l\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

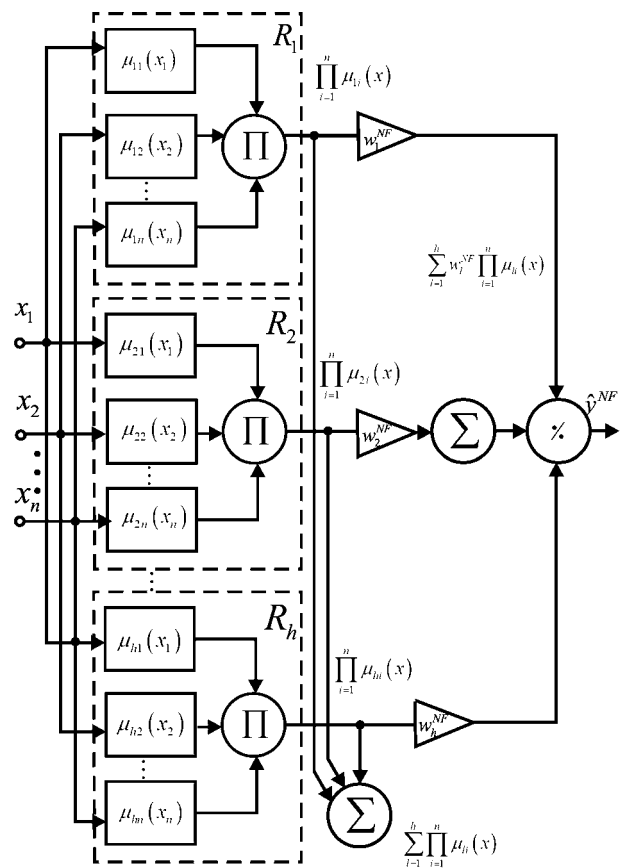


Рис. 1. Еволюційна нейро-фаззі система

(тут $c_l = (c_{l1}, c_{l2}, \dots, c_{ln})^T$), тобто блоки системи обведені пунктиром, фактично обробляють інформацію як радіально-базисні нейрони (R -нейрони) нейронних мереж.

Виходами третього прихованого шару є значення $w_l^{NF} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)$ (тут $w_l^{NF}, l = 1, 2, \dots, h$ – синаптичні ваги),

четвертого – $\sum_{l=1}^h w_l^{NF} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)$ і $\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)$ й, нарешті,

на виході системи в цілому з'являється сигнал

$$\begin{aligned} \hat{y}^{NF}(x) &= \frac{\sum_{l=1}^h w_l^{NF} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)} = \sum_{l=1}^h w_l^{NF} \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)} = \\ &= \sum_{l=1}^h w_l^{NF} \varphi_l^{NF}(x) = (w^{NF})^T \varphi^{NF}(x), \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$\varphi_l^{NF}(x) = \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x) \left(\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x) \right)^{-1}, w^{NF} = (w_1^{NF}, w_2^{NF}, \dots, w_h^{NF}),$$

$$\varphi^{NF}(x) = (\varphi_1^{NF}(x), \varphi_2^{NF}(x), \dots, \varphi_h^{NF}(x))^T.$$

Нескладно бачити, що розглянута система реалізує нелінійне відображення входів у вихідний сигнал подібно нормалізованій радіально-базисній мережі (NRBFN), а по архітектурі збігається із системами Такагі-Сугено-Канга нульового порядку [10, 13], Ванга-Мендела [1, 11, 14] і структурою Ларсена [2].

Навчання синаптичних ваг цих систем (надалі будемо позначати їх w^{TS}) здійснюється шляхом оптимізації (мінімізації) критерію навчання

$$E^{TS} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left(y(k) - (w^{TS})^T \Phi^{NF}(x(k)) \right)^2 \quad (2)$$

що веде до стандартної оцінки найменших квадратів

$$w^{TS(N)} = \left(\sum_{k=1}^N \Phi^{NF}(x(k)) (\Phi^{NF}(x(k)))^T \right)^{-1} \left(\sum_{k=1}^N \Phi^{NF}(x(k)) y(k) \right), \quad (3)$$

де $y(k)$ – зовнішній навчальний сигнал.

Вводячи у розгляд $(h \times N)$ -матрицю значень функцій $\Phi^{NF} = (\Phi^{NF}(x(1)), \dots, \Phi^{NF}(x(k)), \dots, \Phi^{NF}(x(N)))$ і $(N \times 1)$ -вектори $Y = (y(1), \dots, y(k), \dots, y(N))^T$, $\hat{Y}^{TS} = (\hat{y}^{TS}(1), \dots, \hat{y}^{TS}(k), \dots, \hat{y}^{TS}(N))^T$, можна переписати співвідношення (1)–(3) у вигляді

$$\hat{Y}^{TS} = (\Phi^{NF})^T w^{TS},$$

$$E^{TS} = \frac{1}{2} \left\| Y - (\Phi^{NF})^T w^{TS} \right\|^2, \quad (4)$$

$$w^{TS(N)} = \left(\Phi^{NF} (\Phi^{NF})^T \right)^{-1} \Phi^{NF} Y.$$

Якість апроксимації, що забезпечується розв'язком задачі оптимізації, у ряді випадків можна підвищити, використовуючи замість критерію навчання (4), його регуляризовану модифікацію

$$E_R^{TS} = \frac{1}{2} \left\| Y - (\Phi^{NF})^T w_R^{TS} \right\|^2 + \frac{\delta}{2} \left\| w_R^{TS} \right\|^2,$$

що веде до ридж-оцінок синаптичних ваг

$$w_R^{TS(N)} = (\Phi^{NF} (\Phi^{NF})^T + \delta I_{h,h})^{-1} \Phi^{NF} Y, \quad (5)$$

де $\delta > 0$ – параметр регуляризації, $I_{h,h} - (h \times h)$ – одинична матриця.

Якщо дані надходять на обробку послідовно в on-line режимі, для отримання оцінок (3)–(5) може бути використаний рекурентний метод найменших квадратів:

$$w^{TS}(k+1) = w^{TS}(k) + \frac{P(k)(y(k+1) - (w^{TS}(k))^T \Phi^{NF}(x(k+1)))}{1 + (\Phi^{NF}(x(k+1)))^T P(k) \Phi^{NF}(x(k+1))} \times \Phi^{NF}(x(k+1)),$$

$$P(k+1) = P(k) - \frac{P(k) \Phi^{NF}(x(k+1)) (\Phi^{NF}(x(k+1)))^T P(k)}{1 + (\Phi^{NF}(x(k+1)))^T P(k) \Phi^{NF}(x(k+1))},$$

причому для ридж-оцінки (5) у якості початкових умов приймається

$$P(0) = \delta^{-1} I_{h,h}.$$

2. УЗАГАЛЬНЕНА РЕГРЕСІЙНА НЕЙРО-ФАЗЗИ СИСТЕМА

Як відзначалося вище, альтернативою навчання, заснованому на оптимізації, є навчання, яке базується на пам'яті, що лежить в основі узагальненої регресійної нейронної мережі (GRNN). В [15–17] була запропонована узагальнена регресійна нейро-фаззи мережа (GRNFN), що є поширенням мережі Шпехта на нейро-фаззи архітектуру, наведену на рис. 1, та яка має низку переваг у порівнянні зі своїм нейромережевим прототипом.

Синтез, навчання й еволюція GRNFN відбуваються в такий спосіб. Вектори навчальної вибірки $x(1), \dots, x(k), \dots, x(h)$, $h \leq N$, попередньо нормуються так, що $-1 \leq x_i \leq 1$, $i = 1, 2, \dots, n$, після чого для кожного з $x(k)$ у першому прихованому шарі формується власний набір функцій належності $\mu_{k1}(x), \mu_{k2}(x), \dots, \mu_{kn}(x)$ так, що їх центри співпадають з $x_i(k)$, тобто

$$\mu_{ki}(x) = \exp \left(- \frac{(x_i - x_i(k))^2}{2\sigma_i^2} \right).$$

Одночасно з формуванням функцій належності першого прихованого шару в третьому шарі відбувається установка синаптичних ваг w_k^{GF} (індексом GF позначено параметри й сигнали GRNFN), які покладаються рівними навчальним сигналам $y(k)$. Таким чином, при подачі на вхід GRNFN довільного сигналу x , в першому прихованому шарі обчислюються рівні належності $\mu_{ki}(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, h$; у другому шарі відбувається їхнє агрегування шляхом формування багатовимірних функцій

$$y^{GF}(x(k)) = \prod_{k=1}^{h \leq N} \mu_{ki}(x_i),$$

у третьому шарі обчислюються добутки $y(k) \Phi^{GF}(x(k))$, четвертий шар обчислює значення сигналів

$\sum_{k=1}^h y(k) \Phi^{GF}(x(k))$ і $\sum_{k=1}^h \Phi^{GF}(x(k))$ й, нарешті, у вихідному шарі формується оцінка вихідного сигналу

$$\hat{y}^{GF}(x) = \frac{\sum_{k=1}^h y(k) \Phi^{GF}(x(k))}{\sum_{k=1}^h \Phi^{GF}(x(k))} = \sum_{k=1}^h w_k^{GF} \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{ki}(x_i)}{\sum_{k=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{ki}(x_i)} =$$

$$= \sum_{k=1}^h w_k^{GF} \varphi^{GF}(x(k)) = (w^{GF})^T \varphi^{GF}(x)$$

Процес навчання GRNFN може протікати як у пакетному режимі, коли задані навчальна вибірка $\{x(k), y(k)\}$ й максимальне число функцій належності для кожного входу h , так і в on-line режимі, коли пари $x(k), y(k)$ надходять на обробку послідовно, формуючи багатовимірні функції φ_k^{GF} . При цьому досить просто організувати процес виключення спостережень, що містять не суттєву інформацію. Якщо для якогось $x(k)$ виконується нерівність

$$\max_i D_i^{\min}(x_i(k)) < r < \frac{2}{h-1} \quad (6)$$

(тут $D_i^{\min}(x_i(k))$ – найменша відстань між $x_i(k)$ і раніше сформованими центрами функцій належності), то $x(k)$ не формує нову $\varphi^{GF}(x(k))$ й виключається з розгляду. Помітимо, що в нейро-фаззі системі з одновимірними функціями, граничний параметр r і відстань $D_i^{\min}(x_i(k))$ визначити значно простіше ніж в GRNN з багатовимірними функціями активації, де загальна рекомендація до вибору r визначається малим перекриттям сусідніх багатовимірних гавсіанів [18].

Роботу GRNFN нескладно організувати в режимі безперервного еволюціонування, що важливо при обробці суттєво нестационарних сигналів. Тут можливе використання двох підходів: на ковзному вікні з h спостережень, коли при надходженні на вхід системи навчальної пари $x(h+1), y(h+1)$ у першому й третьому шарах виключаються всі μ_{1i} й w_1^{GF} , а замість них встановлюються $\mu_{h+1,i}$ й w_{h+1}^{GF} , і заснований на нерівності (6). У цьому випадку нова пара замінює найближчу до неї пару «старих» даних.

Оскільки процес навчання відбувається практично миттєво, еволюція нейро-фаззі системи також відбувається дуже швидко.

3. НЕЧІТКА МАШИНА ОПОРНИХ ВЕКТОРІВ

Своєрідним гібридом систем, які базуються як на оптимізації, так і на пам'яті одночасно, є машини опорних векторів (SVM), які є нейронними мережами, що збігаються по архітектурі з RBFN і GRNN, їх синаптичні ваги визначаються в результаті розв'язання задачі оптимізації, а центри активаційних функцій встановлюються за принципом «нейрони в точках даних». І хоча ці мережі мають цілу низку безсумнівних переваг [19, 20], їхнє навчання з обчислювальної точки зору є досить трудомістким, оскільки пов'язане з розв'язанням задачі нелінійного програмування високої розмірності.

У зв'язку із цим, у якості альтернативи SVM були запропоновані машини опорних векторів, засновані на методі найменших квадратів (LS-SVM) [21], навчання яких зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь.

Фаззі-аналогом SVM є нечітка машина опорних векторів (FSVM) [22], у якій багатовимірні активаційні функції замінені одновимірними функціями належності. В [23] була розглянута FSVM, заснована на методі найменших квадратів (LS-FSVM) і призначена для розв'язання задачі розпізнавання образів, що коли в процесі навчання сигнали $y(k)$ можуть приймати значення $+1$ або -1 .

У межах досліджуваної нами задачі перетворення, що реалізується LS-FSVM (далі використовується позначення FS), може бути записане у вигляді

$$\hat{y}^{FS}(x) = \sum_{k=1}^N w_k^{FS} \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{ki}(x_i)}{\sum_{k=1}^N \prod_{i=1}^n \mu_{ki}(x_i)} = \sum_{k=1}^N w_k^{FS} \varphi^{FS}(x(k)) = (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x), \quad (7)$$

а її навчання зводиться до установки центрів функцій належності $\mu_{ki}(x_i)$ в точках $x_i(k)$ і оптимізації квадратичного критерія навчання

$$E^{FS} = \frac{1}{2} \|w^{FS}\|^2 + \frac{\gamma}{2} \sum_{k=1}^N e^2(k) \quad (8)$$

з урахуванням обмежень у вигляді системи з N лінійних рівнянь

$$y(k) = (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) + e(k) \quad (9)$$

де $\gamma > 0$ – параметр регуляризації,

$$e(k) = y(k) - \hat{y}^{FS}(x(k)).$$

Оптимізація критерію (8) без урахування обмежень (9) веде до виразу

$$w^{FS}(N) = \left(\sum_{k=1}^N \varphi^{FS}(x(k)) (\varphi^{FS}(x(k)))^T + \gamma^{-1} I_{N,N} \right)^{-1} \times \left(\sum_{k=1}^N \varphi^{FS}(x(k)) y(k) \right),$$

що є по суті ридж-оцінкою при $\delta = \gamma^{-1}$.

Для урахування системи обмежень (9) введемо в розгляд функцію Лагранжа

$$L(w^{FS}, e(k), \lambda(k)) = E^{FS} + \sum_{k=1}^N \lambda(k) (y(k) - (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) - e(k)) = \frac{1}{2} (w^{FS})^T w^{FS} + \frac{\gamma}{2} \sum_{k=1}^N e^2(k) + \sum_{k=1}^N \lambda(k) (y(k) - (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) - e(k))$$

(тут $\lambda(k)$ – N невизначених множників Лагранжа) і систему рівнянь Каруша-Куна-Таккера:

$$\begin{cases} \nabla_{w^{FS}} L = w^{FS} - \sum_{k=1}^N \lambda(k) \varphi^{FS}(x(k)) = \vec{0}_N, \\ \frac{\partial L}{\partial e(k)} = \gamma e(k) - \lambda(k) = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda(k)} = y(k) - (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) - e(k) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

де $\vec{0}_N - (N \times 1)$ – вектор, утворений нулями.

З (10) випливає

$$\begin{cases} w^{FS}(N) = \sum_{k=1}^N \lambda(k) \varphi^{FS}(x(k)), \\ \lambda(k) = \gamma e(k), \\ y(k) = (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) + e(k), \end{cases} \quad (11)$$

або в матричному вигляді

$$\left(\gamma^{-1} I_{N,N} + \Omega \right) \begin{pmatrix} \lambda(1) \\ \lambda(2) \\ \vdots \\ \lambda(N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{pmatrix},$$

або

$$\left(\gamma^{-1} I_{N,N} + \Omega \right) \vec{\lambda} = Y,$$

(тут $\Omega = \left\{ \Omega_{ij} = (\varphi^{FS}(x(i)))^T \varphi^{FS}(x(j)) \right\}$),

звідки

$$\vec{\lambda} = \left(\gamma^{-1} I_{N,N} + \Omega \right)^{-1} Y. \quad (12)$$

Остаточно (7) з урахуванням (11) і (12) набуває вигляд

$$\hat{y}^{FS}(x) = \left(\sum_{k=1}^N \lambda(k) \varphi^{FS}(x(k)) \right)^T \varphi^{FS}(x).$$

4. ОПТИМАЛЬНИЙ АНСАМБЛЬ НЕЙРО-ФАЗЗИ СИСТЕМ

При розв'язанні конкретної задачі не можна встановити заздалегідь яка з окремих синтезованих систем (TS, GRNFN, FSVM або яка-небудь ще) покаже найкращі результати. Більше того, при обробці нестационарних сигналів на різних часових інтервалах, найкращими можуть виявитися різні системи. У цій ситуації доцільно скористатися ансамблем одночасно працюючих систем [24–27] з наступним об'єднанням їх вихідних сигналів з метою одержання оптимального результату так, як це показано на рис. 2.

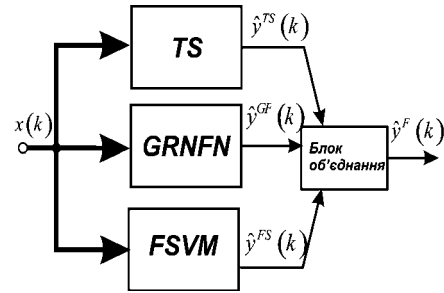


Рис. 2. Ансамбль нейро-фаззи систем

Вводячи в розгляд вектори вихідних сигналів $\hat{y}(k) = \left(\hat{y}^{TS}(k), \hat{y}^{GF}(k), \hat{y}^{FS}(k) \right)^T$ і параметрів об'єднання

$w^F = \left(w_{TS}^F, w_{GF}^F, w_{FS}^F \right)^T$, будемо шукати оптимальний вихідний сигнал у вигляді

$$\hat{y}^F(k) = (w^F)^T \hat{y}(k)$$

при обмеженнях на незміщеність

$$I_3^T w^F = 1,$$

де $I_3 - (3 \times 1)$ – вектор, утворений одиницями.

Невідомий вектор параметрів w^F може бути визначений за допомогою методу штрафних функцій, для чого вводиться $(N \times 3)$ матриця вихідних сигналів $\hat{Y} = (\hat{y}(1), \hat{y}(2), \dots, \hat{y}(N))^T$ і критерій оптимізації

$$E^F = \left(Y - \hat{Y} w^F \right)^T \left(Y - \hat{Y} w^F \right) + \rho^{-2} \left(1 - I_3^T w^F \right), \quad (13)$$

де ρ – штрафний коефіцієнт.

Мінімізація (13) по w^F веде до виразу

$$w^F(\rho) = \left(\hat{Y}^T \hat{Y} + \rho^{-2} I_3 I_3^T \right)^{-1} \left(\hat{Y}^T Y + \rho^{-2} I_3 \right),$$

яке після нескладних перетворень [28] і прирівнювання ρ до нуля, набуває вигляд

$$w^F(N) = \lim_{\rho \rightarrow 0} w^F(\rho) = w^{LS}(N) + P^F(N) \frac{1 - I_3^T w^{LS}(N)}{I_3^T P^F(N) I_3}, \quad (14)$$

де

$$w^{LS}(N) = \left(\hat{Y}^T \hat{Y} \right)^{-1} \hat{Y}^T Y = P^F(N) \hat{Y}^T Y \quad (15)$$

– звичайна оцінка найменших квадратів типу (4).

Елементом вектора $w^F(N)$ (14) можна надати зміст належностей кожної з підсистем ансамблю TS, GRNFN і FSVM до деякої гіпотетичної оптимальної системи, якщо забезпечити їх невід'ємність у процесі об'єднання.

Вводячи у розгляд лагранжіан

$$L(\mu^F, \lambda^F, \rho^F) = (Y - \hat{Y}\mu^F)^T (Y - \hat{Y}\mu^F) + \lambda^F (I_3^T \mu^F - 1) - (\rho^F)^T \mu^F,$$

(тут $\mu^F - (3 \times 1)$ – вектор рівнів належності, λ^F – невизначений множник Лагранжа, $\rho^F - (3 \times 1)$ – вектор невід’ємних множників Лагранжа, що відповідають умовам додаткової нежорсткості), і систему рівнянь

$$\begin{cases} \nabla_{\mu^F} L = \vec{0}_3, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda^F} = 0, \end{cases}$$

розв’язок якої має вигляд

$$\begin{cases} \mu^F = P^F(N) (\hat{Y}^T \hat{Y} + 0,5\lambda^F I_3 + 0,5\rho^F), \\ \lambda^F = \frac{I_3^T P^F(N) \hat{Y}^T Y - 1 + 0,5I_3^T P^F(N) \rho^F}{0,5I_3^T P^F(N) I_3}, \end{cases}$$

і використовуючи процедуру Ерроу-Гурвіца-Удзави [29], одержуємо алгоритм навчання вектора μ^F у вигляді

$$\begin{cases} \mu^F(k+1) = w^{LS}(k+1) - P^F(k+1) \times \\ \times (I_3^T w^{LS}(k+1) - 1 + 0,5I_3^T P^F(k+1) \rho^F(k)) (I_3^T P^F(k+1) I_3)^{-1} I_3 + 0,5P^F(k+1) \rho^F(k), \\ \rho^F(k+1) = \text{Pr}_+(\rho^F(k) - \eta_\rho(k+1) \mu^F(k+1)), \end{cases} \quad (16)$$

де w^{LS} – визначається виразом (15), $\text{Pr}_+(\cdot)$ – проектор на додатний ортант.

Нескладно показати, що алгоритм (16) елементарно поширюється на довільну кількість систем, що входять в ансамбль.

ВИСНОВКИ

Введено систему еволюційних нейро-фаззі систем, що використовують різні принципи навчання та налаштовують не тільки синаптичні ваги, але й свою архітектуру. Запропоновано адаптивну процедуру об’єднання цих систем, що дозволяє синтезувати оптимальний вихідний сигнал і встановлювати рівні належності до деякої гіпотетичної оптимальної системи. Підхід, що розвивається, відрізняється обчислювальною простотою й дозволяє обробляти інформацію в on-line режимі в міру її надходження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Осовский, С.* Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. *Rutkowski, L.* Computational Intelligence. Methods and Techniques / L. Rutkowski. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 514 p.
3. *Nelles, O.* Nonlinear System Identification / O. Nelles. – Berlin: Springer, 2001. – 785 p.
4. *Friedman, J.* The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference and Prediction / J. Friedman, T. Hastie, R. Tibshirani. – Berlin: Springer, 2003. – 552 p.
5. Pattern recognition using radial basis function network / D. Zahiriak, R. Chapman, S. Rogers [and other] // Dayton, OH: Application of AI Conf. – 1990. – P. 249–260.
6. *Specht, D. F.* A general regression neural network / D. F. Specht // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1991. – Vol. 2. – P. 568–576.
7. *Kasabov, N.* Evolving Connectionist Systems / N. Kasabov. – London: Springer – Verlag, 2003. – 307 p.

8. *Bodyanskiy, Ye.* Hybrid evolving neural network using kernel activation functions / Ye. Bodyanskiy, N. Teslenko, P. Grimm // Conf. Proc. 17th Zittau East-West Fuzzy Coll. – Zittau Goerlitz: HS. – 2010. – P. 39–46.
9. *Бодянский, С. В.* Эволюционная нейронная сеть с ядерными функциями активации та адаптивный алгоритм її навчання / С. В. Бодянский, А. О. Дейнеко, Н. О. Тесленко. – Наукові праці – Вип. 130. – Т. 143. – Комп’ютерні технології. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2010. – С. 71–78.
10. *Jang, J.-S.* Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Maching Intelligence / J.-S. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani // Upper Saddle River: Prentice Hall. – 1997. – 640 p.
11. *Wang, L.-X.* Fuzzy basis functions, universal approximation and orthogonal least squares learning / L.-X. Wang, J. M. Mendel // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1993. – Vol. 3. – P. 807–814.
12. *Cios, K. J.* Neuro-fuzzy algorithms / K. J. Cios, W. Pedrycz // Oxford: IOP Publishing Ltd and Oxford University Press. – Handbook of Neural Computation, 1997. – D1. 3:1 – D1. 3:7.
13. *Takagi, T.* Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / Takagi T., Sugeno M. // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15. – P. 116–132.
14. *Wang, L.-X.* Adaptive Fuzzy Systems and Control. Design and Stability Analysis / L.-X. Wang // Upper Saddle, N. J.: Prentice Hall, 1994. – 256 p.
15. *Bodyanskiy, Ye.* Generalized regression neuro-fuzzy network / Ye. Bodyanskiy, N. Teslenko. – Proc. XIII-th Int. Conf. «Information Reaserch & Application», i. TECH 2007. – V. 1. – Varna, 2007. – P. 219–225.
16. *Bodyanskiy, Ye.* Nonliner process identification and modeling using general regression neuro-fuzzy network / Bodyanskiy Ye., Otto P., Pliss I, Teslenko N. // Proc. 52 nd Int. Sci. Coll. «Computer Science Meets Automation.» – TU Ilmenau (Thuer.) – 2007. – P. 23–27.
17. *Bodyanskiy, Ye.* General regression neuro-fuzzy network for identification of nonstationary plants / Ye. Bodyanskiy, N. Teslenko // Int. J. Informaion Technologies and Knowledge, 2008. – Vol. 2, № 2 – P. 136–142.

18. *Bishop, C. M.* Neural Networks for Pattern Recognition / C. M. Bishop // Oxford : Clarendon Press, 1995. – 482 p.
19. *Vapnik, V. N.* The Nature of Statistical Learning Theory / V. N. Vapnik – N. Y. : Springer, 1995. – 188 p.
20. *Vapnik, V. N.* Statistical Learning Theory: Adaptive and Learning Systems / V. N. Vapnik – N. Y. : John Wiley & Sons, 1998. – 736 p.
21. Least Squares Support Vector Machines / [Suykens J.A.K., Gestel T.V., Brabanter J.D. and other]. – Singapore : World Scientific, 2002. – 294 p.
22. *Lin, Ch.-F.* Fuzzy Support Vector Machines / Ch.-F. Lin, Sh.-D. Wang. – IEEE Trans. on Neural Networks. – 2002. – T. 13., № 2. – P. 646–471.
23. *Tsujinishi, D.* Fuzzy Least Squares Support Vector Machines for multiclass problems / D. Tsujinishi, S. Abe. – Neural Networks, 2003. – Vol. 16. – P. 785–792.
24. *Hansen, L. K.* Neural networks ensembles / L. K. Hansen, P. Salamon // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1990. – Vol. 12. – P. 993–1000.
25. *Sharkey, A. J. C.* On combining artificial neural nets / A. J. C. Sharkey // Connect. Sci. – 1996. – Vol. 8. – P. 299–313.
26. *Hashem, S.* Optimal linear combination of neural networks / S. Hashem // Neural Networks. – 1997. – Vol. 10. – P. 599–614.
27. *Naftaly, U.* Optimal ensemble averaging of neural networks / U. Naftaly, N. Intrator, D. Horn // Network : Comput. Neural Syst. – 1997. – Vol. 8. – P. 283–296.
28. *Бодянский С. В.* Адаптивное выявление разладов в объектах управления за допомогою штучних нейронних мереж / С. В. Бодянский, О. І. Михальов, І. П. Плісс. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2000. – 140 с.
29. *Поляк, Б. Т.* Введение в оптимизацию / Б. Т. Поляк. – М. : Мир, 1984. – 541 с.
30. *Бодянский, Е. В.* Адаптивное обобщенное прогнозирование многомерных случайных последовательностей / Е. В. Бодянский, И. П. Плисс, Т. В. Соловьева. – Доклады АН УССР. – 1989. – А. – № 9. – С. 73–75.
Стаття надійшла до редакції 20.02.2012.

Дейнеко А. А., Плисс И. П., Бодянский Е. В.
КОМБИНИРОВАННОЕ ОБУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОЙ НЕЙРО-ФАЗЗИ СИСТЕМЫ

Предложена архитектура эволюционной нейро-фаззи системы, которая не склонна к проклятию размерности, способна обрабатывать информацию в режиме реального времени, адаптируя при этом свои параметры и структуру к условиям задачи. В качестве активационных функций были использованы ядерные функции активации.

Ключевые слова: эволюционная нейро-фаззи система, нормализованная радиально-базисная нейронная сеть, обобщенная регрессионная нейро-фаззи сеть, нечеткая машина опорных векторов, ядерная функция активации.

Deineko A. A., Pliss I. P., Bodyanskiy Ye.
EVOLVING NEURO-FUZZY SYSTEM COMBINED LEARNING

In this work the evolving neuro-fuzzy system with kernel activation function that contains fuzzy support vector machine, normalized radial basis function neural network and general regression neuro-fuzzy network as subsystems is proposed. This network is tuned using both optimization and memory based approaches and does not inclined to the «curse of dimensionality», is able to real time mode information processing by adapting its parameters and structure to problem conditions.

Key words: evolving neuro-fuzzy system, normalized radial-basis function neural network, general regression neuro-fuzzy network, fuzzy support vector machine, kernel activation function.

UDC 519.832.4

Romanuke V. V.

Candidate of Technical Science, docent of Khmelnytsky National University

OPTIMAL STRATEGIES CONTINUUM FOR PROJECTING THE FOUR-MOUNT CONSTRUCTION UNDER INTERVAL UNCERTAINTIES WITH INCORRECTLY PRE-EVALUATED TWO LEFT AND ONE RIGHT ENDPOINTS

There is investigated a two-person game model of optimizing cross-section squares of the four-mount construction, where the model kernel is defined on the six-dimensional hyperparallelepiped as the product of three closed intervals of unit-normed loads and of three closed intervals of unit-normed cross-section squares. For the case of incorrectly pre-evaluated two left and one right endpoints of those interval uncertainties there has been proved that the projector may obtain an optimal strategies continuum. A criterion for singularizing that continuum has been proposed.

Key words: optimizing cross-section squares, two-person game model, four-mount construction, incorrect pre-evaluation.

INVESTIGATION AREA

There are many uncertain factors in building mount constructions, one of which is interval-valued potential load on the construction pivots, pillars, bars or other mount

elements [1, 2]. If the potential load on the construction with four mounts is unit-normed, then the unit-normed load on the i -th mount x_i is enclosed within the closed interval $[a_i; b_i] \subset (0; 1)$ by $b_i > a_i$ for $i = \overline{1, 3}$ [3, 4]. The nonzero

fourth unit-normed load is

$$x_4 = 1 - x_1 - x_2 - x_3 \quad (1)$$

due to the unit-normalization. The problem is to take some mounting square against that potential load, and this square may be unit-normed also. Thus the i -th mount cross-section square is y_i , and due to analogous unit-normalization $y_i \in [a_i; b_i] \subset (0; 1)$ for $i = \overline{1, 3}$ by

$$y_4 = 1 - y_1 - y_2 - y_3. \quad (2)$$

Obviously, that taking the unit-normed values shouldn't be arbitrary, but be optimal in the sense of minimizing the potential load and mounting square relationship [3, 5, 6].

AVAILABLE REFERENCES ANALYSIS

There is a known model of optimizing the values $\{y_i\}_{i=1}^3$, stated as a convex game with the kernel [3, 7]

$$T(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = T(x_1, x_2, x_3; y_1, y_2, y_3) = \max \left\{ x_1 y_1^{-2}, x_2 y_2^{-2}, x_3 y_3^{-2}, \frac{1 - x_1 - x_2 - x_3}{(1 - y_1 - y_2 - y_3)^2} \right\} \quad (3)$$

on the hyperparallelepiped

$$\mathbf{X} \times \mathbf{Y} = \prod_{p=1}^2 [a_p; b_p] \times [a_2; b_2] \times [a_3; b_3] = \prod_{p=1}^2 \left(\prod_{i=1}^3 [a_i; b_i] \right) \subset \prod_{d=1}^6 (0; 1) \subset \prod_{d=1}^6 [0; 1] \subset \mathbb{R}^6 \quad (4)$$

of pure strategies

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3] \in \mathbf{X} = [a_1; b_1] \times [a_2; b_2] \times [a_3; b_3] = \prod_{i=1}^3 [a_i; b_i] \subset \prod_{i=1}^3 (0; 1) \subset \prod_{i=1}^3 [0; 1] \subset \mathbb{R}^3 \quad (5)$$

of the first player and of pure strategies

$$\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2 \ y_3] \in \mathbf{Y} = [a_1; b_1] \times [a_2; b_2] \times [a_3; b_3] = \prod_{i=1}^3 [a_i; b_i] \subset \prod_{i=1}^3 (0; 1) \subset \prod_{i=1}^3 [0; 1] \subset \mathbb{R}^3 \quad (6)$$

of the second. The first player personifies the natural factors, which can't be foreseen, and the second player personifies the projector or the person responsible for projecting the four-mount construction, being investigated. The optimal strategy

$$\mathbf{Y}_* = [y_1^* \ y_2^* \ y_3^*] \in [a_1; b_1] \times [a_2; b_2] \times [a_3; b_3] = \mathbf{Y} \quad (7)$$

of the projector, existing by the theorem on the second player optimal strategies in the convex game [3, 8], is determined from the four-parted equality

$$\frac{b_i}{(y_i^*)^2} = \frac{1 - a_1 - a_2 - a_3}{(1 - y_1^* - y_2^* - y_3^*)^2} \text{ by } i = \overline{1, 3}. \quad (8)$$

However, the given bounded intervals $\{[a_i; b_i]\}_{i=1}^3$ uncertainties may occur such that the equality (8) is not true [9] within the parallelepiped (6). Then it is spoken about incorrectness of left or right endpoints of those intervals. If these endpoints were corrected (increased or decreased, as needed) then the equality (8) would have been turned true within the parallelepiped (6). But this is impossible, so pre-evaluations $\{a_i\}_{i=1}^3$ and $\{b_i\}_{i=1}^3$ are held still.

WORK GOAL

Will find the projector optimal strategy (7) in supposition that here are interval uncertainties $\{[a_i; b_i]\}_{i=1}^3$ with incorrectly pre-evaluated two left and one right endpoints. If they all were correct the components of the projector optimal strategy (7) would have been [7]

$$y_i^* = \frac{\sqrt{b_i}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} \quad \forall i = \overline{1, 3}. \quad (9)$$

But the endpoints a_p, a_q and b_k by $\{p, q, k\} = \{1, 2, 3\}$ have occurred such that

$$\frac{\sqrt{b_p}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} < a_p, \quad (10)$$

$$\frac{\sqrt{b_q}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} < a_q, \quad (11)$$

$$\frac{\sqrt{b_k}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} > b_k. \quad (12)$$

It means that

$$y_p^* > \frac{\sqrt{b_p}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}}, \quad (13)$$

$$y_q^* > \frac{\sqrt{b_q}}{\sqrt{b_1 + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1-a_1-a_2-a_3}}}, \quad (14)$$

$$y_k^* < \frac{\sqrt{b_k}}{\sqrt{b_1 + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1-a_1-a_2-a_3}}}, \quad (15)$$

and for finding the projector optimal strategy (7) there has to be used the impossibility of the equality (8) within the parallelepiped (6) up with the conditions (10)–(12). Clearly that the conditions (10)–(12), meaning (13)–(15), also give one of the four following inequalities, which breaks the equality (8):

$$\frac{1}{b_k} > \frac{b_r}{a_r^2} > \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \text{ by } r \in \{p, q\}, \quad (16)$$

$$\frac{1}{b_k} > \frac{b_p}{a_p^2} \geq \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \geq \frac{b_q}{a_q^2}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{b_k} \geq \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} > \frac{b_r}{a_r^2} \text{ by } r \in \{p, q\}, \quad (18)$$

$$\frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} > \frac{1}{b_k} > \frac{b_r}{a_r^2} \text{ by } r \in \{p, q\}. \quad (19)$$

The inequalities (16)–(18) are united into the single inequality

$$\frac{1}{b_k} \geq \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \quad (20)$$

that is going to be the last pre-condition for finding the projector optimal strategy (7).

THEOREM ON CONTINUUM OF PROJECTOR OPTIMAL STRATEGIES (7) UNDER (10)–(12) BY (20)

Theorem. In the game with kernel (3) on the hyperparallelepiped (4) by the conditions (10)–(12) and (20) the components of the projector optimal strategy (7) are

$$y_r^* \in [a_r; b_r] \text{ by } r \in \{p, q\} \quad (21)$$

at

$$b_p + b_q \leq 1 - b_k - \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)} \quad (22)$$

or

$$y_r^* \in [a_r; y_r^{(\max)}] \text{ by } r \in \{p, q\} \quad (23)$$

at

94

$$b_p + b_q > 1 - b_k - \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)} \quad (24)$$

for

$$y_p^{(\max)} + y_q^{(\max)} = 1 - b_k - \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)}, \quad (25)$$

where

$$y_k^* = b_k. \quad (26)$$

In the case of the inequality

$$\frac{1}{b_k} > \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \quad (27)$$

the projector has a continuum of its optimal strategies (7).

Proof. As the inequality (20), being the corollary of the conditions (10)–(15), is true then the second player cannot

make its payoff less than $\frac{1}{b_k}$. This payoff value is the optimal

game value $v_* = \frac{1}{b_k}$, which is reached at the right endpoint

of the k -th rib of the parallelepiped (6). If $y_k < b_k$ then the payoff is greater than v_* , what is unacceptable for the projector, so (26) is the single possible k -th component of the projector optimal strategy (7). Going further, the inequality (20) may be overstated as

$$(1-a_p-a_q-b_k)^2 \geq b_k(1-a_1-a_2-a_3) \quad (28)$$

or

$$1-a_p-a_q-b_k \geq \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)}, \quad (29)$$

where it has been root-extracted due to positiveness of the fourth unit-normed cross-section square. So, the projector should select such y_p^* and y_q^* that the inequality

$$1-y_p^*-y_q^*-b_k \geq \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)} \quad (30)$$

would turn true. The inequality (30) is overstated as the condition

$$y_p^* + y_q^* \leq 1 - b_k - \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)} \quad (31)$$

for selecting the components y_p^* and y_q^* . Then if (22) is true then (31) is true $\forall y_r^* \in [a_r; b_r]$ by $r \in \{p, q\}$ and therefore the r -th component of the projector optimal strategy (7) is (21). Otherwise, if (24) is true then (31) is true for such y_p^* and y_q^* that their sum is not greater than the right side of (31). So, the r -th component is selected as (23) for (25). The

continuum of projector optimal strategies with the inequality (27) is subsequent to that $y_r^* > a_r$, at $r \in \{p, q\}$ for the case with (22) and either $y_p^{(\max)} > a_p$ or $y_q^{(\max)} > a_q$ for the case with (24). The theorem has been proved.

It remains only to constate that in the case of the equality

$$\frac{1}{b_k} = \frac{1 - a_1 - a_2 - a_3}{(1 - a_p - a_q - b_k)^2} \tag{32}$$

the projector does not have more than the single optimal strategy (7) as here its components are $y_r^* = a_r$, by $r \in \{p, q\}$ and, undoubtedly, (26).

Consider an example of applying the proved theorem. Let

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,24, \quad b_1 = 0,26, \quad a_2 = 0,26, \\ b_2 &= 0,29, \quad a_3 = 0,1, \quad b_3 = 0,2. \end{aligned} \tag{33}$$

Having calculated the values (9), here (10)–(12) are true:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{b_1}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} < \\ < 0,23961 < a_1 = 0,24, \end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{b_2}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} < \\ < 0,2531 < a_2 = 0,26, \end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{b_3}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} > \\ > 0,2101 > b_3 = 0,2. \end{aligned} \tag{36}$$

Also the inequality (17) is true, that is (20) is the pre-condition for finding the projector optimal strategy (7). So, as

$$\begin{aligned} b_1 + b_2 = 0,55 > 0,5172 > \\ > 1 - b_3 - \sqrt{b_3(1 - a_1 - a_2 - a_3)} \end{aligned} \tag{37}$$

is true, that is the condition (24) is true, then here the projector optimal strategy (7) components are (23) for (25) and (26):

$$\begin{aligned} y_1^* &\in \left[0,24; y_1^{(\max)} \right], \\ y_2^* &\in \left[0,26; y_2^{(\max)} \right], \quad y_3^* = 0,2, \end{aligned} \tag{38}$$

where

$$y_1^{(\max)} + y_2^{(\max)} = 0,8 - 0,2\sqrt{2}. \tag{39}$$

CONCLUSION AND WORKING FURTHER PERSPECTIVE

The disclosed continuum of the projector optimal strategy (7) under strictness in the inequality sign must not delude an explorer or a real constructor, because the summed unit-normed cross-section squares are fixed at unit, and it may select y_p^* and y_q^* whatever, just satisfying (21) or (23) with (25). Nevertheless, this selection could have been rational due to some criterion with respect to $y_p^*, y_q^*, y_4^* = 1 - y_p^* - y_q^* - b_k$. One of suchlike criterions is equalization of values y_p^*, y_q^*, y_4^* , that is solving the problem

$$\min_{[a_p; b_p] \times [a_q; b_q]} \left(\max \left\{ \frac{y_p^*}{y_q^*}, \frac{y_q^*}{y_p^*}, \frac{y_p^*}{y_4^*}, \frac{y_4^*}{y_p^*}, \frac{y_q^*}{y_4^*}, \frac{y_4^*}{y_q^*} \right\} \right) \tag{40}$$

or

$$\min_{[a_p; y_p^{(\max)}] \times [a_q; y_q^{(\max)}]} \left(\max \left\{ \frac{y_p^*}{y_q^*}, \frac{y_q^*}{y_p^*}, \frac{y_p^*}{y_4^*}, \frac{y_4^*}{y_p^*}, \frac{y_q^*}{y_4^*}, \frac{y_4^*}{y_q^*} \right\} \right). \tag{41}$$

In perspective, there should be worked the situation with the inequality (19), which seems to be more complicated in finding the projector optimal strategy (7).

REFERENCES

1. Дарков, А. В. Строительная механика: [учебник для строит. спец. вузов] / А. В. Дарков, Н. Н. Шапошников. – [8-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высш. шк., 1986. – 607 с.
2. Киселев, В. А. Строительная механика: Спец. курс. Динамика и устойчивость сооружений: [учебник для вузов] / В. А. Киселев. – [3-е изд., испр. и доп.]. – М.: Стройиздат, 1980. – 616 с.
3. Воробьев, Н. Н. Теория игр для экономистов-кибернетиков / Н. Н. Воробьев. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 272 с.
4. Романюк, В. В. Моделювання дії нормованого одиничного навантаження на три колони однакової висоти у будівельній конструкції і знаходження оптимальної площі кожної опори / В. В. Романюк // Проблеми трибології. – 2010. – № 3. – С. 18–25.
5. Трухаев, Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р. И. Трухаев. – М.: Наука, 1981. – 258 с.
6. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий – С. Пб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
7. Романюк, В. В. Регулярна оптимальна стратегія проектувальника у моделі дії нормованого одиничного навантаження на N-колонну будівельну конструкцію-опору / В. В. Романюк // Проблеми трибології. – 2011. – № 2. – С. 111–114.
8. Теория игр: [учеб. пособие для ун-тов] / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. А. Семина. – М.: Высшая школа, Книжный дом «Университет», 1998. – 304 с.

9. Романюк, В. В. Про особливі компоненти оптимальної стратегії проектувальника у моделі дії нормованого одиничного навантаження на триколонну будівельну конструкцію / В. В. Романюк // Проблеми трибології. – 2011. – № 1. – С. 44–46.

Стаття надійшла до редакції 04.10.2011.

Романюк В. В.

КОНТИНУУМ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ ДЛЯ ПРОЕКТИВАННЯ ЧЕТЫРЕХОПОРНОЙ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НЕКОРРЕКТНО ОЦЕНЕННЫМИ ДВУМЯ ЛЕВЫМИ И ОДНИМ ПРАВЫМ КОНЦАМИ

Исследуется игровая модель двух лиц в оптимизации площадей поперечного сечения четырехопорной конструкции, где модельное ядро определяется на шестимерном гиперпараллелепипеде как произведении трех замкнутых интервалов единично нормированных нагрузок и трех замкнутых интервалов единично нормированных площадей поперечного сечения. Для случая предварительно некорректно оцененных двух левых и одного правого концов этих интервальных неопределенностей доказано, что проектировщик может получать континуум оптимальных стратегий. Предложен критерий для выделения единственного элемента из этого континуума.

Ключевые слова: оптимизация площадей поперечного сечения, игровая модель двух лиц, четырехопорная конструкция, некорректное предварительное оценивание.

Романюк В. В.

КОНТИНУУМ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЧОТИРЬОХОПОРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ В УМОВАХ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ З ПОПЕРЕДНЬО НЕКОРЕКТНО ОЦІНЕНИМИ ДВОМА ЛІВИМИ Й ОДНИМ ПРАВИМ КІНЦЯМИ

Досліджується ігрова модель двох осіб в оптимізації площ поперечного перерізу чотирьохопорної конструкції, де модельне ядро задається на шестивимірному гіперпаралелепипеді як добутку трьох замкнених інтервалів одинично нормованих навантажень і трьох замкнених інтервалів одинично нормованих площ поперечного перерізу. Для випадку попередньо некоректно оцінених двох лівих й одного правого кінців цих інтервальных невизначеностей доведено, що проектувальник може отримувати континуум оптимальних стратегій. Запропоновано критерій для виокремлення єдиного елемента з цього континуума.

Ключові слова: оптимізація площ поперечного перерізу, ігрова модель двох осіб, чотирьохопорна конструкція, некоректне попереднє оцінювання.

УДК 004.93

Субботин С. А.

Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

КОНСТРУИРУЕМЫЕ ПРИЗНАКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ СТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ

Решена актуальная задача автоматизации сокращения размерности данных для построения диагностических и распознающих моделей на основе стационарных одномерных сигналов, распределенных во времени. Впервые предложен комплекс показателей, характеризующих свойства сигналов, позволяющий существенно сократить описание классифицируемых объектов. Проведены эксперименты по исследованию предложенного комплекса показателей при решении практических задач.

Ключевые слова: распознавание образов, техническое диагностирование, признаков, стационарный сигнал, извлечение признаков.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем, возникающих при построении распознающих и диагностических моделей стационарных объектов на основе сигналов, распределенных во времени, является низкая индивидуальная информативность признаков, которая при ограниченном объеме выборки отягощается большим числом признаков. В результате получаемая распознающая модель, как правило, оказывается громоздкой и сложной (как следствие этого, также характеризуется низким уровнем обобщения обучающих данных), а также крайне неудобной для последующего анализа и интерпретации человеком. Процесс построения распознающей модели по выборкам, характеризующимся большим числом признаков,

также требует значительных затрат ресурсов памяти ЭВМ (как оперативной, так и дисковой) для хранения и обработки обучающих данных.

Поэтому актуальной является задача сокращения описания стационарных сигналов, распределенных во времени с целью получения интерпретабельных распознающих и диагностических моделей, обеспечивающих высокий уровень обобщения относительно обучающей выборки данных.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СОКРАЩЕНИЯ ОПИСАНИЯ СИГНАЛОВ

Пусть задана исходная выборка наблюдений $\langle x, y \rangle$, где $x = \{x^s\}$, $x = \{x_j\}$, $x^s = \{x_j^s\}$, $x_j = \{x_j^s\}$, $y = \{y^s\}$, $s = 1, 2, \dots, S$, $j = 1, 2, \dots, N$, x_j^s – значение j -го диагностического признака x_j , характе-

ризуюче прецедент (екземпляр) x^s, y^s – значення вихідного признака, сопоставленне прецеденту x^s, S – число прецедентів, N – число діагностических признаків.

Тоді задача скорочення описання вибірки $\langle x, y \rangle$ може бути представлена як задача отбору признаків і (або) задача конструювання штучних признаків [1–3].

Задача отбору інформативних признаків може бути сформульована наступним образом: із заданої вибірки $\langle x, y \rangle$ необхідно отримати скорочену вибірку $\langle x', y' \rangle, x' \subset \{x_j\}, N_1 < N, f(\langle x', y' \rangle, \langle x, y \rangle) \rightarrow \text{opt}$. Тут N_1 – число обраних признаків, $f()$ – користувацький критерій, характеризуючий якість аргумента відносно розв’язаної задачі, opt – оптимальне (бажане або прийнятне) значення функціонала $f()$ для розв’язаної задачі.

Задача конструювання штучних признаків, в свою чергу, може бути поставлена наступним образом: для заданої вибірки $\langle x, y \rangle$ необхідно отримати скорочену вибірку $\langle x', y' \rangle, x' = \{x'_i\}, x'_i = I_i(\{x_j\}), f(\langle x', y' \rangle, \langle x, y \rangle) \rightarrow \text{opt}$. Тут I_i – перетворення, що дозволяє отримати i -ий конструюваний штучний признак.

2. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

Найпростішим рішенням задачі скорочення описання сигналів для класифікації стаціонарних об’єктів є використання методів відбору інформативних признаків (feature selection methods) [1–3, 4]. Однак для індивідуально малоінформативних признаків методи відбору фільтруючого типу [4], не вимагаючи побудови моделей і оцінювання їх якості для визначення інформативності набору признаків, вважаються практично малоприменими через те, що інформативності окремих признаків вихідних сигналів, як правило, мало відрізняються. Використання оболочечних методів типу «wrapper» [1–3], передбачаючи побудову моделей і оцінювання їх якості для визначення інформативності комбінацій признаків, виявляється сильно залежним від здатності вибраного методу побудови моделей виділяти інформативні комбінації признаків і пов’язано з великими витратами часу і пам’яті ЕВМ, оскільки вимагають побудови і збереження в пам’яті ЕВМ моделей для кожного комбінування признаків, і тому також з практичної точки зору малоприменими.

Методи конструювання штучних признаків (feature extraction methods) [5–7] передбачають формування штучних признаків, розрахованих на основі вихідних сигналів, що характеризують екземпляри вибірки. Головним недоліком подавляючого більшості цих методів є втрата інтерпретованості синтезованих моделей, а також відсутність гарантії покращення роздільності класів в новому просторі признаків. Крім того, більшість методів формування штучних признаків характеризуються великими витратами обчислювальних ресурсів, а синтезовані з їх допомогою перетворення для штучних признаків виявляються сильно залежними від екземплярів вихідної вибірки.

Методи цифрової обробки сигналів [8, 9] в контексті розв’язаної задачі можна розглядати як засоби попередньої обробки даних для наступного конструювання і відбору признаків або як специфічний різновид методів конструювання признаків. Серед методів цифрової обробки сигналів найбільше поширення в задачах діагностування і розпізнавання сигналів, розподілених за часом, отримали перетворення Фур’є [8] і вейвлет-розкладання [9], загальною недоліком яких застосовано до розв’язаної задачі є те, що формоване ними простір признаків є достатньо великим (порівняно з числом признаків в вихідному сигналі) і вимагає наступного відбору признаків, а також нав’язує даним штучну форму (Фур’є і вейвлет-розкладання виділяють в вихідному сигналі, відповідно, періодичні і неперіодичні складові в заданному користувачем базисі функцій, які можуть не відповідати дійсній природі сигналу).

Метою даної роботи є створення комплексу штучних признаків $\{I_i(\{x_j\})\}$, що дозволяє для стаціонарних об’єктів, що характеризуються розподіленістю за часом сигналами, забезпечити суттєве скорочення розмірності вибірки, а, відповідно, спростити формовані на їх основі розпізнаючі і діагностическі моделі і підвищити їх узагальнюючі властивості, а також інтерпретованість.

3. РОЗКЛАДАННЯ СИГНАЛУ НА СКЛАДОВІ І ФОРМУВАННЯ ЙОГО ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Представимо вихідний сигнал x^s як сукупність ділянок, в кожній з яких значення сигналу знаходяться в околицях відповідного локального максимуму. Тоді, визначив для кожної ділянки значення його локальних характеристик, можна задати спосіб їх об’єднання в інтегральні характеристики сигналу:

$$I_{k,p,q}^s = \sum_{z=1}^Z w_{z,k,p}(x^s) v_q(\{x_i^s \mid v_z(x_i^s) = 1, i = 1, 2, \dots, N\}),$$

де Z – число локальних максимумів (і їх околиць) сигналу, p – номер способу формування ваг, q – номер локальної характеристики z -го фрагмента сигналу x^s , k – основа для формування ваг, $k > 0$ (при $p \leq 4$ рекомендується прийняти: $k=2$, при $p > 4$ – прийняти: $k=1$),

$$v_z(x_i^s) = \begin{cases} 0, x_i^s > \tau_z(x^s); \\ 1, x_i^s \leq \tau_z(x^s), \forall x_j^s, i < j < \tau_z^{\text{arg}}(x^s) : x_i^s \leq x_j^s \leq \tau_z(x^s); \\ 0, x_i^s \leq \tau_z(x^s), \exists x_j^s, i < j < \tau_z^{\text{arg}}(x^s) : x_i^s > x_j^s; \\ 1, x_i^s \leq \tau_z(x^s), \forall x_j^s, \tau_z^{\text{arg}}(x^s) > j > i : x_i^s \leq x_j^s \leq \tau_z(x^s); \\ 0, x_i^s \leq \tau_z(x^s), \exists x_j^s, \tau_z^{\text{arg}}(x^s) > j > i : x_i^s > x_j^s; \end{cases}$$

$\tau_z(x^s), \tau_z^{\text{arg}}(x^s)$ – соответственно, значение и номер признака z -го максимума среди $\{x_i^s\}$, $w_{z,k,p}$ – вес локальной характеристики окрестности z -го максимума при p -ом способе формирования весов по основанию k :

$$w_{z,k,p}(x^s) = \begin{cases} k^{z-1}, p = 1; \\ k^{N-z}, p = 2; \\ k \left| \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \{x_i^s\} - z \right|, p = 3; \\ k \left| N - \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \{x_i^s\} - z \right|, p = 4; \\ k(z-1), p = 5; \\ k(N-z), p = 6; \\ k \left| \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \{x_i^s\} - z \right|, p = 7; \\ k \left(N - \left| \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \{x_i^s\} - z \right| \right), p = 8. \end{cases}$$

Достоинством данного подхода к разбиению сигнала на составляющие, в отличие от вейвлет-разложения и преобразования Фурье, является то, что характеристики сигнала анализируются в исходной форме без навязывания ему искусственного базиса.

4. ЛОКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРАГМЕНТА СИГНАЛА В ОКРЕСТНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО МАКСИМУМА

Фрагмент сигнала $\{x_i^s\}_z$ в окрестности z -го максимума (далее используется локальная нумерация отчетов сигнала внутри соответствующего фрагмента, а N' – число отчетов соответствующего фрагмента сигнала) предлагается характеризовать на основе следующих показателей:

– значение z -го максимума: $v_1(\{x_i^s\}_z) = \max_i \{x_i^s\}_z$;

– левое граничное значение z -го фрагмента сигнала:

$$v_2(\{x_i^s\}_z) = x_1^s;$$

– правое граничное значение z -го фрагмента сигнала: $v_3(\{x_i^s\}_z) = x_{N'}^s$;

– длина z -го фрагмента сигнала: $v_4(\{x_i^s\}_z) = N'$;

– разность границ z -го фрагмента сигнала:

$$v_5(\{x_i^s\}_z) = \left| x_{N'}^s - x_1^s \right|;$$

– площадь огибающей z -го фрагмента сигнала [11]:

$$v_6(\{x_i^s\}_z) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\min \{x_{i+1}^s, x_i^s\} + 0,5 \left| x_{i+1}^s - x_i^s \right| \right);$$

– периметр огибающей z -го фрагмента сигнала [11]:

$$v_7(\{x_i^s\}_z) = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1}^s - x_i^s)^2 + 1};$$

– среднее арифметическое значение z -го фрагмента сигнала:

$$v_8(\{x_i^s\}_z) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} x_i^s;$$

– дисперсия (мера рассеяния) z -го фрагмента сигнала:

$$v_9(\{x_i^s\}_z) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left(x_i^s - \sum_{j=1}^{N'} x_j^s \right)^2;$$

– асимметрия z -го фрагмента сигнала:

$$v_{10}(\{x_i^s\}_z) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left(x_i^s - \sum_{j=1}^{N'} x_j^s \right)^3;$$

– эксцесс z -го фрагмента сигнала:

$$v_{11}(\{x_i^s\}_z) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left(x_i^s - \sum_{j=1}^{N'} x_j^s \right)^4;$$

– абсолютный показатель выпуклости z -го фрагмента сигнала:

$$v_{12}(\{x_i^s\}) = \sum_{i=1}^{\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}} \left(\frac{\max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - x_1^s}{\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - 1} (i-1) + x_1^s - x_i^s \right) + \sum_{i=\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}}^{N'} \left(\frac{x_{N'}^s - \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}}{N' - \arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}} (i - \arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}) + \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - x_i^s \right);$$

– средний показатель выпуклости z -го фрагмента сигнала: $v_{12}(\{x_i^s\}) = v_{12}(\{x_i^s\}) / N'$;

– качественный показатель выпуклости z-го фрагмента сигнала:

$$v_{13}(\{x_i^s\}) = \frac{1}{4} \left(2 + \operatorname{sgn} \left(\sum_{i=1}^{\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}} \left(\frac{\max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - x_1^s}{\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - 1} (i-1) + x_1^s - x_i^s \right) \right) + \right. \\ \left. + \operatorname{sgn} \left(\sum_{i=\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}}^{N'} \left(\frac{x_{N'}^s - \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}}{N' - \arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}} (i - \arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}) + \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - x_i^s \right) \right) \right).$$

5. ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРМЫ ОДНОМЕРНОГО СТАЦИОНАРНОГО СИГНАЛА

Данные показатели на основе значений единичных отсчетов сигнала x^s описывают общие свойства сигнала. Форму одномерного стационарного сигнала будем характеризовать с помощью следующих показателей:

– совокупная длина участков возрастания сигнала:

$$I_{\wedge}^s = \sum_{i=1}^{N-1} \{1 | x_{i+1}^s > x_i^s\};$$

– совокупная длина участков убывания сигнала:

$$I_{\vee}^s = \sum_{i=1}^{N-1} \{1 | x_{i+1}^s < x_i^s\},$$

– доля участков неубывания сигнала:

$$I_{\Sigma}^s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau(x_i^s),$$

$$\tau(x_i^s) = \begin{cases} 0, i = 0; \\ 0, i > 1, x_i^s < x_{i-1}^s; \\ 1, i > 1, x_i^s > x_{i-1}^s; \\ \tau(x_{i-1}^s), i > 1, x_i^s = x_{i-1}^s. \end{cases}$$

Данная группа показателей позволяет в целом описать соотношения между длинами участков возрастания и убывания сигнала.

По аналогии с методом потенциалов [10] определим показатели, учитывающие совместное влияние отсчетов сигнала друг на друга:

$$I_1^s = \sum_{i=1}^N x_i^s \left(\sum_{j=1}^N e^{-|i-j| |x_i^s - x_j^s|} \right),$$

$$I_2^s = \sum_{i=1}^N x_i^s \left(\sum_{j=1}^N |x_i^s - x_j^s| e^{-|i-j|} \right),$$

$$I_3^s = \sum_{i=1}^N x_i^s \left(\sum_{j=1}^N e^{-|i-j|} e^{-|x_i^s - x_j^s|} \right),$$

а также показатель, учитывающий положение отсчета относительно максимального значения сигнала:

$$I_4^s = \frac{1}{\max_{j=1,2,\dots,N} \{x_j^s\}} \sum_{i=1}^N x_i^s \left| \arg \max_{j=1,2,\dots,N} \{x_j^s\} - i + 1 \right|.$$

Учет совместного влияния отсчетов сигнала позволяет понизить влияние помех, а также усилить влияние совместно расположенных отсчетов на интегральную характеристику формы сигнала.

Также по аналогии с описанием формы изображений [11] будем характеризовать форму одномерного стационарного сигнала периметром его огибающей:

$$I_{\Pi}^s = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1}^s - x_i^s)^2 + 1}$$

и ее площадью:

$$I_{\int}^s = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\min \{x_{i+1}^s, x_i^s\} + 0,5 |x_{i+1}^s - x_i^s| \right),$$

на основе которых можно определить отношение периметра к площади огибающей сигнала:

$$I_{\%}^s = \frac{I_{\Pi}^s}{I_{\int}^s}.$$

Заметим, что периметр огибающей сигнала характеризует скорость его изменения, а площадь – энергию сигнала.

Также сигнал x^s возможно охарактеризовать с помощью взвешенной суммы его отсчетов:

$$I_{k,p}^s = \sum_{i=1}^N w_{i,k,p} (x^s)_i^s,$$

полагая z при расчете $W_{i,k,p}$:

$$z = \arg \max_{j=1,2,\dots,N} \{x_j^s\}.$$

6. ОТБОР ИСКУССТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ

Для выбора наиболее информативной комбинации из предложенного набора искусственных признаков возможно использовать различные методы отбора признаков [1–4].

При использовании методов фильтрующего типа [4] целесообразно использовать предложенный автором в [12] критерий компактности-отделимости классов:

$$SC = 1 - \exp \left(\frac{\min_{\substack{s \neq p, \\ s=1,2,\dots,S; \\ p=s+1,\dots,S}} \left\{ \sum_{i=1}^N \left\{ (x_i^s - x_i^p)^2 \mid y^s \neq y^p \right\} \right\}}{1 + \min_{\substack{s \neq p, \\ s=1,2,\dots,S; \\ p=s+1,\dots,S}} \left\{ \sum_{i=1}^N (x_i^s - x_i^p)^2 \right\}} \right).$$

Значения показателя SC будут расположены в интервале от нуля до единицы: чем меньше значение критерия, тем более тесно расположены (более сложно разделимы) разные классы и тем менее сконцентрированы экземпляры одного и того же класса.

Из набора сочетаний признаков наиболее предпочтительным будет то сочетание, которое при минимуме используемых признаков максимизирует значение критерия компактности-отделимости классов.

7. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментальной проверки применимости предложенного комплекса показателей было разработано программное обеспечение, интегрируемое со средой пакета MATLAB. Разработанное программное обеспечение использовалось для обработки сигналов и спектров сигналов (перед обработкой данные нормировались) в задачах автоматической классификации растительных объектов [13] (рис. 1), диагностирования рака [14] (рис. 2) и неразрушающего диагностирования лопаток газотурбинных авиадвигателей [15] (рис. 3–4).

На рис. 1, а, 2, а, 3, а и 4, а изображены все экземпляры исходных выборок. Экземпляры разных классов показаны черным и серым цветами, соответственно. Из рис. 1, а, 2, а, 3, а и 4, а легко видеть, что сигналы в каждом исходном наборе признаков сложно разделимы, а сами наборы исходных признаков характеризуются существенной многомерностью. Поэтому для решения соответствующих задач необходимо преобразование исходного набора признаков в искусственный набор, меньшего размера, сохраняющий основные свойства исходных сигналов.

На рис. 1, б, 2, б, 3, б и 4, б представлены соответствующие выборки в пространствах лучших двухпризнаковых

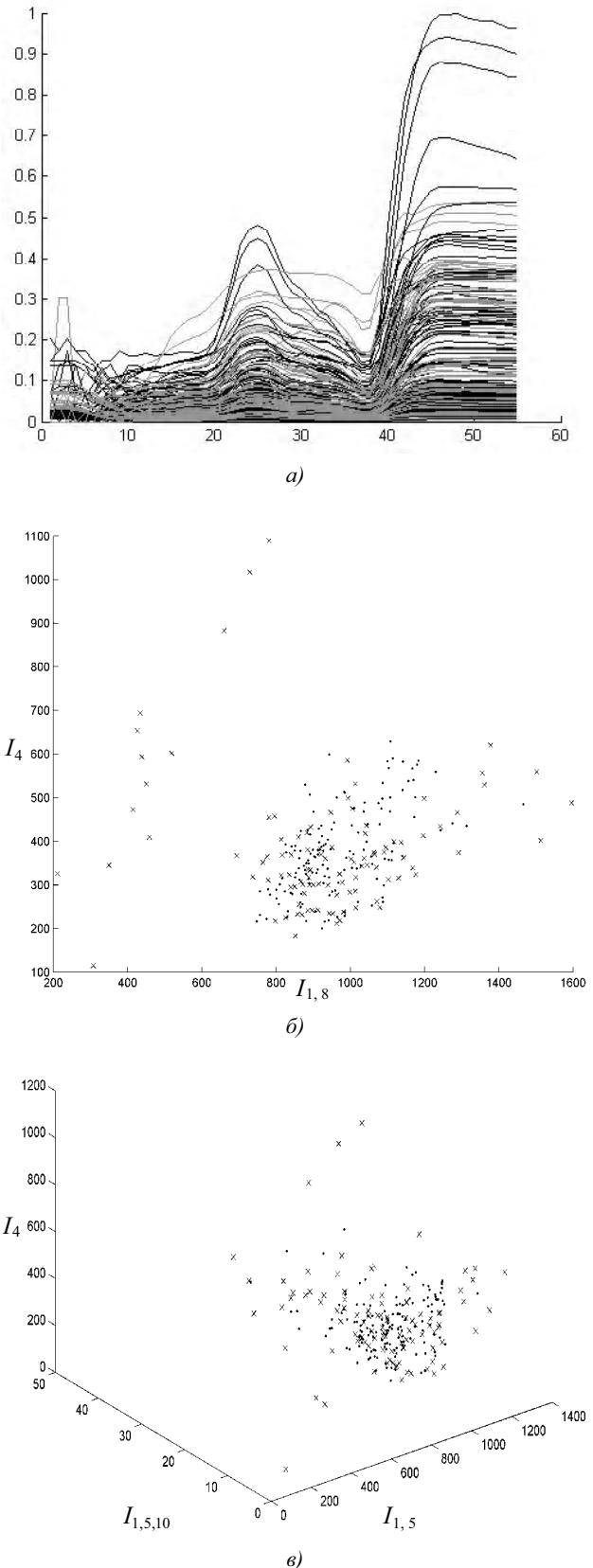


Рис. 1. Выборка в нормализованном исходном (а) и конструктивном двумерном (б) и трехмерном (в) пространствах признаков для задачи автоматической классификации растительных объектов по коэффициентам спектральной яркости

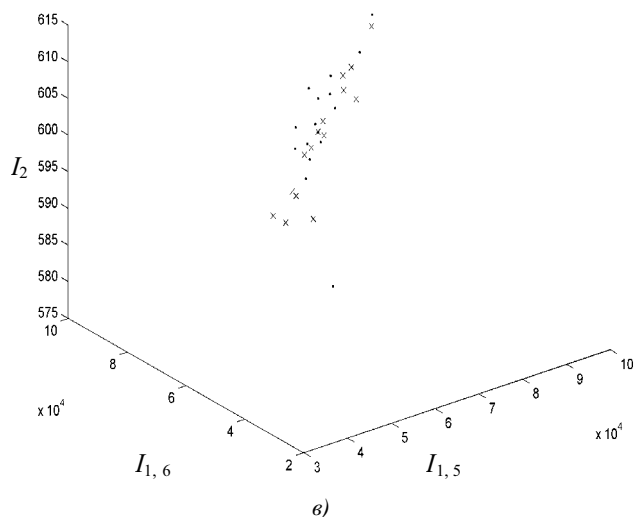
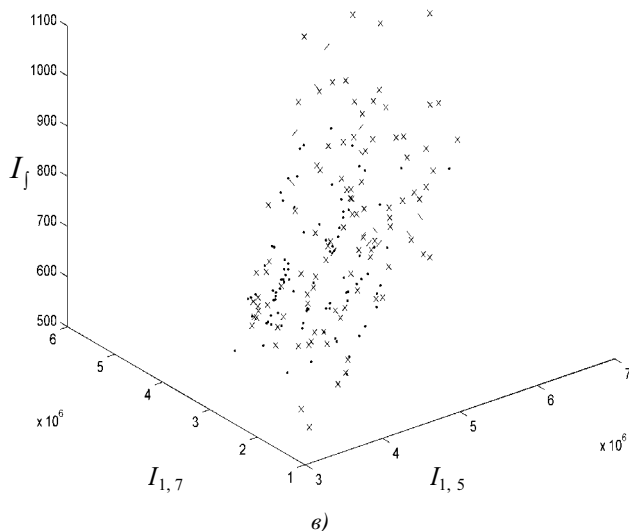
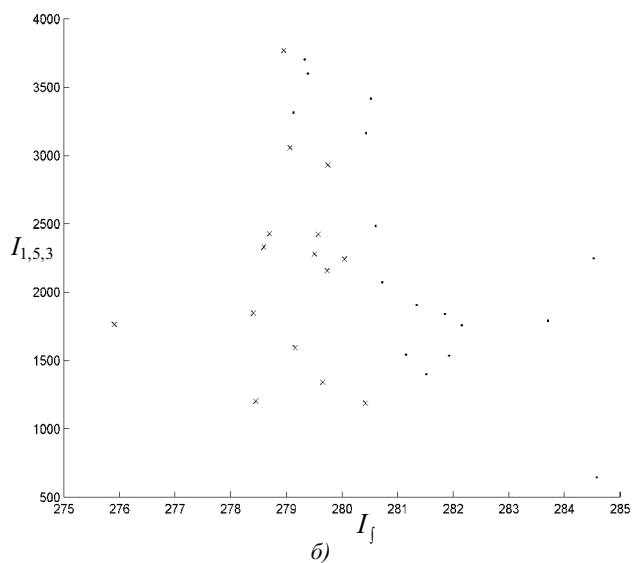
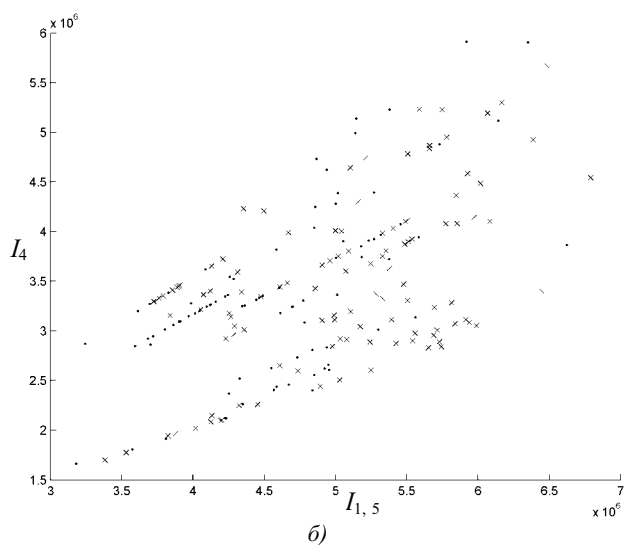
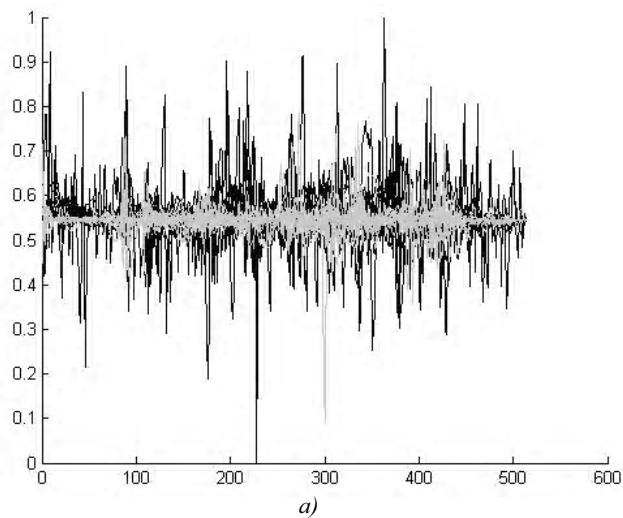
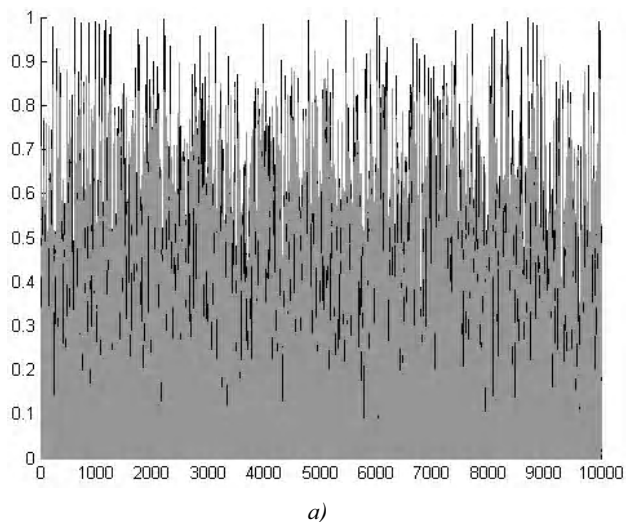


Рис. 2. Выборка в нормализованном исходном (а) и конструктивном двумерном (б) и трехмерном (в) пространствах признаков для задачи диагностирования рака по данным спектрального анализа

Рис. 3. Выборка в нормализованном исходном (а) и конструктивном двумерном (б) и трехмерном (в) пространствах признаков для задачи диагностирования лопаток газотурбинных авиадвигателей по разностям полупериодов свободных затухающих колебаний после ударного возбуждения

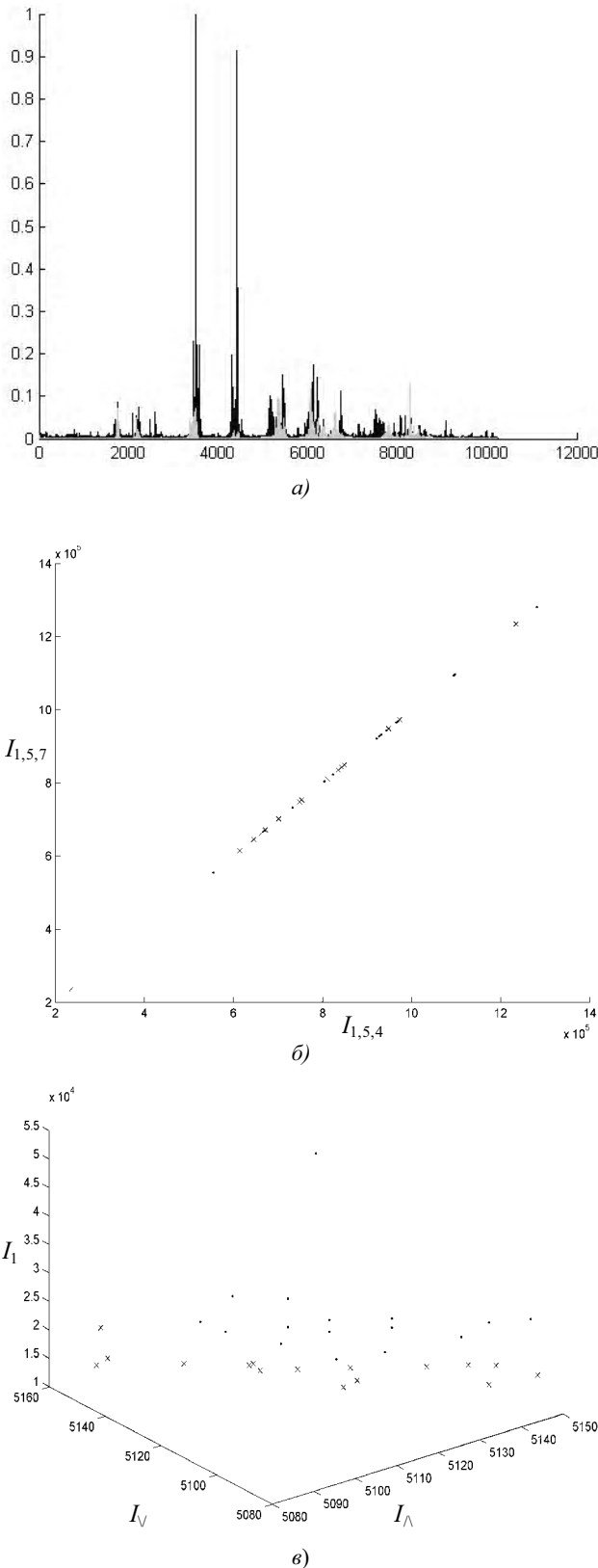


Рис. 4. Выборка в нормализованном исходном (а) и конструктивном двумерном (б) и трехмерном (в) пространствах признаков для задачи диагностирования лопаток газотурбинных авиадвигателей по спектрам свободных затухающих колебаний после ударного возбуждения

сочетаний предложенных показателей по критерию SC , а на рис. 1, в, 2, в, 3, в и 4, в – в пространстве лучших трех-признаковых сочетаний. Экземпляры разных классов показаны маркерами «.» и «x», соответственно. Из рис. 1–4, б–в можно видеть, что предложенные показатели позволяют существенно снизить размерность решаемых задач, обеспечивая при этом также улучшение разделимости классов. Предложенные показатели также могут быть рекомендованы для использования с целью картографирования и визуализации больших массивов сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная задача автоматизации сокращения размерности данных для построения диагностических и распознающих моделей на основе стационарных одномерных сигналов, распределенных во времени.

Научная новизна результатов работы заключается в том, что впервые предложен комплекс показателей, характеризующих свойства сигналов для автоматической классификации объектов, позволяющий существенно сократить описание классифицируемых объектов, уменьшить влияние помех и погрешностей измерений на результаты классификации, сохранить и повысить интерпретабельность синтезируемых распознающих и диагностических моделей.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что: разработано программное обеспечение, реализующее предложенный комплекс показателей и позволяющее решать задачи сокращения описания сигналов для построения распознающих и диагностических моделей; проведены эксперименты по исследованию предложенного комплекса показателей при решении практических задач, подтвердившие его работоспособность и позволяющие рекомендовать его для применения на практике.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в том, чтобы: дополнить предложенный комплекс показателями, позволяющими характеризовать свойства нестационарных, а также многомерных сигналов; исследовать практическую применимость предложенных показателей и реализующего их программного обеспечения при решении широкого класса практических задач распознавания образов, технического и биомедицинского диагностирования.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем «Методы, модели и устройства принятия решений в системах распознавания образов» (№ гос. регистрации 0111U000059) и «Информационные технологии автоматизации распознавания образов и принятия решений для диагностирования в условиях неопределенности на основе гибридных нечеткологических, нейросетевых и мультиагентных методов вычислительного интеллекта» (№ гос. регистрации 0109U007673) Запорожского национального технического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботін, С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моде-

- лей : монографія [Текст] / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.
- Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей : монографія [Текст] / [А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин]; под ред. Д. В. Павленко, С. А. Субботина. – Запорожье : ОАО «Мотор-Сич», 2009. – 468 с.
 - Олійник, А. О.* Еволюційні обчислення та програмування : навчальний посібник [Текст] / А. О. Олійник, С. О. Субботін, О. О. Олійник. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – 324 с.
 - Dash, M.* Feature selection for classification [Text] / M. Dash, H. Liu // *Intelligent data analysis*. – 1997. – №1. – P. 131–156.
 - Huvarinen, A.* Independent component analysis [Text] / A. Huvarinen, J. Karhunen, E. Oja. –New York : John Wiley & Sons, 2001. – 481 p.
 - Lee, J. A.* Nonlinear dimensionality reduction [Text] / J. A. Lee, M. Verleysen. – New York: Springer, 2007. – 308 p.
 - Multifactor dimensionality reduction for detecting haplotype-haplotype interaction [Text] / Y. Jiang, R. Zhang, G. Liu [et al.] // *Fuzzy systems and knowledge discovery : sixth international conference, 14–16 August 2009, Tianjin : proceedings*. – Los Alamitos: IEEE, 2009. – P. 241–245.
 - Оппенгейм, А.* Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М. : Техносфера, 2007. – 856 с.
 - Mallat, S.* A wavelet tour of signal processing: the sparse way [Text] / S. Mallat. – Waltham : Academic Press, 2008. – 832 p.
 - Фор, А.* Восприятие и распознавание образов [Текст] / А. Фор; под ред. Г. П. Катгса. – М. : Машиностроение, 1989. – 271 с.
 - Forsyth, D.* Computer vision: a modern approach [Text] / D. Forsyth, J. Ponce. – New Jersey : Prentice Hall, 2002. – 693 p.
 - Subbotin, S. A.* The training set quality measures for neural network learning / S. A. Subbotin // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2010. – Vol. 19. – № 2. – P. 126–139.
 - The plant recognition on remote sensing results by the feed-forward neural networks / [V. Dubrovin, S. Subbotin, S. Morshchavka, D. Piza] // *Smart Engineering System Design*. – 2001. – № 3. – P. 251–256.
 - Arcene data set [Electronic resource] / I. Guyon. – Access mode: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Arcene>.
 - Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей : монографія [Текст] / [В. И. Дубровин, С. А. Субботин, А. В. Богуслаев, В. К. Яценко]. – Запорожье : ОАО «Мотор-Сич», 2003. – 279 с.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2011.

Субботін С. О.

КОНСТРУЙОВАНІ ОЗНАКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ У ЧАСІ СТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ

Вирішено актуальне завдання автоматизації скорочення розмірності даних для побудови діагностичних і розпізнавальних моделей на основі стаціонарних одновимірних сигналів, розподілених у часі. Уперше запропоновано комплекс показників, які характеризують властивості сигналів, що дозволяє істотно скоротити опис об'єктів, які класифікуються. Проведено експерименти з дослідження запропонованого комплексу показників при вирішенні практичних задач.

Ключові слова: розпізнавання образів, технічне діагностування, ознака, стаціонарний сигнал, витяг ознак.

Subbotin S. A.

CONSTRUCTED FEATURES FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF STATIONARY TIMING SIGNALS

The challenge for automation to reduce the dimension of the data has been solved for the construction of diagnostic and recognizing patterns, based on steady-state one-dimensional signals, distributed in time. The set of indicators characterizing the properties of the signals, which allows to reduce the description of the classified objects is firstly proposed. The experiments on studying of the proposed indicator set at practical problem solving are conducted.

Key words: pattern recognition, technical diagnosis, feature, stationary signal, feature extraction.

УДК 004.832

Ткаченко Р. О.¹, Машевська М. В.²¹Д-р техн. наук, професор Національного університету «Львівська політехніка»²Аспірант Національного університету «Львівська політехніка»

НЕЙРОНЕЧІТКА СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СИНТЕЗУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКА РІВНЯ БІОКОМФОРТУ

Описано процес розроблення математичних моделей за допомогою нейронечіткого моделювання. Розглянуто етапи побудови нечіткої моделі для оцінювання рівня біокомфарту житла.

Ключові слова: нейронечітка система, компактна модель, параметри біокомфарту.

ВСТУП

Оцінювання якості житла на основі показника рівня біокомфарту передбачає визначення відповідності

співвідношення значень основних параметрів середовища проживання до вимог щодо оптимальних умов для збереження здоров'я та рівноваги систем організму лю-

дини в моделі «людина – житлове середовище». Рівень біокомфарту визначається на основі теплових параметрів житлового середовища, показника природного освітлення, а також «фактора впливу» конструкції будинку на організм людини [1]. Тепловий рівень комфорту людини забезпечується оптимальним співвідношенням параметрів мікроклімату: температури повітря, температури внутрішніх поверхонь стін та відносної вологості повітря. Інтенсивність та характер впливу чинників житлового середовища на людину залежать від ступеня її чутливості до коливань значень параметрів біокомфарту та від показника режиму проживання.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Задача оцінювання параметрів біокомфарту передбачає врахування ряду показників, які не можливо отримати прямими методами вимірювання або описати за допомогою імітаційного моделювання. В такому випадку доцільно використати методи нечіткого моделювання для представлення деяких параметрів за допомогою лінгвістичних змінних. В результаті підготовки даних для вирішення задачі оцінювання показника рівня біокомфарту на вході системи маємо набір різнотипних даних, що описують внутрішні параметри житлового середовища та індивідуальні характеристики мешканців. Для розроблення математичних залежностей, які дозволяють представити оцінку сукупного впливу чинників житлового середовища на організм людини у вигляді показника рівня біокомфарту, доцільно застосувати комплексний підхід до побудови моделей, що базується на використанні синтетичної інформації. Формування синтетичного набору даних здійснюється на основі інформації різного походження, зокрема, отриманої одночасно за допомогою імітаційного моделювання, експериментальних даних та висновків експертів. Побудова компактної інформаційної моделі на основі синтетичної вибірки даних, на етапі обчислення вихідних значень показника рівня біокомфарту для відповідних векторів вхідних параметрів, передбачає використання нейронечіткого *T*-контролера, а на етапі розроблення залежності в аналітичному вигляді – нейромережевого генератора формул.

РОЗРОБЛЕННЯ НЕЙРОНЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ БІОКОМФОРТУ

На етапі передбачення значень показника рівня біокомфарту на основі вхідних параметрів житлового середовища розроблено нечітку модель для *T*-контролера. Функціонування *T*-контролера нечіткої логіки, що реалізується в програмному середовищі *T-Controller Workshop* [2], передбачає три етапи: фазифікацію змінних, логічне виведення на основі бази правил та дефазифікацію вихідного значення. Особливістю такого контролера є нейромережевий метод дефазифікації, що здійснюється на основі навчання нейроподібних структур моделі геометричних перетворень (МГП) [3]. Такий метод дефазифікації забезпечує нульову методичну похибку перетворення для відомих точних значень на вході, тобто похибка результату

залежить лише від точності обчислення відповідних функцій належності. Перевагою *T*-контролера є підвищена точність функціонування і можливість розв’язання завдань з багатьма вхідними параметрами.

Розроблення контролера в програмному середовищі *T-Controller Workshop* можливе в двох варіантах: побудова з використанням введеного користувачем опису нечіткої моделі та створення на основі табличних даних. В процесі вирішення задачі оцінювання рівня біокомфарту розглядається варіант введення опису нечіткої моделі у відповідні поля робочого інтерфейсу програмного пакету *T-Controller Workshop* (рис. 1).

- Вхідними параметрами розробленої нечіткої моделі є:
- T_{in} – температура повітря всередині приміщення – з базовою терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [13, 27];
 - dt – максимальний перепад температур повітря і внутрішніх поверхонь стін – з терм-множиною {«low», «high»} на універсальній множині [1, 6];
 - RH – показник відносної вологості повітря – з терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [35, 80];
 - $sens$ – ступінь чутливості людини до впливів зовнішніх чинників – з терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [0, 1];
 - res – режим проживання людини – з терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [1, 3];
 - y – показник впливу житлового середовища на людину – з терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [200, 2500];
 - $insol$ – ступінь природного освітлення – з терм-множиною {«low», «high»} на універсальній множині [0,1, 0,5];

Виходом контролера є параметр *PLC* (Predicted Level of Comfort) – передбачене значення рівня біокомфарту в житловому середовищі – з терм-множиною {«very_low», «low», «med», «high», «very_high»}, терми якої відповідають чітким значенням «1», «2», «3», «4» та «5» рівнів біокомфарту.

Визначення чітких значень термів лінгвістичних змінних нечіткої моделі, побудова функцій належності, формування правил нечіткої логіки виконується на ос-

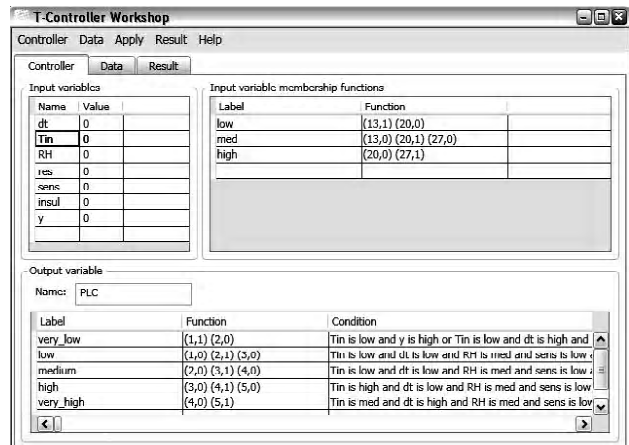


Рис. 1. Розробка нечіткого контролера в середовищі *T-Controller Workshop*

нові інформації від експертів, даних від обстеження кількох малоповерхових житлових будинків та проведених опитувань мешканців з метою визначення ступеня їх задоволення та відчуття комфорту перебування тривалий час в житловому середовищі.

Сформовані набори правил, згідно вимог *T*-контролера [2], записуються у стовпці *Condition* (рис. 1) у такому вигляді (для умови *PLC is very_low*):

T_{in} is low and y is high or T_{in} is low and dt is high and RH is low and y is med or T_{in} is low and dt is low and RH is low and sens is high and y is med or ...

Для тестування розробленого нечіткого контролера на його входи подавалися вектори значень параметрів біокомфарту у житловому середовищі. На виході контролера було одержано передбачені числові значення показника рівня біокомфарту в малоповерхових будинках відповідно до введених вхідних даних (табл. 1).

ПОБУДОВА КОМПАКТНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

На основі векторів числових співвідношень, отриманих за допомогою *T*-контролера, потрібно розробити математичну модель в компактному аналітичному вигляді, що описує залежність показника рівня біокомфарту від параметрів житлового середовища та індивідуальних характеристик мешканців. Для задачі оцінювання рівня біокомфарту доцільно розробити раціонально-дробову функцію у вигляді формули Паде, що дозволяє отримати високу точність моделювання завдяки методу апроксимації. В класичному трактуванні, апроксимація Паде є функцією у вигляді відношень двох поліномів, коефіцієнти яких визначаються коефіцієнтами розкладу функції в ряд Тейлора [4]. Обмеження, що виникають під час використання методу, успішно вирішуються за допомогою нейроподібних моделей геометричних перетворень. З цієї причини для розроблення математичних моделей для оцінювання рівня біокомфарту доцільно використати нейромеревий генератор формул *Sapientware.Equo 2.1*.

В основі процесу розроблення математичних залежностей є навчання нейроподібних моделей [5]. Вид генерованої формули залежить від вибраної для навчання нейромоделі функції активації. У нашому випадку, вихідна залежність буде у вигляді лінійного поліному Паде. Для оптимізації згенерованих залежностей використано метод «імітації відпалу металу», що дозволив покращити результат відповідно до похибки *MAPE* (mean absolute

percentage error) на 7 %. Результати генерації поліному можна розглянути у спеціальному вікні робочого інтерфейсу програми (рис. 2).

На етапі генерації формули виявилось необхідним розбиття вхідних даних на два набори вхідних векторів, відповідно до температури повітря в приміщенні. Таким чином, модель обчислення показника рівня біокомфарту має такий вигляд:

$$PLC = \begin{cases} f_1(X), & \text{якщо } T_{in} < 21^\circ\text{C} \\ f_2(X), & \text{якщо } T_{in} \geq 21^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (1)$$

де *PLC* – показник рівня біокомфарту; *T_{in}* – температура повітря в житловому середовищі, °C; *f₁(X)* і *f₂(X)* – лінійні поліноми Паде, що описують залежності показника рівня біокомфарту від вхідного вектора параметрів житла *X* = {*T_{in}*, *Δt*, *φ*, *sens*, *res*, *γ*, *insol*}, відповідно до температури повітря всередині.

В результаті генерації поліномів були одержані коефіцієнти для залежностей *f₁(X)* і *f₂(X)*, які в загальному випадку можна записати так:

$$f(X) = \frac{a_0 + a_1 T_{in} + a_2 \Delta t + a_3 \phi + a_4 sens + a_5 res + a_6 \gamma + a_7 insol}{1 + b_1 T_{in} + b_2 \Delta t + b_3 \phi + b_4 sens + b_5 res + b_6 \gamma + b_7 insol}, \quad (2)$$

де *T_{in}* – температура повітря у житловому середовищі, °C; *Δt* – максимальний перепад між температурою повітря та температурою внутрішніх поверхонь стін, °C; *φ* – відносна вологість повітря, %; *sens* – рівень чутливості мешканця (або групи мешканців); *res* – режим про-

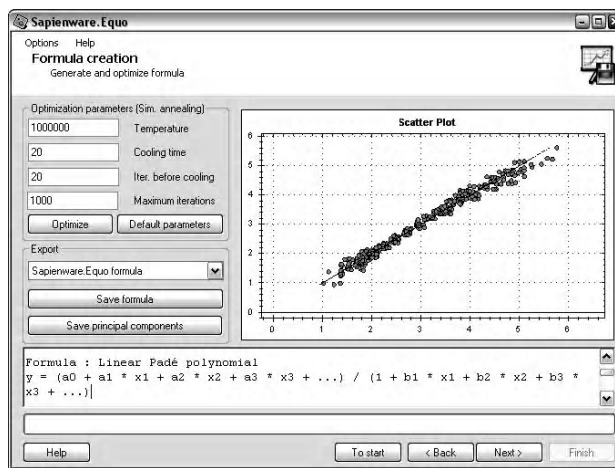


Рис. 2. Вікно статистичних результатів генерування залежності нейромеревим генератором формул Equo

Таблиця 1. Результати оцінювання рівня біокомфарту нечітким *T*-контролером

<i>T_{in}</i> , °C	<i>Δt</i> , °C	<i>φ</i> , %	<i>sens</i>	<i>res</i>	<i>y</i> , Вт/кг	<i>insol</i>	<i>PLC</i>
16	5,43	69	1	2	1799	0,22	1,68
15,5	4,55	38	0,5	3	935	0,11	1,94
17	1,87	70	0	3	530	0,17	3,27
20	1,48	47	1	2	641	0,32	4,65
19,5	2,24	50	0,5	3	688	0,34	4,39
18,5	1,4	60	1	3	450	0,27	3,99

живання людей; γ – показник теплового впливу будинку на людину, Вт/кг; *insol* – степiнь природного освiтлення житлового середовища; ($a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7$) i ($b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6 b_7$) – коефiцiєнти полiному Паде.

Так, для експлуатацiйних умов з температурою повітря $T_m < 21^\circ\text{C}$ (для $f_1(X)$) коефiцiєнти полiному: $a_0 = 416,73$; $a_1 = -56,03$; $a_2 = 7,51$; $a_3 = -1,88$; $a_4 = 69,62$; $a_5 = 38,52$; $a_6 = 0,04$; $a_7 = -360,02$; $b_1 = -5,40$; $b_2 = -6,90$; $b_3 = -0,46$; $b_4 = -4,25$; $b_5 = -0,19$; $b_6 = -0,05$; $b_7 = -1,08$.

Коефiцiєнти математичної залежності $f_2(X)$, для експлуатацiйних умов з температурою повітря $T_m \geq 21^\circ\text{C}$, ϵ : $a_0 = 126,3$; $a_1 = -2,01$; $a_2 = -0,26$; $a_3 = -0,15$; $a_4 = -19,38$; $a_5 = 0,008$; $a_6 = -0,01$; $a_7 = 30,75$; $b_1 = 0,65$; $b_2 = 0,83$; $b_3 = -0,004$; $b_4 = -2,86$; $b_5 = 0,53$; $b_6 = 0,002$; $b_7 = -2,31$.

За допомогою розробленої моделі (1) можна оцiнити рiвень бiокомфiрту, вiдповiдно до вхiдних показникiв, що характеризують певне житлове середовище. Так, якщо температура повітря $\epsilon 20^\circ\text{C}$, максимальний перепад між температурою повітря та температурою внутрiшніх поверхонь стiн $\epsilon 1,5^\circ\text{C}$, вiдносна вологiсть повітря 55 %, показник «шкiдливого впливу будинку» рiвний 578 Вт/кг, показник природного освiтлення 0,24, для людини з високим ступенем чутливостi до впливiв бiокомфiртних чинникiв середовища за умови 1-го режиму проживання показник бiокомфiрту $PLC = 4,24$, що вiдповiдає 4 рiвню.

ВИСНОВКИ

Використання методiв нейронечiткого моделювання для вирiшення задачi оцiнювання рiвня бiокомфiрту в малоповерхових будинках дозволило на етапi пiдготовки даних врахувати експериментальнi данi разом з висновками експертiв, що забезпечило можливiсть розширення кiлькостi вхiдної iнформацiї для моделi. Побудована компактна математична модель, у виглядi формули Паде, для оцiнювання показника рiвня бiокомфiрту на основi попереднього нейронечiткого моделювання, дозволила в бiльш широкому спектрi врахувати вплив чинникiв житлового середовища на органiзм людини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ткаченко, Р. О.* Інтелектуалізована система оцінювання параметрів біокомфiрту примiщення / Р. О. Ткаченко,

М. В. Машевська // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2010. – № 710 – С. 133–138.

2. Rule-based fuzzy system of improved accuracy / O. Tkachenko, R. Tkachenko, Yu. Hirniak, O. Ivakhiv, P. Mushenyk // Materials of 56th International scientific colloquium (Ilmenau University of Technology, 12–16 September 2011). – Ilmenau : TU Ilmenau, 2011. – 25 p.
3. *Ткаченко, Р. О.* Нова парадигма штучних нейронних мереж прямого поширення / Р. О. Ткаченко // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 1999. – № 386 – С. 43–54.
4. *Бейкер, Дж.* / Дж. Бейкер, мл., П. Грейвс-Моррис ; пер. с англ. Е. А. Рахманова, С. П. Суєтина ; ред. А. А. Гончар. – М. : Мир, 1986. – 502 с.
5. *Ткаченко, Р. О.* Елементи архітектури для інтелектуальної системи побудови математичної моделі прогнозування рівня теплового комфорту / Р. О. Ткаченко, М. В. Машевська // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України : збірник науково-технічних праць. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2011. – Вип. 21.10. – С. 284–290.

Стаття надійшла до редакції 19.02.2012.

Ткаченко Р. А., Машевская М. В.

НЕЙРОНЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ УРОВНЯ БИОКОМФОРТА

Описано процесс разработки математических моделей при помощи нейронечеткого моделирования. Рассмотрены этапы разработки нечеткой модели для оценивания уровня биокomфорта жилья.

Ключевые слова: нейронечеткая система, компактная модель, параметры биокomфорта.

Tkachenko R., Mashevskaya M.

NEURO-FUZZY SYSTEM FOR AUTOMATION SYNTHESIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR EVALUATING AN INDEX OF LEVEL OF BIOCOMFORT

The process of creating the mathematical model by the neuro-fuzzy modeling is described. The stages of construction of the fuzzy model to evaluating the level of biocomfort of habitation are considered.

Key words: neuro-fuzzy system, compact model, parameters of biocomfort.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIV INFORMATICS TECHNOLOGIES

УДК 004.9

Вершина О. І.¹, Киричек Г. Г.²

^{1,2} Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ НАВЧАННЯ

Досліджено різноманітні варіанти впливу взаємозалежних дисциплін на процес отримання знань з метою подальшого використання отриманих показників в системі інформаційної підтримки навчання.

Ключові слова: інформаційна система, дисципліна, навчальний процес, ймовірність, інформаційний ресурс.

ВСТУП

З аналізу літературних джерел [1–5] відомо, що більшість перших електронних навчальних видань були копіями друкованих видань і не враховували комп'ютерних можливостей подачі матеріалу. Однак тепер, з метою створення підручників нового типу, значна увага приділяється розробці комп'ютерних навчальних посібників. Тому для того, щоб електронний посібник якнайкраще відповідав пропонованим вимогам, необхідно, щоб він об'єднував в собі функції підручника і довідково-інформаційного посібника, консультанта і програми, яка контролює знання. Для рішення цієї задачі треба використовувати системний підхід до розробки навчального матеріалу у вигляді електронних посібників, враховуючи ієрархію класів навчального процесу.

На даний час інформаційні ресурси вищих навчальних закладів (ВНЗ) характеризуються неповним представленням навчального матеріалу та недостатнім розподілом його за видами навчальної діяльності. В процесі розробки та впровадження систем інформаційної підтримки недостатньо враховується взаємозалежність дисциплін та її вплив на процес навчання.

Згідно Указу Президента України № 926 «Про заходи щодо забезпечення пріоритетного розвитку освіти в Україні» 2011 рік в Україні оголошено Роком освіти та інформаційного суспільства. На Всеукраїнській науково-практичній конференції «Модернізація освіти в умовах роз-

витку інформаційного суспільства», яка пройшла в м. Києві 28 квітня 2011 року обговорювалися питання застосування інформаційних технологій в освіті, створення системи електронних бібліотечних ресурсів за рівнями освіти, використання у навчальному процесі засобів інформатизації з метою оптимізації навчального процесу, формування єдиного освітнього інформаційного простору на всіх рівнях здобуття освіти. Тому дослідження процесів формування та підтримки навчальних інформаційних ресурсів, різного ступеня структурованості, для науково-освітніх процесів, в інтегрованих інформаційних системах ВНЗ, є одним із складних і перспективних науково-технічних завдань.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Широкий спектр робіт, які виконують студенти в процесі вивчення окремих дисциплін, складається з лекцій, семінарів, контрольних, самостійних, тестових, лабораторних, практичних і курсових робіт. Також кожна дисципліна представлена сукупністю тверджень у вигляді масиву інформаційних блоків (одиниць). Кожна одиниця є відповіддю на контрольне питання з окремої дисципліни.

Раніше складна система навчання була представлена, як багаторівнева конструкція взаємодіючих між собою та із зовнішнім середовищем елементів [6], а кафедри одного з інститутів – сукупністю дисциплін $D_1 - D_n$, які викладаються студентам наведених спеціальностей. Виходячи з цього, розіб'ємо вивчення кожної дисципліни

на відповідні модулі, а вивчення кожного елемента такої структури пов'язано з пошуковим запитом до інформаційного ресурсу, який у загальному випадку можна представити у вигляді деревоподібної структури, де листами, власне, є інформаційні ресурси з їх атрибутами, а гілки відображають переходи між вузлами. Корінь такого дерева – навігація по єдиному простору всієї інформаційної системи. Ця модель спрощує роботу пошукового модулю інформаційної системи, але не враховує деякі недоліки, які пов'язані з отриманням великого масиву інформації в процесі пошуку.

Виходячи з архітектури системи інформаційного забезпечення з її основними класами, об'єктами та їх атрибутами, клас об'єктів можна представити у вигляді сукупності масивів інформаційних одиниць. Кожен з масивів при цьому є інформаційним об'єктом, який відноситься до однієї з дисциплін, які вивчаються в процесі навчання.

Розглянемо процес вивчення кожної дисципліни та представимо його взаємозв'язком етапів навчання та перевірки знань. При різних варіантах взаємозв'язку дисциплін у процесі навчання одержимо різні значення якості та витрат.

Одержання інформації та переробку її в процесі вивчення дисципліни і процес навчання розглянемо як різні процеси. При цьому процес навчання представимо як сукупність дій з отриманням та перевіркою знань.

Процес вивчення модуля дисципліни складається з наступних подій:

- запит (подія *A*);
- одержання інформації, яка відповідає запиту, та її засвоєння (подія *B*);
- одержання інформації, яка відповідає запиту, та її незасвоєння (подія *C*);
- одержання інформації, яка не відповідає запиту, та помилкове вивчення матеріалу (подія *D*).

Далі проводимо аналіз одержаної інформації та перевірку засвоєного матеріалу. Після цього маємо можливі наступні стани:

- інформація, яка відповідає запиту, засвоєна і перевірка знань це підтвердила (подія *E*);
- інформація, яка відповідає запиту, засвоєна, а перевірка знань це не підтвердила (подія *F*);
- інформація, яка відповідає запиту, не засвоєна і перевірка знань це підтвердила (подія *G*);
- інформація, яка відповідає запиту, не засвоєна, а перевірка знань це не підтвердила (подія *H*);
- інформація, яка не відповідає запиту, засвоєна і це підтверджується перевіркою знань (подія *I*);
- перевірена інформація не відповідає запиту і відновлюється процес її пошуку (подія *J*).

Перелік подій приводить до наступних станів навчання:

- стан 1 – сума подій *A, F, G, I, J*;
- стан 2 – подія *B*;
- стан 3 – сума подій *C і D*;
- стан 4 – подія *E*;
- стан 5 – сума подій *H*.

Між виділеними станами маємо наступні переходи, які будемо визначати постійними ймовірностями:

- перехід зі стану 1 у стан 2 визначається ймовірністю K_0 ;
- перехід зі стану 1 у стан 3 визначається ймовірністю $1 - K_0$;
- перехід зі стану 2 у стан 4 визначається ймовірністю A ;
- перехід зі стану 2 у стан 1 визначається ймовірністю $1 - A$;
- перехід зі стану 3 у стан 5 визначається ймовірністю \bar{A} ;
- перехід зі стану 3 у стан 1 визначається ймовірністю $1 - \bar{A}$.

На виході процесу – два завершальні стани 4 і 5.

Вище наведена гіпотеза дозволяє розглянути навчання як поглинаючий ланцюг Маркова та визначити таку характеристику процесу навчання як ймовірність завершення процесу одержання знань K . Вона означає ймовірність того, що одержана інформація відповідає запиту, засвоєна і перевірка це підтвердила:

$$K = \frac{K_0 A}{1 - (1 - K_0)A - K_0(1 - A)} \quad (1)$$

Крім того, маємо оцінку кількості ітерацій n , яка відображає затрати на навчання:

$$n = \frac{1}{1 - (1 - K_0)A - K_0(1 - A)} \quad (2)$$

У більшості випадків вивчення різних дисциплін розглядається окремо як незалежні процеси. В той же час врахування взаємного впливу для деяких дисциплін може суттєво вплинути на ефективність навчання.

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Візьмемо за основу перший варіант (рис. 1), якому відповідає відсутність безпосереднього зв'язку між розділами (модулями, темами) дисциплін. D_1 і D_2 – дисципліни

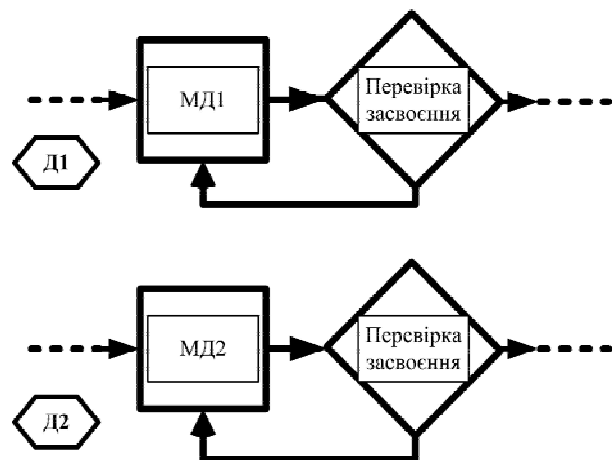


Рис. 1. Структура відсутності зв'язку між розділами дисциплін

ліни, що вивчаються та є об'єктами дослідження, а MD_1 і MD_2 – модуль дисципліни або сукупність модулів (тем, розділів), які вивчаються в цих дисциплінах, відповідно.

Згідно з виразами (1) і (2) для першої дисципліни маємо:

$$K_{д1} = \frac{K_{0д1} A_{д1}}{1 - (1 - K_{0д1}) \bar{A}_{д1} - K_{0д1} (1 - A_{д1})};$$

$$n_{д1} = \frac{1}{1 - (1 - K_{0д1}) \bar{A}_{д1} - K_{0д1} (1 - A_{д1})}, \quad (3)$$

а для другої дисципліни:

$$K_{д2} = \frac{K_{0д2} A_{д2}}{1 - (1 - K_{0д2}) \bar{A}_{д2} - K_{0д2} (1 - A_{д2})};$$

$$n_{д2} = \frac{1}{1 - (1 - K_{0д2}) \bar{A}_{д2} - K_{0д2} (1 - A_{д2})}, \quad (4)$$

де позначення з індексами «д1» відповідають першій дисципліні, а з індексом «д2» – другій дисципліні.

Якщо вважати, що обсяги досліджуваного матеріалу модулів дисциплін D_1 і D_2 приблизно однакові і час, який надається на вивчення дисципліни або окремого модуля (теми, розділу) та перевірку знань, теж однаковий, то ймовірності засвоєння матеріалу для модулів дисциплін D_1 і D_2 і ймовірності перевірки одержаних знань будуть приблизно однакові, тобто

$$K_{0д1} = K_{0д2} = K_0; A_{д1} = A_{д2} = A; \bar{A}_{д1} = \bar{A}_{д2} = \bar{A}. \quad (5)$$

В результаті отримаємо:

$$K = K_{д1} = K_{д2} = \frac{K_0 A}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)};$$

$$n = n_{д1} = n_{д2} = \frac{1}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)}; \quad (6)$$

$$K_1 = K^2 = \left[\frac{K_0 A}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)} \right]^2; \quad (7)$$

$$n_1 = 2n = 2 \frac{1}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)}. \quad (8)$$

Розглянемо варіанти (а–е) впливу модуля (теми, розділу) дисципліни D_2 на етапи вивчення модуля (теми, розділу) дисципліни D_1 (рис. 2):

– результат вивчення модуля (теми, розділу) дисципліни D_2 враховується при перевірці знань модуля D_1 (а);

– результат вивчення модуля (теми, розділу) дисципліни D_2 враховується при вивченні модуля D_1 (б);

– вивчення модуля дисципліни D_1 погоджено з вивченням модуля дисципліни D_2 (в);

– перевірка знань модуля дисципліни D_1 погоджена з вивченням модуля дисципліни D_2 (г);

– вивчення модуля дисципліни D_1 погоджено з перевіркою знань модуля дисципліни D_2 (д);

– перевірка знань модуля дисципліни D_1 погоджена з перевіркою знань модуля дисципліни D_2 (е).

Кожний з перерахованих варіантів призводить до зміни ймовірностей якісного вивчення і якісної перевірки знань дисципліни D_1 .

Варіанти множинного зв'язку між розділами дисциплін дають можливість оцінити наступні параметри для кожного з варіантів:

– у випадку а), наведеному на рис. 2, маємо:

$$A_{д1} = A + (1 - A)K; \bar{A}_{д1} = \bar{A} + (1 - \bar{A})K; \quad (9)$$

– для б) отримаємо:

$$K_{д1} = K_0 + (1 - K_0)K; \quad (10)$$

– для в) отримаємо:

$$K_{д1} = K_0 + (1 - K_0)K_0; \quad (11)$$

– для г) отримаємо:

$$A_{д1} = A + (1 - A)K_0; \bar{A}_{д1} = \bar{A} + (1 - \bar{A})K_0; \quad (12)$$

– для д) отримаємо:

$$K_{д1} = K_0 A + (1 - K_0) \bar{A}; \quad (13)$$

– для е) отримаємо:

$$A_{д1} = A + (1 - A)A; \bar{A}_{д1} = \bar{A} + (1 - \bar{A})\bar{A}. \quad (14)$$

Проведемо кількісну оцінку для різних варіантів взаємного впливу структурних об'єктів двох дисциплін. При цьому будемо вважати, що ймовірність перевірки засвоєних знань дорівнює одиниці, тобто $A = 1$, а обсяги загальних витрат за рахунок неякісного навчання в остаточному підсумку будуть дорівнювати

$$Z_i = n_i \frac{1}{K_i}, \quad (15)$$

де індекс i пов'язаний з розглянутими варіантами взаємодії, а величина $\frac{1}{K_i}$ оцінює та визначає той факт, що, в остаточному підсумку, неякісне навчання буде виявлятися на більш пізніх етапах, тому це призведе до додаткових витрат.

Якщо вважати, що в нескінченно малому проміжку часу ймовірності засвоєння (одержання) та перевірки

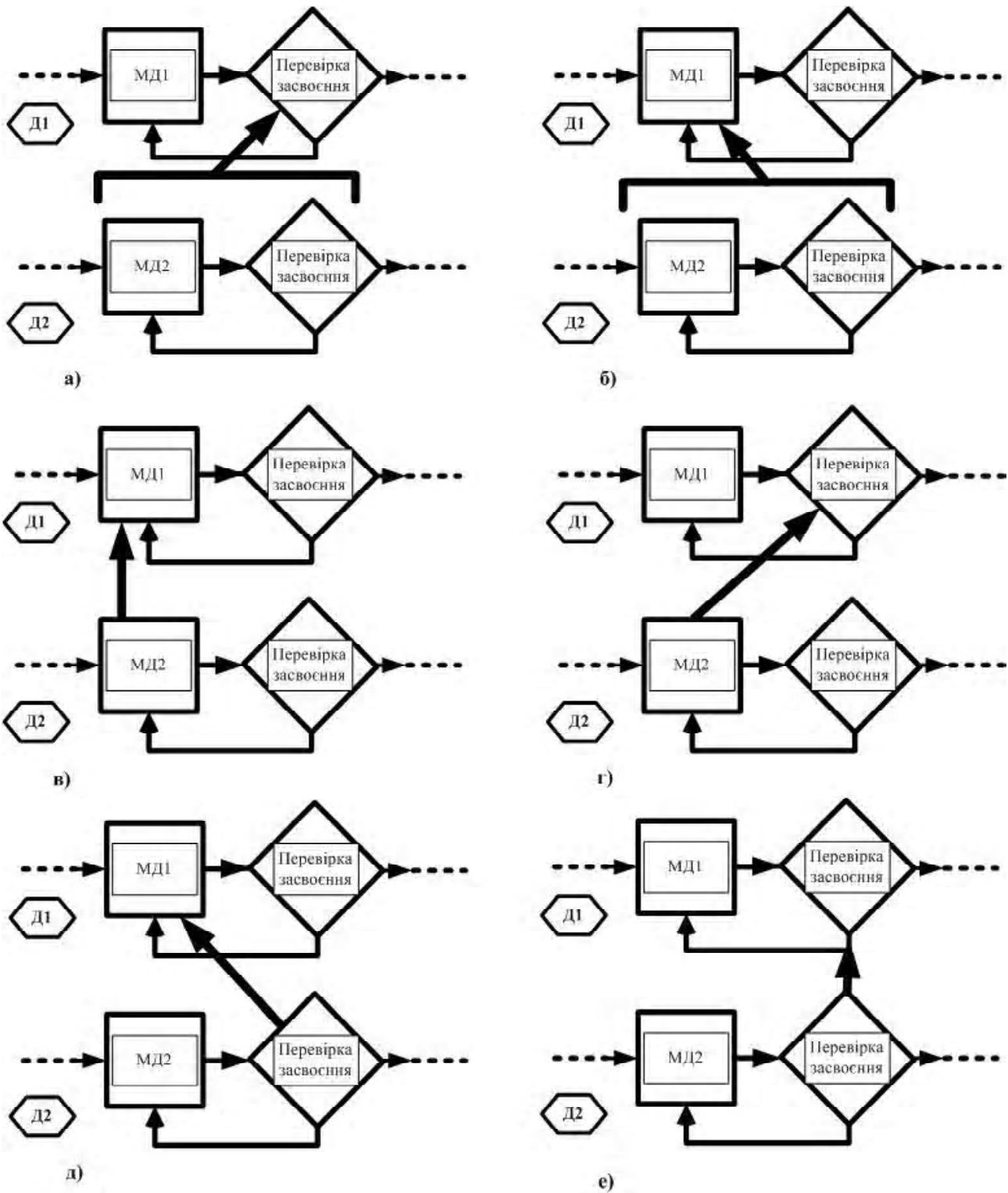


Рис. 2. Варіанти множинного зв'язку між розділами дисциплін

знань пропорційні величині цього проміжку, то щільність розподілу часу як для процесу засвоєння знань (одержання, переробка та запам'ятовування інформаційного блоку), так і для процесу перевірки знань (відповіді на контрольні або тестові запитання) буде представляти експонентний закон розподілу.

При виділенні для процесів засвоєння та перевірки знань часу, який дорівнює очікуваному, будемо мати:

$$K_0 = e^{-1} = 0,37; \bar{A} = e^{-1} = 0,37. \quad (16)$$

Результати оцінки зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати оцінки процесів засвоєння та перевірки знань

Варіант	Параметри етапів D_1	Параметри модуля D_1	Параметри етапів D_2	Параметри модуля D_2	K_i	n_i	Z_i	$\frac{Z - Z_i}{Z} 100\%$
	$K_{0,д1} = 0,37$ $\bar{A} = 0,37$	$K_{д1} = 0,48$ $n_{д1} = 1,31$	$K_{0,д2} = 0,37$ $\bar{A}_{д2} = 0,37$	$K_{д2} = 0,48$ $n_{д2} = 1,31$	0,23	2,62	11,40	–
а	$K_{0,д1} = 0,37$ $\bar{A} = 0,67$	$K_{д1} = 0,64$ $n_{д1} = 1,73$			0,31	3,04	9,81	13,95
б	$K_{0,д1} = 0,67$ $\bar{A} = 0,37$	$K_{д1} = 0,8$ $n_{д1} = 1,19$			0,38	2,50	6,57	42,37
в	$K_{0,д1} = 0,6$ $\bar{A} = 0,37$	$K_{д1} = 0,7$ $n_{д1} = 1,17$			0,34	2,48	7,29	36,05
г	$K_{0,д1} = 0,37$ $\bar{A} = 0,6$	$K_{д1} = 0,59$ $n_{д1} = 1,61$			0,28	2,92	10,43	8,51
д	$K_{0,д1} = 0,6$ $\bar{A} = 0,37$	$K_{д1} = 0,7$ $n_{д1} = 1,17$			0,34	2,48	7,29	36,05
е	$K_{0,д1} = 0,37$ $\bar{A} = 0,6$	$K_{д1} = 0,59$ $n_{д1} = 1,61$			0,28	2,92	10,43	8,51

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто безліч різних варіантів взаємного впливу суміжних дисциплін у процесі їхнього вивчення. З них виявлені основні, які досить просто реалізуються в системах інформаційної підтримки навчального процесу. Урахування взаємного впливу призводить до одержання позитивних характеристик якості отримання знань, що підтверджується результатами досліджень. Надалі потрібен розгляд даних характеристик з урахуванням множини дисциплін при одержанні однієї зі спеціальностей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Максимович, Г. И. Электронные библиотеки / Максимович Г. И. // Делопроизводство. – 2001. – № 1. – С. 85–89.
2. Згуровський, М. З. Основи системного аналізу : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова. – К. : Видавнича група ВНУ, 2007. – 543 с.
3. Биков, В. Ю. Модели організаційних систем відкритої освіти = Models of the Education Organizational Systems : монографія / В. Ю. Биков. – К. : Атіка, 2009. – 682 с.
4. Баркова, О. В. Досвід створення наукової електронної бібліотеки в Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського / О. В. Баркова // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2001. – Т. 3, № 4. – С. 51–62.
5. Антопольский, А. Б. Формирование Национальной электронной библиотеки и проблемы выбора базовых принципов организации фонда электронных документов / А. Б. Антопольский,

Т. В. Майстрович, А. В. Чугунов // Национальная электронная библиотека : Проекты методических материалов по формированию фонда / Российская государственная библиотека. – С. Пб., 2004. – С. 3–13.

6. Киричек, Г. Г. Керування інформаційними потоками на всіх рівнях ієрархії отримання знань / Г. Г. Киричек // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1. – С. 70–78.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2011.

Вершина А. И., Киричек Г. Г.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОБУЧЕНИЯ

Исследованы разнообразные варианты влияния взаимозависимых дисциплин на процесс получения знаний с целью дальнейшего использования полученных показателей в системе информационной поддержки обучения.

Ключевые слова: информационная система, дисциплина, учебный процесс, вероятность, информационный ресурс.

Vershina A. I., Kirichek G. G.

MODEL SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT FOR LEARNING

Investigated the influence of different variants of interdependent disciplines to the process of acquiring knowledge for future use, the resulting figures in the system of information support of learning.

Key words: information system, discipline, learning process, probability, information resource.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ

Представлено унифицированное описание процессов в типовых блоках и в спутниковой системе как процесса развития нештатных ситуаций, так и процесса их парирования. Кроме того, предложена четырехуровневая схема параметризации прямых признаков отказов. Изложены модели и средства восстановления работоспособности спутниковых систем.

Ключевые слова: спутниковая система ориентации и стабилизации, избыточность, датчики.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное и качественное выполнение полетных заданий малыми космическими аппаратами во многом определяется способностью бортовых управляющих систем, к числу которых относятся спутниковые системы ориентации и стабилизации, выполнять целевые функции, как в штатных условиях, так и при возникновении нештатных ситуаций [1].

Нештатная ситуация – это такое состояние функционирования спутниковой системы ориентации и стабилизации (ССОС), когда появляется нерасчетное отклонение характеристик от номинального режима, обусловленного техническим заданием. Причину, приводящую к появлению нештатных ситуаций, называют уже устоявшимся в специальной литературе последних лет обобщенным термином – отказ.

Современные и перспективные требования к локализации нештатных ситуаций ССОС обуславливают поиск новых более эффективных и конструктивных подходов, базирующихся на рациональном парировании посредством минимальных избыточных аппаратных средств и с помощью значительных программных средств восстановления работоспособности отказавших компонент, приборов и гибкого их использования [2]. Многообещающим представляется подход, базирующийся на принципе парирования нештатных ситуаций посредством гибкого управления значительными унифицированными и универсальными избыточными ресурсами восстановления отказавших компонент и всей системы в целом [3]. Это определяет необходимость применения принципиально нового класса ССОС, обладающих способностью в реальном масштабе времени при возникновении нештатных ситуаций «снять» неопределенность по моменту возникновения отказа, его месту появления, классу отказа и конкретному его виду, а затем принять решение, исходя из

имеющихся ресурсных возможностей, по парированию последствий с целью восстановления работоспособности до приемлемых запасов устойчивости и показателей качества, т. е. свойством самоорганизации посредством обеспечения отказоустойчивости [4].

Основой отказоустойчивых ССОС является развитое алгоритмическое обеспечение разрабатываемое на основе совокупности моделей, отражающих информационные аспекты преобразовательных свойств компонент и связей этих систем. Ключевыми математическими моделями, позволяющими формировать процесс разработки, являются диагностические модели, отражающие связь между причиной отказа и ее последствиями. Использование соответствующих диагностических моделей и методов решения последовательности диагностических задач позволяют разработать алгоритмическое обеспечение. Результаты диагностирования позволяют формировать и решать задачи по восстановлению работоспособности аварийного динамического объекта, с помощью соответствующих диагностических моделей и методов.

1. ССОС, КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ

С целью формирования основных положений разработки алгоритмического обеспечения отказоустойчивой ССОС, рассмотрим ее обобщенную блок-схему (рис. 1).

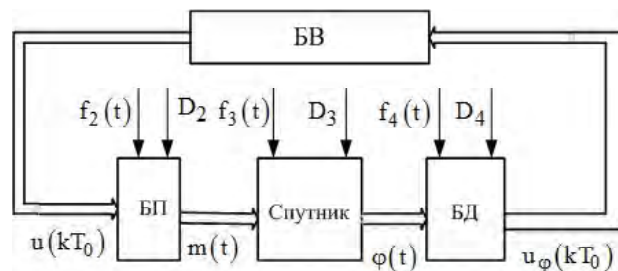


Рис. 1. Блок-схема ССОС

В этой схеме отражены четыре основных функциональных подсистемы, с помощью которых реализуется принцип управления по отклонению для осуществления ориентации и стабилизации спутника.

На функциональную подсистему-спутник действуют управляющие моменты $m(t)$, возмущающие воздействия $f_3(t)$ и виды отказов D_3 . Положение спутника в пространстве характеризуется вектором состояния $\varphi(t)$. Подсистема – блок датчиков (БД) преобразует вектор состояния $\varphi(t)$ в соответствующие дискретные значения вектора измерений $u_\varphi(kT_0)$. На БД действуют внешние возмущения $f_4(t)$ и внутренние D_4 . Измерения $u_\varphi(kT_0)$ поступают в следующую подсистему – блок вычислителей (БВ), формирующий вектор сигналов управления $u(kT_0)$. БВ подвержен действию, как внешних возмущений $f_1(t)$, так и внутренних D_1 . Управляющие воздействия в подсистеме блок приводов (БП) преобразуются в вектор управляющих моментов, компенсирующий влияние возмущающих воздействий и управляющих положением спутника в пространстве. Возмущающие воздействия и изменяют функциональные свойства БП.

Как известно, движение спутника относительно центра масс описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений Эйлера в проекциях на оси связанной системы координат [1]. При инженерных исследованиях производят упрощение исходных нелинейных дифференциальных уравнений до линейных.

Для измерения углового положения спутника и угловых скоростей в БД используются астродатчики, гироскопические измерители вектора угловой скорости, инфракрасные измерительные устройства, магнетометры [1, 5]. Преобразовательные особенности типовых БД, используемых на спутниках, могут быть описаны уравнениями первого приближения в форме линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, а также в форме передаточных функций.

Управляющие моменты на спутник формируются с помощью различных активных способов: использования реактивных сил, вращения инерционных масс, размещенных внутри спутника, при помощи гироскопов, использование магнитного поля Земли. Эти способы реализуются в БП с помощью соответствующих приводов: газореактивных и плазменных двигателей, двигателей маховиков, силовых гироскопов и др. [1]. Для инженерных расчетов систем ориентации и стабилизации на практике используются математические модели в форме передаточных функций.

В подсистеме БВ реализуются алгоритмы ориентации и стабилизации спутника. Как правило, это линейные законы управления.

Следовательно, в общем виде можно рассматривать математическую модель любого блока и всей системы в целом как модель динамического объекта в линейном приближении.

С целью обеспечения требуемого периода активного существования ССОС оснащаются избыточным приборным оборудованием и устройствами подстройки, коррекции сигналов и параметров. Для описания таких избыточных структур подсистем использование аппаратов дифференциальных уравнений и передаточных функций приводит к громоздким, трудно обозримым и сложно преобразуемым математическим выражениям. Более того, такие математические средства описывают только управляемые и наблюдаемые состояния объектов исследования. Отказы в подсистемах и системе приводят к появлению в объектах исследования как неуправляемых, так и ненаблюдаемых состояний. Для отражения этих состояний в объектах исследования требуются другие математические средства. Наиболее совершенными математическими конструкциями для описания объектов исследования, как в номинальном, так и возмущенном отказами движении представляются векторно-матричные уравнения в пространстве состояний.

Используя известные методы перехода от непрерывных математических моделей к дискретным, можно представить преобразовательные особенности в номинальном режиме функционирования ССОС в виде обобщенного динамического объекта в форме конечно-разностных уравнений:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k); \\y(k) &= Cx(k) + Du(k); x(k_0) = x_0.\end{aligned}$$

где $x(k)$ – n -мерный вектор состояния объекта; $x(k) \in X^n$; $u(k)$ – n -мерный вектор управления; $u(k) \in U^n$; $y(k)$ – m -мерный вектор измерений объекта; $y(k) \in Y^m$; A, B, C и D – матрицы соответствующих размерностей.

Обобщенная функциональная схема, предлагаемая для разработки отказоустойчивого динамического объекта, к числу которых относится ССОС, с развитыми функциями глубокого диагностирования функционального состояния и гибкого восстановления работоспособности представлена на рис. 2. Принцип действия представленной схемы заключается в следующем. На объект диагностирования и восстановления (ОДИВ) подаются управляющие воздействия $u(kT_0)$ с помощью имитатора управляющих воздействий (ИУВ), возмущающие воздействия $f(kT_0)$ с помощью имитатора возмущающих воздействий (ИВВ), виды отказа d_i посредством имитатора видов отказов (ИВО). Реакция ОДИВ отражается в доступном измерению выходе $\tilde{y}(kT_0)$.

Основными функциональными элементами, обеспечивающими диагностирование функционального состояния (ДФС), служат модуль обнаружения отказов (МОО), модуль поиска места (МПМ) отказа, модуль определения класса (МОК) отказа и модуль установления вида (МУВ) отказа. В результате согласованного функционирования этих модулей формируется полный диагноз

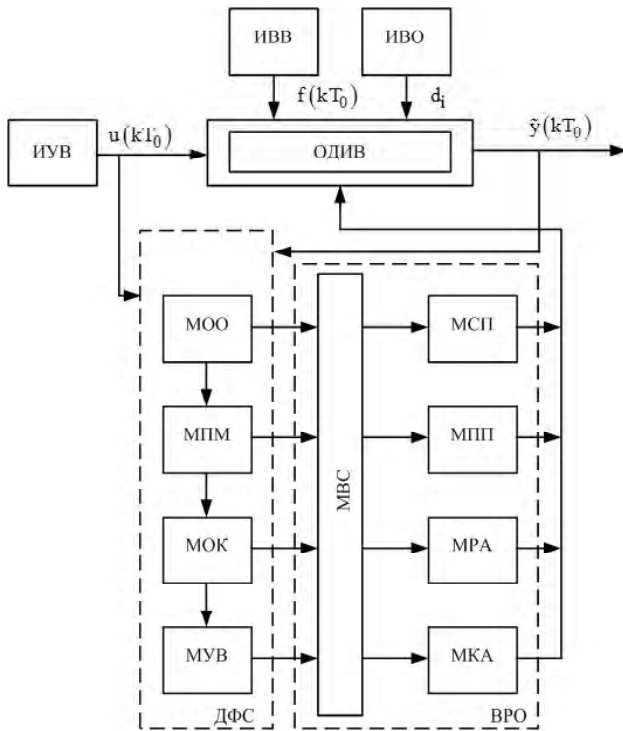


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема отказоустойчивой ССОС

функционального состояния управляемого динамического объекта. Полный диагноз о наличии отказа, его месте в блоке, классе и конкретном виде проявления поступает на модуль выбора средств (МВС) восстановления работоспособности, с помощью которого производится выбор ресурсов восстановления. Наиболее типовые ресурсы в схеме представлены такими модулями: модуль сигнальной подстройки (МСП), модуль параметрической подстройки (МПП), модуль реконфигурации алгоритмов (МРА) и модуль коммутации аппаратуры (МКА). В совокупности эти модули обеспечивают восстановление работоспособности объекта (ВРО). Разработка представленных модулей производится на основе специфических математических моделей, отражающих влияние вида отказа на функциональные свойства объекта. Этот класс моделей назван диагностическими моделями (ДМ).

2. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПРЯМЫХ ПРИЗНАКОВ ОТКАЗОВ ССОС

Отказ в ССОС рассматривается как событие неопределенное, обусловленное неопределенностью момента его появления, места возникновения, принадлежности к классу и конкретному виду отказа. Для формирования машинных диагностических моделей динамических объектов необходимо каждому прямому признаку отказа поставить в соответствие параметр. Прямые признаки это: 1) признак вида отказа; 2) признак класса отказа; 3) признак места отказа; 4) признак наличия отказа. Для конструктивной параметризации прямых признаков отказов нужно определиться с глубиной диагностирования динамических объектов. Установление глубины диагностирования представляет в теории диагностирования

известную задачу, решаемую только на уровне формирования исходных данных для задачи диагностирования. При решении практических задач глубокого диагностирования функционального состояния динамических объектов и гибкого восстановления их работоспособности, другими словами, практических задач активной отказоустойчивости динамических объектов необходимость формирования множества D (множества физических видов отказов) превращается в актуальную задачу. Суть этой задачи заключается в следующем. С одной стороны, на каждом этапе жизненного цикла спутниковых систем ориентации и стабилизации устанавливается свое конечное множество причин отказов, которые структурируются в иерархическую схему. На основном этапе жизненного цикла – эксплуатации, иерархическая схема причин отказов самая большая по числу элементов и связей и поэтому самая представительная, отражающая предельно-возможную глубину причинно-следственных связей возможных нештатных ситуаций спутниковых систем ориентации и стабилизации.

Рассмотрим примеры анализа причин возможных отказов в гироскопическом датчике угла СГ–3–2Р. На рис. 3 представлено дерево возможных причинно-следственных связей отказа, связанного с дрейфом нуля датчика.

Для конкретного этапа жизненного цикла ССОС и реальных условий количество уровней древовидной схемы будет изменяться. Поэтому представленные схемы событий и связей, раскрывающих причинно-следственную обусловленность нештатных ситуаций – это всего лишь эскиз, показывающий возможность структуризации задачи диагностирования на качественном эвристическом уровне, а также сложность, невозможность полной формализации задачи формирования множества D на каждом этапе жизненного цикла ССОС.

С другой стороны, парирование нештатных ситуаций на каждом этапе жизненного цикла осуществляется с помощью соответствующих избыточных ресурсов, причем, чем больше избыточных ресурсов, тем выше качество парирования нештатных ситуаций. На практике множество избыточных ресурсов R ограничено и, более того, один из ведущих принципов главного конструктора миссии – это минимизация расходов и, в частности, избыточных ресурсов. Очевидное противоречие между глубиной диагностирования, косвенной характеристикой которой служит мощность множества D , и гибкостью восстановления, количественная оценка этого свойства, косвенная, содержится в мощности множества R , может быть разрешено посредством нахождения компромисса. Формализовать задачу нахождения наилучшего соответствия между множествами D и R пока не удастся по целому ряду причин. Первая – уникальность космических миссий порождает оригинальность технических решений, для которых построение иерархий причинно-следственных связей, раскрывающих причины возможных нештатных ситуаций превращается в многомерную и неразрешимую задачу. Вторая – процедуры диагностирования и восстановления по сути своей

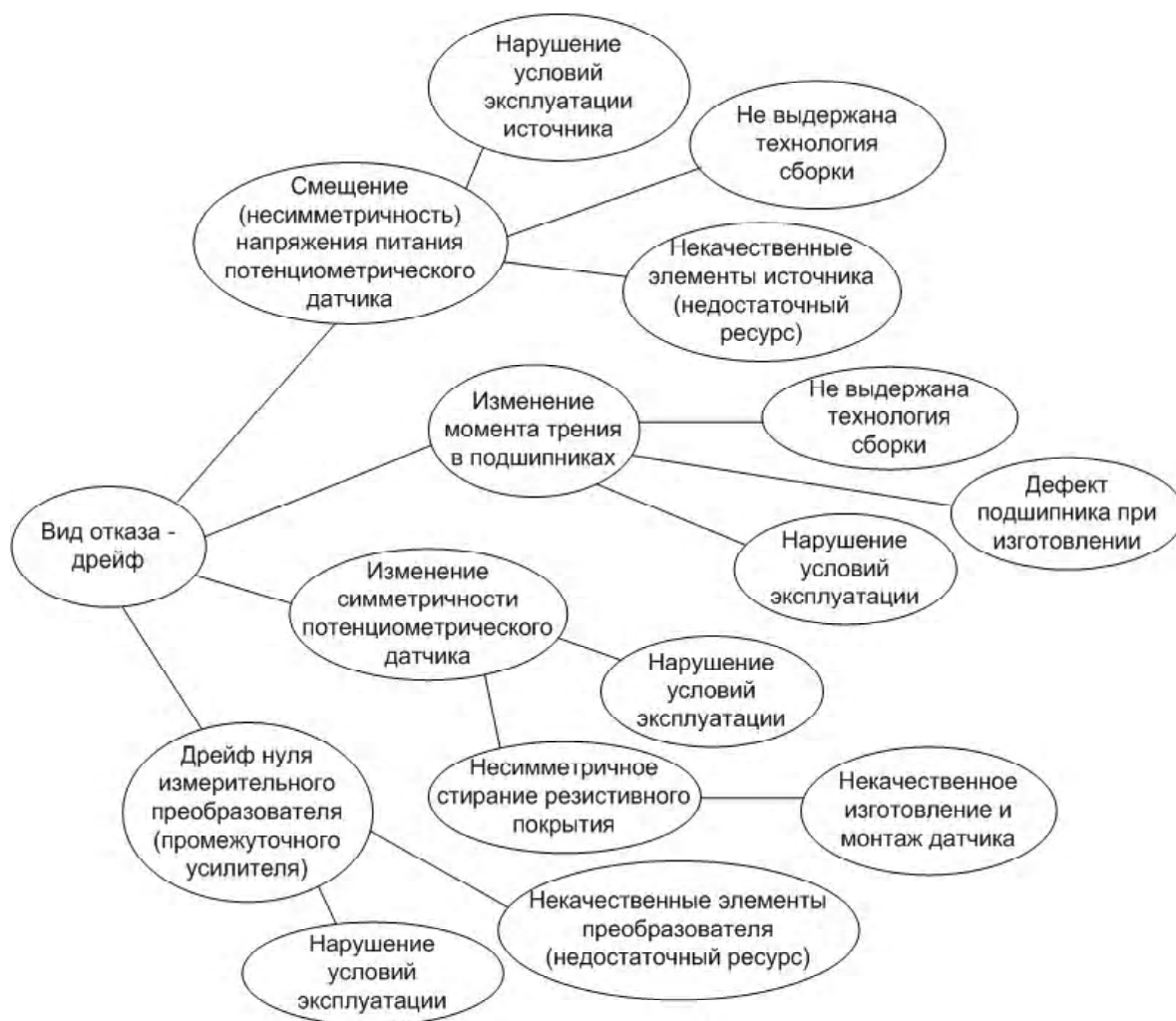


Рис. 3. Дерево возможных причин отказов для класса дрейфов нуля в СГ-3-2Р

изменяющиеся и зависящие от текущей нештатной ситуации, т. е. динамические. Поэтому пока не удастся среди известных методов выбора найти метод, базирующийся на принципе динамичности выбора ресурсов. Третья причина обусловлена особенностями реализации процедур диагностирования и восстановления на бортовых вычислительных средствах в условиях жестких ограничений по быстродействию.

Рассмотрим задачу формирования множества D на основании проведенных исследований. ССОС как объект диагностирования и восстановления характеризуется статическими характеристиками, отражающими преобразовательные свойства в установившихся режимах функционирования, а также переходными, отражающими преобразовательные свойства в динамических режимах функционирования. Любые отклонения от допустимых техническим заданием изменений характеристик представляют собой отказы, порождающие нештатные ситуации. Проведенная серия экспериментальных исследований, а также результаты расследования типовых нештатных ситуаций в функционировании ССОС позволили систематизировать различные отклонения в статических характеристиках в соответствующие классы

отказов: $L = \bigcup_{i=1}^4 L_i$, где L_1 – класс дрейфов; L_2 – класс изменений коэффициента передачи; L_3 – класс обрывов и L_4 – неизвестный класс. Различные отклонения в переходных характеристиках тоже систематизированы в ряд классов $P = \bigcup_{i=1}^4 P_i$, где P_1 – увеличение инерционности; P_2 – уменьшение запаса устойчивости по амплитуде; P_3 – уменьшение устойчивости по фазе и P_4 – неизвестный класс. Итак, для динамического объекта можно провести по результатам анализа его статических и динамических свойств классификацию возможных отказов по восьми классам: четыре класса для отклонений статических характеристик и четыре класса для отклонений динамических характеристик. Итак, все множество возможных отказов в функционировании динамического объекта может быть

представлено $K = L \cup P = \bigcup_{i=1}^8 K_i$. Каждому классу после проведенной классификации ставится в соответствие параметр, характеризующий данный класс и позволяющий отличать этот класс от других, а также доступный вычислению. Самая простая процедура параметризации, когда одному классу соответствует один параметр, т. е.