

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. О. СУХОМЛИНСЬКОГО**

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

**№ 1
березень 2016**

**Миколаїв
МНУ імені В. О. Сухомлинського
2016**

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради
Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського
(протокол № 17 від 22 березня 2016 року)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Валерій БУДАК	доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАПН України; голова редакційної колегії;
Сергій УСТЕНКО	доктор технічних наук, доцент, головний редактор;
Віктор МЕЛЬНИК	кандидат технічних наук, доцент, відповідальний секретар.

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Валерій БОРИСЕНКО	доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського;
Володимир ГНАТУШЕНКО	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих систем обробки інформації Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара;
Ігор КОВАЛЕНКО	доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
Володимир КОРЧИНСЬКИЙ	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних засобів телекомунікацій Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара;
Костянтин КОШКІН	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем та технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
Леонід КУЦЕНКО	доктор технічних наук, професор кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки Національного університету цивільного захисту України;
Максим МУСІЄНКО	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій і програмних систем Чорноморського державного університету імені Петра Могили;
Валерій ПОЗДЄЄВ	доктор фізико-математичних наук, професор завідувач кафедри прикладних математики, механіки та інформатики Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського;
Сергій ПРИХОДЬКО	доктор технічних наук, професор завідувач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
Микола ФІСУН	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтелектуальних інформаційних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
Анатолій ХОМЧЕНКО	доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри прикладної та вищої математики Чорноморського державного університету імені Петра Могили;
Ольга ШОМАН	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геометричного моделювання та комп'ютерної графіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Олександр НІЩИН	доктор технічних наук, професор кафедри геометричного моделювання та комп'ютерної графіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
Олександр ЧЕРНІКОВ	доктор технічних наук, професор завідувач кафедри інженерної та комп'ютерної графіки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Г 35 **Геометричне моделювання та інформаційні технології: науковий журнал / за ред. Сергія Устенка. — № 1, березень 2016. — Миколаїв : МНУ імені В. О. Сухомлинського, 2016. — 128 с.**

У науковому журналі висвітлено актуальні питання геометричного моделювання, комп'ютерних систем, інформаційних технологій тощо. Авторами виразно актуалізуються поняття «комп'ютерне моделювання», «геометричне моделювання», «об'ємне моделювання», «програмування», «прикладна геометрія» та інші. До авторських концепцій залучено: LabVIEW середовище, CRM-систем, AutoCAD, LEF-пласти, платформа Android.

Видання адресовано науковцям, викладачам, студентам технічних спеціальностей.

УДК 514.8+519.87+004
ББК 32.81+30вб

© Миколаївський національний університет
імені В.О. Сухомлинського, 2016

ЗМІСТ

<i>Олег БЕРЕЗЬКИЙ, Катерина БЕРЕЗЬКА, Василь НЕМІШ</i> Використання методів просторової економетрики для аналізу результатів вступу абітурієнтів.....	5
<i>Олена БІДНІЧЕНКО, Юрій ЄВСТИГНЄВ</i> Об'ємне моделювання одноступінчастого косозубого редуктора в AutoCAD.....	10
<i>Олена БОЙЧУК, Максим БОРИСЕНКО</i> Комп'ютерне моделювання гіперболоїдної сітчастої конструкції.....	16
<i>Валерій БОРИСЕНКО, Олексій АГАРКОВ, Костянтин ПАЛЬКО, Максим ПАЛЬКО</i> Моделювання плоских кривих у натуральній параметризації	21
<i>Валерій БОРИСЕНКО, Костянтин МАШИРОВ</i> Моделювання теплових процесів у середовищі LabVIEW	28
<i>Свєтій БОРЧИК, Олексій СТОББА</i> Чисельний розрахунок кількісних показників надійності резервованих комп'ютерних систем.....	34
<i>Валерій БУДАК, Олег ПАВЛЕНКО</i> Аналіз вільних коливань пологих шаруватих оболонок у постановці Міндліна методом сплайн-колокації.....	42
<i>Олександра БУЛГАКОВА, Павло КИСЛИЧЕНКО</i> Архітектура крупних масштабованих додатків в контексті об'єктно-орієнтованого програмування	53
<i>Олександра БУЛГАКОВА, Андрій КУДРЯВЦЕВ, Олександр БОНДАР</i> Застосування CRM-систем для автоматизації оцінки показників обслуговування клієнтів	57
<i>Олена ГЛАДКА, Ярослав БАБИЧ, Володимир ГОЧ</i> Синтез методів конформних відображень та сумарних зображень при моделюванні фільтраційних процесів у LEF-пластах	61
<i>В'ячеслав ЗОСИМОВ, Дар'я ГОРІШНЯ</i> Альтернативні види пошуку науково-технічної інформації в Інтернеті	69
<i>Ігорь КОВАЛЕНКО, Катерина АНТИПОВА, Сергей БОРДУН</i> Выбор решений на множестве экспертных свидетельств с использованием правил перераспределения конфликтов	74
<i>Віктор МЕЛЬНИК, Василь ЗІВЕНКО, Сергій ЛУКЬЯНЧИКОВ</i> Графічна обробка фото-зображення райдужної оболонки ока.....	78
<i>Всеволод МИХАЙЛЕНКО, Сергей УСТЕНКО</i> Роль прикладной геометрии в повышении эффективных показателей турбомашин	82
<i>Ганна ПОГРОМСЬКА, Олександр ХРИСТОДОРОВ</i> Мультимедійні нотатки для платформи Android: аналіз та практика реалізації.....	87
<i>Надія ТИМОФІЄВА</i> Про властивість симетрії в задачі розміщення одногабаритних об'єктів.....	93
<i>Ірина УСТЕНКО</i> Моделювання взаємоспряжених роторів повітродувки типу Рутс	99
<i>Сергій УСТЕНКО, Владислав ПРАДЄДОВ</i> Розробка програмного забезпечення для автоматизації обліку та аналізу поточної успішності студентів	103
<i>Сергій УСТЕНКО, Олександр СИНЯВІН</i> Геометричне моделювання плоскої кривої із параболічною кривиною при заданому її відхиленні від лінійного розподілу	109
<i>Юрій ХОЛКОВСЬКИЙ</i> Побудова дискретно-інтерполяційних моделей багатопараметричних об'єктів, систем та середовищ.	116
<i>Анатолій ХОМЧЕНКО, Евгений СИДЕНКО</i> Метод барицентрической конденсации на конечном элементе T 21	122
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	126

CONTENTS

<i>Oleh BEREZSKY, Kateryna BEREZSKA, Vasil NEMISH</i> Usage of spatial econometrics methods for the analysis results of entering applicants	5
<i>Elena BIDNICHENKO, Yuri EVSTIGNEEV</i> Solid modeling of a single-stage helical gearbox in AutoCAD	10
<i>Olena BOYCHUK, Maxim BORISENKO</i> Hyperboloid mesh construction computer simulation	16
<i>Valeriy BORISENKO, Aleksey AGARKOV, Constantin PALKO, Maxim PALKO</i> Modeling of curves in the natural parametrization	21
<i>Valeriy BORISENKO, Konstantin MASHYROV</i> Simulation of thermal processes in the environment LabVIEW	28
<i>Eugene BORCHIK, Olexiy STOVBA</i> Numerical calculation of quantitative indicators of reliability of redundant computer systems	34
<i>Valery BUDAK, Oleg PAVLENKO</i> Free vibration analysis of laminated shallow shells using Mindlin theory by spline collocation method	42
<i>Oleksandra BULGAKOVA, Pavlo KYSLYCHENKO</i> The large scalable applications architecture in object-oriented programming context	53
<i>Oleksandra BULGAKOVA, Andriy KUDRYAVTSEV, Oleksandr BONDAR</i> The use of CRM-systems for customer service evaluation indicators automation	57
<i>Olena HLADKA, Yaroslav BABYCH, Volodymyr HOCH</i> Synthesis of methods of conformal mappings and summary representations at the modelling of filtration processes in LEF-layers	61
<i>Vyacheslav ZOSIMOV, Dar'ya GORISHNYA</i> Alternative search types of scientific and technical information in the Internet	69
<i>Igor KOVALENKO, Kateryna ANTIPOVA, Sergiy BORDUN</i> Decision-making based on experts' evidence using conflict redistribution rules	74
<i>Viktor MELNIK, Vasil ZIVENKO, Sergey LUKYANCHIKOV</i> Graphics processing photographic image iris	78
<i>Vsevolod MIKHAILENKO, Serhiy USTENKO</i> The role of applied geometry to improve the efficiency of performance of turbomachinery	82
<i>Hanna POHROMSKA, Olexander KHRYSTODOROV</i> The multimedia notes for platform of Android: analysis and the practice implementation	87
<i>Nadine TIMOFEEVA</i> About symmetry property in problem of placement of one dimensional objects	93
<i>Irina USTENKO</i> Modelling mutually conjugate rotors of ROOTS blowers	99
<i>Serhiy USTENKO, Vladyslav PRADEDOV</i> Software development for the automation of the account of current progress of students	103
<i>Serhiy USTENKO, Oleksandr SYNIAVIN</i> Geometric modelling plane curves with a parabolic curvature under set its deviation from the linear distribution	109
<i>Yuriy KHOLKOVSKY</i> The construction of the discrete interpolation of multivariable models of objects, systems and environments	116
<i>Anatoly KHOMCHENKO, Ievgen SIDENKO</i> Barycentric condensation method on the finite element T21	122
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	126

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ПРОСТОРОВОЇ ЕКОНОМЕТРИКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЗУЛЬТАТІВ ВСТУПУ АБІТУРІЄНТІВ

У статті здійснено оцінку диспропорції районного розподілу вступників з напрямку підготовки «Комп'ютерна інженерія» Тернопільського національного економічного університету на основі методів просторової економетрики. На основі статистичних даних із використанням статистики Морана здійснено кластеризацію районів Тернопільської області за кількістю вступників. Для відображення зв'язків між регіонами, їх інтенсивності та формалізації припущення, що регіон просторово зв'язаний з сусідніми регіонами, використано матрицю просторових ваг граничних сусідів.

Ключові слова: вступники, матриця просторових ваг, статистика Морана, діаграма розсіювання, просторові кластери.

Різьке збільшення кількості вишів, відкриття однотипних напрямів підготовки і спеціальностей в одному місті привело до різкого падіння кількості вступників.

Для збереження контингенту абітурієнтів необхідно проводити аналіз кількості вступників за попередні роки із адміністративно-територіальних одиниць.

Практика показує, що основний контингент вишів формується в переважній більшості з вступників населеного пункту, де розміщений виш, і прилеглих районів. При емпіричному аналізі даних не можна ігнорувати просторові взаємодії між районами, бо це приведе до некоректних висновків стосовно величини і значущості впливу досліджуваних факторів. Тому актуальною проблемою є дослідження і оцінка диспропорцій районного розподілу вступників на основі просторової економетрики.

За останні 30 років в світі є популярними концепції і моделі нової економічної географії (НЕГ) [1]. Одним із теоретичних висновків НЕГ є те, що в економічному розвитку регіонів спостерігаються агломераційні ефекти і просторова неоднорідність (типу «центр» – «периферія»). В термінах просторової специфікації моделей умовної конвергенції це означає, що рівноважні траєкторії пропорційного росту (steady-state growth) регіонів будуть суттєво відрізнятися в залежності від того, в який просторовий кластер попадають ці регіони.

Для відображення в емпіричних моделях просторових зв'язків використовується просторова економетрика. Припускається, що ті регіони, які розташовані ближче один до одного, є більш інтегровані між собою, ніж ті, що знаходяться на значній відстані. Основними передумовами просторової економетрики є те, що між досліджуваними показниками різних об'єктів може бути кореляція; яка зумовлена географією і просторовими факторами. Для дослідження просторових ефектів використовуються коефіцієнти (статистики) Морана (I), Жирі (C) та ін. [1–2].

Основну роль в просторовому аналізі відіграє матриця просторових ваг, яка показує зв'язки між регіонами та їх інтенсивність, і формалізує припущення, що регіон просторово зв'язаний з сусідніми регіонами. Існують різні види таких матриць: граничних сусідів, k найближчих сусідів, відстаней та ін. [1–3]. Слід зауважити, що оскільки матриця просторових ваг формується екзогенно, то її специфікація є найбільш складним і спірним питанням.

Метою дослідження є оцінка рівня диспропорцій розподілу кількості вступників у Тернопільський національний економічний університет на спеціальність «Комп'ютерна інженерія» в Тернопільській області на основі методів просторової економетрики.

Методами дослідження є методи просторової економетрики, статистика Морана.

Основні результати дослідження. При визначенні коефіцієнта загальної просторової автокореляції основною складовою є матриця просторових ваг. Її елементи w_{ij} відображають вплив

регіону j на регіон i . Матриці є квадратними, по головній діагоналі стоять нулі, оскільки сам регіон на себе не впливає.

У матриці *граничних сусідів* припускається, що на економіку регіону впливають лише регіони, які мають спільні кордони, а вплив сусідів 2-го, 3-го кругу є несуттєвим. Цей підхід не завжди є реалістичним економічно і географічно. Елементи матриці є такими:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо регіон } i \text{ та } j \text{ має спільний кордон,} \\ 0, & \text{якщо } i = j, \\ 0, & \text{якщо регіон } i \text{ та } j \text{ не має спільного кордону.} \end{cases} \quad (1)$$

Інший підхід до сусідства реалізовано в матриці k *найближчих сусідів*:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d_{ij} \leq d_i(k), \\ 0, & \text{якщо } i = j, \\ 0, & \text{якщо } d_{ij} > d_i(k), \end{cases} \quad (2)$$

де d_{ij} – відстань від регіону i до регіону j (розраховується як відстань між регіональними центрами); $d_i(k)$ – найбільша з k найменших відстаней.

Просторові ваги матриці відстані обчислюються так:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 / d_{ij}^\gamma, & \text{якщо } d_{ij} \leq D(q), \\ 0, & \text{якщо } i = j, \\ 0, & \text{якщо } d_{ij} > D(q), \end{cases} \quad (3)$$

де $D(q)$ – квантілі відстаней. Якщо $q = 4$, то матриця буде враховувати всі відстані, а нулі будуть лише на головній діагоналі. Як правило $\gamma = 2$. За d_{ij} – можна вибрати відстань між регіональними центрами або мінімальний час між ними в дорозі автомобільними дорогами.

Можна також використовувати матрицю *ринкових потенціалів*, ваги якої обчислюються за формулою:

$$w_{ij} = \begin{cases} A_j / d_{ij}^\gamma, & \text{якщо } d_{ij} \leq D(q), \\ 0, & \text{якщо } i = j, \\ 0, & \text{якщо } d_{ij} > D(q), \end{cases} \quad (4)$$

– показник розміру або потужності регіону j .

Статистика Морана (коефіцієнт загальної просторової автокореляції) визначається за формулою:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (5)$$

$$\text{де } S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i,$$

або в матричному вигляді:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{Z'WZ}{Z'Z}, \quad (6)$$

де $Z = Y - \bar{Y}$.

Якщо $I > 0$, то існує додатна просторова автокореляція, тобто в цілому значення спостережень в сусідніх регіонах є подібними; $I < 0$ – від’ємна автокореляція, тобто в цілому значення спостережень в сусідніх регіонах відрізняються; $I = 0$ – значення спостережень в сусідніх регіонах розміщені випадковим чином. Коефіцієнт I показує ступінь лінійної взаємозалежності між вектором Z центрованих значень ознаки Y і вектором WZ просторово зважених центрованих значень ознаки Y в сусідніх регіонах, який називається просторовим лагом.

За допомогою просторової діаграми розсіювання можна зробити візуалізацію розкиду значень ознаки відносно просторового лага. По осі абсцис відкладаються значення вектора Z , по осі ординат – значення WZ . На діаграмі зображується лінія регресії WZ на Z , тангенс кута нахилу якої дорівнює коефіцієнту загальної просторової автокореляції (у випадку якщо матриця просторових ваг стандартизована по рядках (сума ваг по рядку дорівнює одиниці)).

Нашим дослідженням охоплюється період з 2010 по 2014 рр., що є достатнім часовим періодом для виявлення залежностей. Виділено 17 районів Тернопільської області України (нумерацію районів наведено у табл.1) та підрахована кількість вступників для кожного з них.

Таблиця 1

Список районів Тернопільської області

1	Тернопільський р-н	10	Кременецький район
2	Бережанський район	11	Лановецький район
3	Борщівський район	12	Монастириський район
4	Бучацький район	13	Підволочиський район
5	Гусятинський район	14	Підгаєцький район
6	Заліщицький район	15	Теребовлянський район
7	Збарзький район	16	Чортківський район
8	Зборівський район	17	Шумський район
9	Козівський район		

Діаграма розсіювання Морана для розподілу кількості студентів з використанням матриці граничних сусідів приведена на рис. 1.

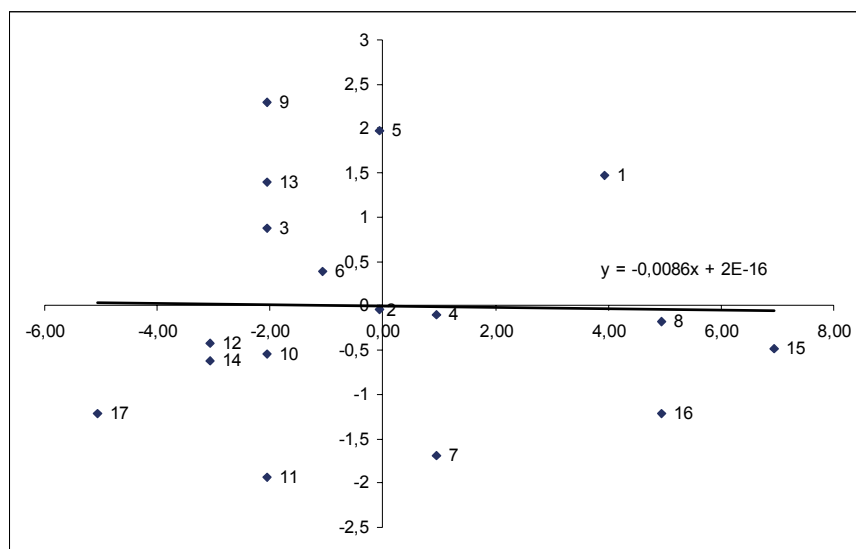


Рис. 1 Діаграма розсіювання Морана для кількості студентів ОКР «бакалавр» напрямку підготовки «комп’ютерна інженерія» за 2010 – 2014 рр. за матрицею граничних сусідів

В I-ий кластер – районів з великою кількістю вступників, які знаходяться в оточенні районів теж з великою кількістю вступників – за матрицею граничних сусідів попав лише Тернопільський район.

В II-ий кластер – районів з невеликою кількістю вступників, які знаходяться в оточенні районів з великою кількістю вступників – за матрицею граничних сусідів попали: Борщівський, Заліщицький, Гусятинський, Підволочиський, Козівський райони.

В III-ій кластер – районів з невеликою кількістю вступників, які знаходяться в оточенні районів теж з невеликою кількістю вступників ввійшли: Бережанський, Монастирський, Підгаєцький, Кременецький, Лановецький, Шумський райони.

В IV-ий кластер – районів з великою кількістю вступників, які знаходяться в оточенні районів з невеликою кількістю вступників – за матрицею граничних сусідів попали: Бучацький, Збарзький, Зборівський, Тербовлянський, Чортківський райони.

На основі статистики Морана показано, що спостерігається від’ємна автокореляція, тобто в цілому кількість вступників в сусідніх районах відрізняється. Оскільки, $I \approx 0$ отже, можна сказати, що кількість вступників в сусідніх районах розміщена випадковим чином.

Отримані результати кластеризації регіонів для кращої візуалізації можна відобразити за допомогою картограми (рис. 2).

На основі статистичних даних результатів вступу абітурієнтів спеціальності «Комп’ютерна інженерія» з використанням статистики Морана здійснено кластеризацію районів Тернопільської області за кількістю вступників.

Для збільшення кількості вступників необхідно в першу чергу проводити профорієнтацію в районах, що попали в II-й і III-й кластери.

Виявлення просторової кореляції (кластеризації регіонів) за допомогою коефіцієнта загальної просторової автокореляції та діаграми розсіювання є тільки першим кроком в просторовому аналізі. Статистика I показує, що значення досліджуваної змінної Y просторово кластеризовані в більшій степені, ніж при випадковому розподілі, проте не пояснює, чому це відбувається. Тому перспективним напрямом досліджень є перевірка гіпотез про характер просторових взаємодій.

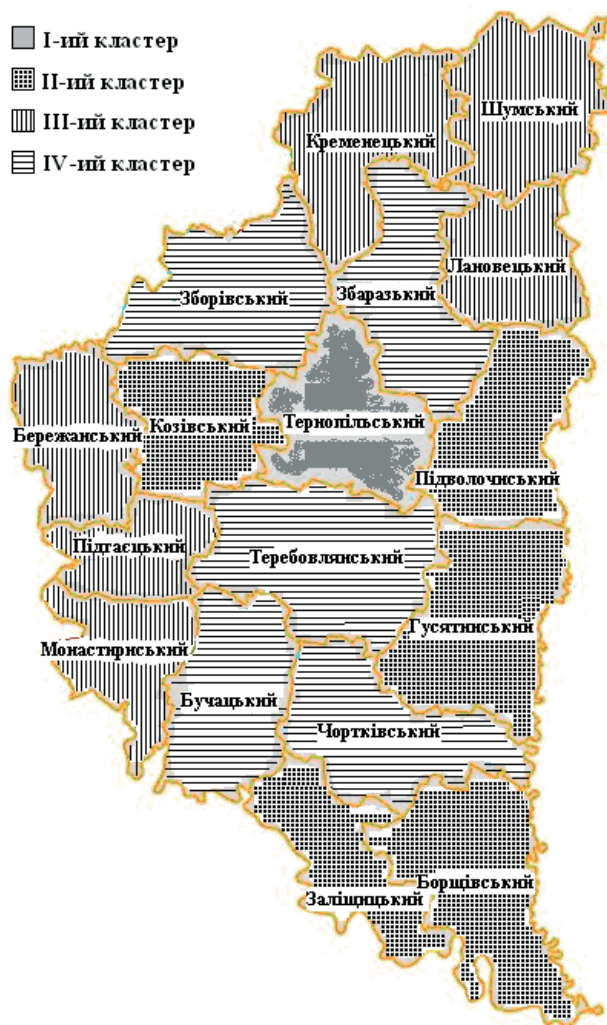


Рис. 2. Кластеризація регіонів на діаграмі Морана (за матрицею граничних сусідів)

Список використаних джерел

1. Дубровина Н. А. Применение методов пространственной эконометрики в региональных исследованиях / Н. А. Дубровина // Бізнес Інформ. — 2010. — № 5 (2). — С. 12—16.
2. Березька К. М. Оцінка диспропорцій регіонального розподілу іноземних інвестицій в Україні / К. М. Березька, О. М. Березький, В. В. Маслій // Актуальні проблеми економіки. — 2013. — № 12 (150). — С. 106—114.

Oleh BEREZSKY, Kateryna BEREZSKA, Vasil NEMISH
Ternopil

USAGE OF SPATIAL ECONOMETRICS METHODS FOR THE ANALYSIS RESULTS OF ENTERING APPLICANTS

The article deals with the disproportion estimation of undergraduates district distributions for direction «Computer Engineering» of Ternopil National Economic University, based on the methods of spatial econometrics. There has been implemented clustering of Ternopil districts by the number of enrollees, which is based on statistical data using Moran's statistics. To show the links between the regions, its intensity and formalize the assumption that the region is spatially associated with neighboring regions, it is applied spatial weights matrix boundary neighbors.

Key words: enrollees, spatial weights matrix, Moran's statistics, scatter plot, spatial clusters, EQL, region, district, applicant.

Олег БЕРЕЗСКИЙ, Екатерина БЕРЕЗСКАЯ, Василий НЕМИШ
г. Тернополь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКОНОМЕТРИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСТУПАЮЩИХ АБИТУРИЕНТОВ

В статье осуществлена оценка диспропорции районного деления поступающих с направления подготовки «Компьютерная инженерия» Тернопольского национального экономического университета на основе методов пространственной эконометрики. На основе статистических данных с использованием статистики Морана осуществлено кластеризацию районов Тернопольской области по количеству поступающих. Для отображения связей между регионами, формализации гипотезы, что регион пространственно связан с соседними регионами, использовано матрицу пространственных весов граничных соседей.

Ключевые слова: поступающие, матрица пространственных весов, статистика Морана, диаграмма рассеяния, пространственные кластеры.

Стаття надійшла до редколегії 05.03.2016

ОБ'ЄМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОСТУПІНЧАСТОГО КОСОЗУБОГО РЕДУКТОРА В AUTOCAD

У статті проведено аналіз конструктивних особливостей редукторів, виконано розрахунки геометричних параметрів елементів, що складають одноступінчастий косозубий редуктор, які є вихідними даними для геометричного моделювання об'ємного зображення редуктора. Показано прийоми та методи створення моделей окремих елементів редуктора, які виконано в середовищі графічної системи AutoCAD. Наведено методику збірки складових елементів та подано змодельоване наочне зображення одноступінчастого косозубого редуктора.

Ключові слова: об'ємне моделювання, одноступінчастий косозубий редуктор, габаритні розміри, геометричні моделі елементів

Конструювання об'ємних геометричних моделей технічних деталей, вузлів та механізмів є негайною потребою сьогодення. Враховуючи широке коло практичного використання тих або інших різновидів редукторів у різноманітних технічних напрямках виникла необхідність створення геометричних моделей редукторів. У теперішній час, коли всі проектні організації, конструкторські бюро та інші суб'єкти, які пов'язані з проектуванням машин і механізмів, відмовилися від ручного креслення на користь комп'ютерної графіки, питання моделювання тривимірних зображень є вкрай важливим і актуальним. Крім того, актуальність теми роботи з аналізу особливостей формування 3-D моделі редуктора обумовлюється широким спектром практичного застосування механізму.

Інструментом геометричного моделювання обрано графічну систему AutoCAD, яка є найбільш розповсюдженою для практичного використання у всьому світі. Завдяки останнім досягненням у галузі комп'ютерної інженерії стало можливим створювати об'ємні моделі складних технічних об'єктів. Саме такий складний технічний об'єкт – циліндричний одноступінчастий косозубий редуктор, призначений для приводу стрічкового транспортера, обрано в роботі для моделювання.

Редуктор – це механізм, конструкція якого включає зубчасті або черв'ячні передачі, що розміщені у відособленому закритому корпусі та функціонують в масляній ванні [4, 125–132; 5, 258–283]. Найпростіший редуктор циліндричний одноступінчастий являє собою два зубчасті колеса з різною кількістю зубців, встановлених на двох різних валах. Ведучий вал обертається приводом, обертання через зубчасте зачеплення коліс передається на ведений вал, який, у свою чергу, віддає крутний момент навантаженню.

Широке застосування редукторів в різних галузях техніки стало можливо завдяки зміні передаточного числа у великому діапазоні. Практично всі крани, кран-балки, транспортувальні лінії, ескалатори, ліфти, конвеєри мають у своєму складі редуктор. Сучасний список подібних механічних агрегатів вкрай широкий та включає в себе такі складні види, як варіатори, мультиплікатори, турборедуктори.

За особливостями конструкції вузла механічної передачі обертання ці механізми можуть підрозділятися на циліндричні, планетарні, черв'ячні та ланцюгові. Вибір певного типу передачі залежить від особливостей та умов функціонування механізму. Крім вказаних вище типів передач в промисловості використовуються циліндрична та конічна зубчасті передачі; гіпоїдна (спіроїдна) передача, ланцюгова, ремінна, гвинтова та хвильова передачі. Широкий спектр різноманітних передач дає можливість вибору необхідного проектного рішення в залежності від призначення механізму та його функцій.

Практичне промислове проектування циліндричних редукторів передбачає виконання багатьох видів розрахунків: кінематичних, габаритних та розрахунків на міцність всіх елементів редуктора: приводу, зубчастих коліс та валів. У даній роботі приведемо тільки розрахунки, які стосуються геометричних параметрів складових елементів редуктора для можливості проведення їх геометричного моделювання та 3-D представлення.

3 кінематичного розрахунку редуктора стають відомими дані (табл. 1), що є необхідними для виконання подальших геометричних розрахунків.

Таблиця 1

Дані кінематичного розрахунку одноступінчастого косозубого редуктора

Найменування	Позначення	Величина	Розмірність
ККД	η	0,96	%
Передаточне число,	U	4,9	
Крутний момент на вихідному валу,	T_2	430	Н·м
Потужність на вихідному валу	P_2	13	кВт
Частота обертання на вихідному валу	n_2	300	об/хв

Габаритний розрахунок зубчастих коліс редуктора [4, 187;5, 264] передбачає визначення відстані між осями, кількості зубців шестерні та колеса, розрахунок валів і вибір підшипників кочення.

Міжосьова відстань обчислюється за формулою:

$$a_w = K_a \cdot (U + 1) \cdot \sqrt{\frac{T_2 \cdot K_{H\beta}}{[\sigma_H]^2 \cdot U^2 \cdot \psi_{ba}}} = 49 \cdot (4,9 - 1) \cdot \sqrt{\frac{430 \cdot 10^3 \cdot 1,25}{410^2 \cdot 4,9^2 \cdot 0,4}} = 176.$$

Оскільки $a_w = 176$ мм, то приймаємо по ГОСТ 2185-66 $a_w = 180$ мм. Модуль зачеплення із ГОСТ 9563-60 $m_n = 4$ мм, кут нахилу зубів $\beta = 11$.

Кількість зубців шестерні і колеса $z_1 = \frac{2 \cdot a_w \cdot \cos \beta}{(U + 1) \cdot m_n} = \frac{2 \cdot 180 \cdot 0,981}{(4,9 + 1) \cdot 4} = 15$; $z_2 = z_1 \cdot U = 15 \cdot 4,9 = 73,3$. Приймаємо: $z_1 = 15$; $z_2 = 73$.

Основні розміри шестерні і колеса:

а) ділильні діаметри для шестерні $d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta} = \frac{4 \cdot 15}{0,981} = 60$ мм; для колеса $d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta} = \frac{4 \cdot 73}{0,981} = 300$ мм.

Діаметри виступів для шестерні $d_{a1} = d_1 + 2 \cdot m_n = 60 + 2 \cdot 4 = 70$ мм; для колеса $d_{a2} = d_2 + 2 \cdot m_n = 300 + 2 \cdot 4 = 308$ мм.

Діаметр западин: для шестерні $d_{f1} = d_1 - 2,5 \cdot m_n = 60 + 2,5 \cdot 4 = 52$ мм; для колеса $d_{f2} = d_2 - 2,5 \cdot m_n = 300 + 2,5 \cdot 4 = 288$ мм.

Ширина колеса $b_2 = \psi_{ba} \cdot a_w = 0,4 \cdot 180 = 172$ мм, ширина шестерні $b_1 = b_2 + 5 = 172 + 5 = 177$ мм.

Для розрахунку валів і вибору підшипників кочення розглянемо спочатку ведучий вал. Діаметр вихідного кінця валу $d_{v1} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_1}{\pi \cdot [\tau_K]}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 98,2 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 20}} = 28$ мм. Приймаємо $d_{v1} = 30$ мм. Діаметр валу під підшипниками $d_{п1} = 40$ мм.

Вибираємо підшипники кочення для ведучого валу 308 – $d = 40$ мм; $D = 90$ мм; $B = 23$ мм. Приймаємо шпонку під муфтою $8 \times 7 \times 4$.

Ведений вал розраховуємо аналогічно. Діаметр вихідного кінця валу

$$d_{v2} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_2}{\pi \cdot [\tau_K]}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 430 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 20}} = 48 \text{ мм. Приймаємо } d_{v2} = 50 \text{ мм.}$$

Діаметр валу під підшипниками $d_{п2} = 55$ мм; Діаметр валу під шестернею $d_{к2} = 60$ мм.

Вибираємо підшипники кочення для ведучого валу 111 – $d = 55$ мм; $D = 90$ мм; $B = 18$ мм.

Підбираємо шпонку під колесом $18 \times 11 \times 7$.

Виконаємо габаритний розрахунок маточини. Діаметр маточини $d_{мт} = 1,6 \cdot d_{к2} = 1,6 \cdot 60 = 96$ мм; довжина маточини $l_{мт} = 1,5 \cdot d_{к2} = 1,5 \cdot 96 = 90$ мм; товщина обода $\delta_0 = 3 \cdot m_n = 3 \cdot 4 = 12$ мм; товщина диска $C = 0,3 \cdot b_2 = 0,3 \cdot 72 = 22$ мм.

Габаритний розрахунок корпусу редуктора поділяється на декілька частин. Товщина стінок корпусу і кришки $\delta = 0,025 \cdot a_w + 1 = 0,025 \cdot 180 + 1 = 5,5$ мм. Приймаємо $\delta = 8$ мм.

Товщина фланців корпусу і кришки : верхнього поясу корпусу і кришки $b = 1,5 \cdot \delta = 1,5 \cdot 8 = 12$ мм; нижнього поясу корпусу $p = 2,35 \cdot \delta = 2,35 \cdot 8 = 18,8$ мм. Приймаємо $p = 20$ мм.

Зазор між торцем шестерні і корпусом $A_1 = 1,2 \cdot \delta = 1,2 \cdot 8 = 9,6 \text{ мм}$.

Зазор між вершинами зубців колеса і стінки корпусу $A = \delta = 8 \text{ мм}$.

Ширина розпірного кільця $y = 10 \text{ мм}$.

Діаметри фундаментних болтів $d_1 = 0,031 \cdot a_w + 12 = 0,031 \cdot 180 + 12 = 17,40 \text{ мм}$. Приймаємо $d_1 = \text{M20 мм}$.

Діаметри болтів біля підшипників $d_2 = 0,7 \cdot d_1 = 0,7 \cdot 20 = 14 \text{ мм}$. Приймаємо $d_2 = \text{M14 мм}$.

Діаметри болтів для з'єднання кришки з корпусом $d_3 = 0,7 \cdot d_1 = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ мм}$. Приймаємо $d_3 = \text{M10 мм}$.

Описаної вище інформації достатньо для виконання об'ємного моделювання елементів редуктора. Приведемо методику конструювання геометричних моделей елементів в середовищі проектування AutoCAD 2014 російськомовна версія.

Для створення геометричних образів використовуються команди креслення графічних примітивів ЛІНІЯ, ПОЛІЛІНІЯ, ДУГА, ОТРЕЗОК, ОКРУЖНОСТЬ, МНОГОУГОЛЬНИК, ПРЯМОУГОЛЬНИК, які скомпоновані в каталозі РИСОВАНИЕ. Формування двовимірних контурів необхідної форми здійснюється командами редагування графічних примітивів ПЕРЕНОС, 2D І 3D ПОВОРОТ, КОПИРОВАНИЕ, ОБРЕЗАТЬ, ПРОДЛИТЬ, СОПРЯЖЕНИЕ, МАССИВ, ПОДОБИЕ, СПИРАЛЬ, РАСЧЛЕНИТЬ, ОТОБРАЗИТЬ ЗЕРКАЛЬНО, СОЕДИНИТЬ [1, 15–36].

Для конструювання твердотільних моделей елементів редуктора використовуються такі стандартні команди створення як ЯЩИК, ЦИЛИНДР, СФЕРА [2, 89–105],. Способами формування тривимірних об'єктів ВИДАВИТЬ, ВРАЩАТЬ, СДВИГ, ВИТЯНУТЬ [3, 63–77] тощо, які містяться у каталозі 3-D МОДЕЛИРОВАНИЕ, створюються отвори в кришках, профілі різьби та інші елементи. Крім цього при геометричному моделюванні елементів редуктора використовуються операції Булевої алгебри ОБЪЕДИНЕНИЕ, ВЫЧИТАНИЕ, ПЕРЕСЕЧЕНИЕ [3, 78–82].

Розглянемо методику побудови об'ємних моделей елементів редуктора. Принцип створення деталей типу тіла обертання полягає у тому, що спочатку командами двовимірного моделювання будується плоский контур, потім він перетворюється в область і обертається навколо визначеної осі.

Розглянемо побудови на прикладі глухої кришки підшипника. За визначеними розмірами будемо замкнений контур для обертання, наступним кроком використовуючи команду ОБЛАСТЬ перетво-

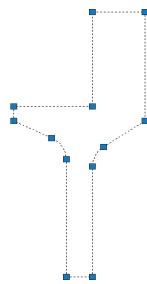


Рис. 1. Замкнений контур

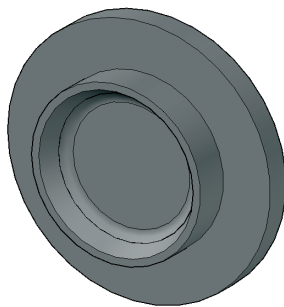


Рис. 2. Кришка підшипника глуха

римо всі побудовані лінії в єдину область (рис. 1). Далі командою Обертати отримуємо об'ємну модель, яку для наочності розташуємо в одному із аксонометричних зображень (наприклад у південно-західній ізометрії із каталогу ВИД / Виды) та розфарбуємо командою ВИД / Стили візуалізації / Концептуальний. Остаточний отриманий вигляд сформованої кришки підшипника глухої показано на рис. 2.

За аналогічною методикою будемо глуху кришку підшипника веденого валу, мазеутворюючі кільця, жезловий масло покажчик, розпірні кільця тощо.

Для створення отворів в кришках під кріпильні болти використовуємо команду Круговий масив. Щоб в подальшому була можливість ці отвори витягнути вибираємо команду Розчленувати і застосуємо її до масиву. Для наочного представлення кришки вибираємо команду Вид / ЮВ ізометрия, потім командою ВИТЯНУТЬ формуємо всі отвори. За таким алгоритмом створюються чотири кришки підшипників ведучого і веденого валів (рис. 3).

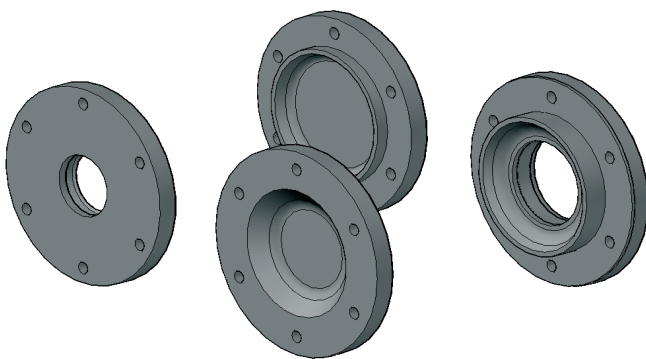


Рис. 3 Кришки підшипників

Алгоритм формування *геометричних моделей підшипників валів* схожий на описаний вище: створюємо контур для обертання (рис. 4), а потім круговим масивом копіюємо сфери. Наочне зображення підшипника кочення подано на рис. 5.

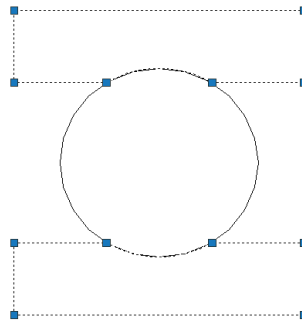


Рис. 4. Контур обертання підшипника

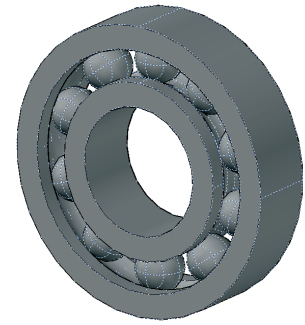


Рис. 5 Підшипник кочення

Створення геометричних *об'ємних моделей валів* можна виконати двома способами – обертання або витягування. Для способу обертання викреслюється плоский контур з урахуванням фаски та обертається навколо горизонтальної осі. Спосіб витягування передбачає створення кіл необхідних діаметрів, формування відповідних областей та витягування на потрібні відстані. Фаски виконуються командою ФАСКА. Далі моделюються пази під шпонку: креслимо контур шпонки в потрібному місці, потім видавлюємо на певну глибину, після чого вилучаємо змодельовану фігуру з валу. На валу-шестерні виконуємо профілі зубців (методика їх побудови показана нижче). В результаті отримуємо готові до компонування редуктора моделі валів (рис. 6).

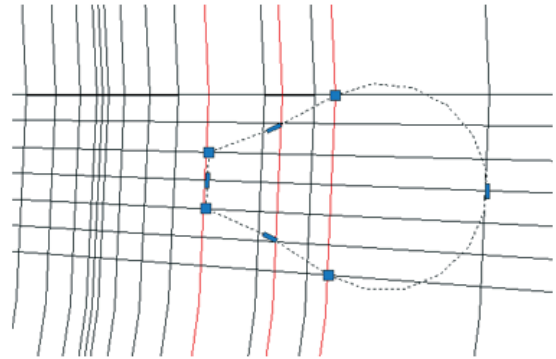


Рис. 6 Область профілю між зубцями

Найбільш цікавим з точки зору зображення елементом редуктора і таким, що здійснює передачу крутного моменту з одного валу на інший, є *косозубе зубчасте колесо*. Розглянемо поетапно методику геометричного моделювання колеса, габаритні розміри якого наведені вище в розрахунку.

Побудова зображення колеса аналогічна описаним вище моделям. Створюємо контур перетину колеса, робимо його областю та обертаємо навколо осі. Формуємо 8 отворів діаметром 25 мм в диску колеса. Після цього зробимо паз для шпонки та побудуємо профілі зубців.

Моделювання контуру евольвентного профілю зуба показано на рис. 6. З центру колеса на виді зліва командою Відрізок проведемо 4 відрізка довжиною 164 мм, а кут між ними $1,44^\circ$. Після цього проведемо бісектриси отриманих кутів, далі створюємо коло радіусом довжини відрізка. Також проводимо кола діаметром рівним діаметрам западин і ділильної окружності зубців, які вказані в розрахунках. Після цього будуємо профіль між зубцями командою Дуга за трьома точкам. З'єднуємо точки перетину прямих і бісектрис з колами западин. Командою РЕДАКТИРОВАТЬ ПОЛІЛІНІЮ з усіх дуг створюємо одну полілінію (див. рис. 9), яка відображає профіль між зубцями.

Створення *косозубого 3D профілю між зубцями* здійснюється таким чином. За формулою $t = \pi \cdot d \cdot \tan(90^\circ - \beta)$ обчислюємо висоту спіралі $t = 3.14 \cdot 306 \cdot \tan(90^\circ - 11^\circ) = 4200$. Потім вибираємо команду СПИРАЛЬ, вказуємо початок спіралі. В кінцевій частині маточини радіуси витків дорівнюють радіусу виступів зубців, вводимо кількість витків 0,06 і висоту 4200. За отриманою траєкторією командою СДВИГ створюємо 3D профіль між зубцями (рис. 7).

Моделювання *косозубих зубців колеса* здійснюється командою Круговий масив, якою робимо потрібну кількість западин, що залежить від кількості зубців. Після чого командою РАСЧЛЕНИТЬ розбиваємо масив, віднімаємо западини з колеса і видаляємо допоміжні лінії. В результаті отримуємо косозубе колесо. Для отримання моделі косозубого зачеплення потрібно дзеркально відобразити траєкторію зсуву профілю зуба та виконати щойно описані операції для моделювання валу-шестерні. У результаті отримуємо вал-шестерню і косозубе колесо (рис. 8).

Останнім етапом створення геометричної моделі є формування 3D креслення редуктора. Для цього змодельуємо зображення корпусу та кришки, розміри яких було розраховано вище. Під час моделювання застосовуються операції ПЕРЕМЕЩЕНИЕ, ОБЪЕДИНЕНИЕ, ВЫЧИТАНИЕ, ЗЕРКАЛЬНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ, ВЫДАВЛИВАНИЕ, ВЫТЯГИВАНИЕ [2, 130–138], а також використовуються команди побудови графічних примітивів.

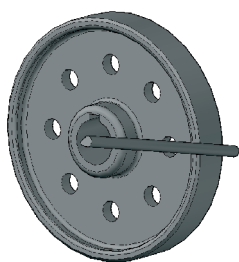


Рис. 7. 3 D профіль між звбцями

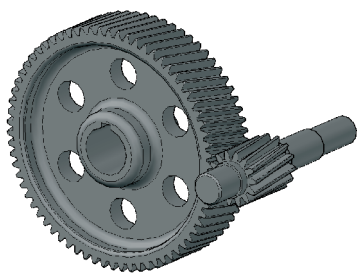


Рис. 8. Косозубе зачеплення колеса та валу шестерні

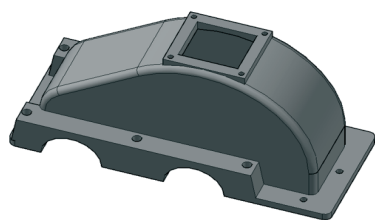
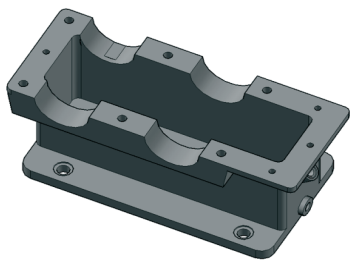


Рис. 9. Корпус редуктора та кришка корпусу

На відміну від описаних вище побудов для деталей типу тіла обертання, геометричне моделювання корпусу та кришки виконувалось за таким алгоритмом. Створюємо половину нижнього поясу кришки з отворами під фундаментні болти; зверху на поясі креслимо контури боковини корпусу та витягуємо зображення на певну висоту, робимо отвори під масляну пробку та жезловий масло-показчик. Потім моделюємо верхній пояс з відливами під кріплення кришок підшипника та робимо отвори під болти, що скріплюють корпус та кришку. Формуємо місця посадки під підшипники. Віддзеркалюємо половину корпусу та об'єднуємо ці дві половини.

При моделюванні кришки робимо пояс та відливи під кріплення з місцями посадки під підшипники; віддзеркалюємо половину кришки та об'єднуємо ці

дві половини в єдине ціле. Оформлюємо отвір для оглядового вікна. Отримані об'ємні моделі корпусу та кришки приведено на рис. 9.

Після створення зображень всіх складових елементів редуктора, розташовуємо їх на різних шарах одного креслення, змінюючи їх колір і встановивши стиль (рис. 10). У результаті компонування складових елементів (рис. 11) отримуємо об'ємну геометричну модель циліндричного одноступінчастого косозубого редуктора (кришку не відображено).

Таким чином, процес об'ємного геометричного моделювання циліндричного одноступінчастого косозубого редуктора є комплексним дослідженням, яке містить у собі рішення різнопланових задач. В першу чергу, це задачі геометричного моделювання всіх елементів редуктора, розгляд способів і методів їх реалізації, а також формулювання деяких рекомендації щодо доцільності використання того або іншого методу. Для розв'язання цих задач у даній роботі виконано габаритні розрахунки елементів, що складають циліндричний одноступінчастий косозубий редуктор, за даними цих розрахунків побудовано геометричні моделі елементів, що складають редуктор. Для геометричного моделювання використано графічне середовище AutoCAD 2014, яке є найбільш розповсюдженим для розв'язання задач геометричного моделювання. Отримані геометричні моделі складено у збірку для наочного зображення редуктора, яке представлено у роботі.

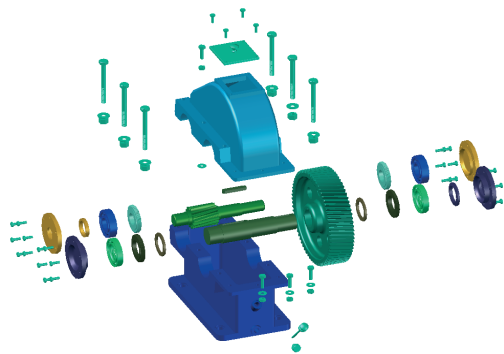


Рис. 10. Складові елементи редуктора

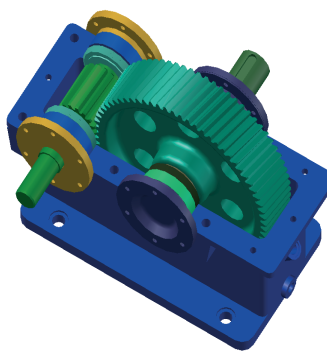


Рис. 11. Об'ємна геометрична модель циліндричного одноступінчастого косозубого редуктора

Список використаних джерел

1. Бідніченко О. Г. Команди редагування двовимірних графічних примітивів в системі AutoCAD : навчальний посібник / О. Г. Бідніченко. — Миколаїв : НУК, 2006. — 64 с.
2. Борисенко В. Д. Основи об'ємних зображень у середовищі проектування AutoCAD : навчальний посібник / В. Д. Борисенко, О. Г. Бідніченко, Д. В. Котляр. — Миколаїв : НУК, 2012. — 336 с.
3. Борисенко В. Д. Об'ємне моделювання в AutoCAD : навчальний посібник / В. Д. Борисенко, О. Г. Бідніченко, І. В. Устенко. — Миколаїв : ФОП Швець В. Д., 2014. — 224 с.
4. Иванов М. Н. Детали машин: учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений : изд.5-е, переработанное. — М. : Высшая школа, 1991. — 383 с.
5. Иванов М. Н. Детали машин. Курсовое проектирование / М. Н. Иванов, В. Н. Иванов. — М. : Высшая школа, 1975. — 551 с.

Elena BIDNICHENKO, Yuri EVSTIGNEEV
Mykolaiv

SOLID MODELING OF A SINGLE-STAGE HELICAL GEARBOX IN AUTOCAD

The article analyzes the structural features of the gearboxes; it contains the calculations of the geometrical parameters of elements of a single-stage helical gearbox, which are the initial data for geometric modeling of volumetric gear image. Showing techniques and methods of creating models of individual elements of the gearbox, carried out in the graphics system AutoCAD. Method of assembly of components is considered, and the resulting visual representation of a single-stage helical gearbox is shown.

Key words: solid modeling, single-stage helical gearbox, dimensions, geometric model of elements.

Елена БИДНИЧЕНКО, Юрий ЕВСТИГНЕЕВ
г. Николаев

ОБЪЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КОСОЗУБОГО РЕДУКТОРА В AUTOCAD

В статье проведен анализ конструктивных особенностей редукторов, выполнены расчеты геометрических параметров элементов одноступенчатого косозубого редуктора, которые являются исходными данными для геометрического моделирования объемного изображения редуктора. Показаны приемы и методы создания моделей отдельных элементов редуктора, выполненных в графической системе AutoCAD. Приведена методика сборки составных элементов и показано полученное наглядное изображение одноступенчатого косозубого редуктора.

Ключевые слова: объемное моделирование, одноступенчатый косозубый редуктор, габаритные размеры, геометрические модели элементов.

Стаття надійшла до редколегії 19.02.2016

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІПЕРБОЛОЇДНОЇ СІТЧАСТОЇ КОНСТРУКЦІЇ

У роботі досліджується гіперboloїдна сітчаста конструкція на міцність та стійкість. Моделювання геометрії та чисельний розрахунок напружено-деформованого стану, власних частот та форм вільних коливань сітчастої вежі виконано методом скінченних елементів, реалізованим в комп'ютерній програмі FEMAP з розв'язувачем NASTRAN. Досліджується міцність та стійкість гіперboloїдної сітчастої вежі при різних значеннях кутів нахилу проєкції прямолінійних твірних до контуру основи при збереженні висоти конструкції. Проводиться порівняння за міцністю та стійкістю гіперboloїдної сітчастої вежі з конусною сітчастою вежею, еквівалентною за радіусами основ, висотою, масою.

Ключові слова: гіперboloїдна сітчаста конструкція, метод скінченних елементів, FEMAP, напружено-деформований стан, власні частоти, форми вільних коливань.

Гіперboloїдна конструкція, сконструювана у вигляді несучої сталевий сітчастої оболонки радянським інженером В. Г. Шуховим, досі розцінюється як вагомий внесок в історію архітектури. Вежа Шухова має оригінальну витончену сітчасту конструкцію, завдяки чому досягається мінімальна вітрове навантаження, що представляє головну небезпеку для високих споруд. За формою секції башти – це однопорожнинні гіперboloїди обертання, зроблені з прямих балок, що упираються кінцями в кільцеві підставки. Основний принцип, закладений Шуховим при проектуванні, – певна частка рухливості елементів конструкції – забезпечує самокомпенсацію по відношенню до зовнішніх навантажень. Ажурна сталева конструкція стійка і практична, поєднує в собі міцність і легкість.

Гіперboloїдні конструкції Шухов використовував у сотнях споруд: водонапірних вежах, телерадіовежах, опорах ліній електропередач, щоглах військових кораблів. Водонапірна вежа Шухова була встановлена і у Миколаєві. Сітчастих водонапірних веж Шухов спроектував сотні, при цьому кожна вежа мала свої індивідуальні відмінності – як необхідні технічні, так і художні.

За патентом Шухова досі будуються гіперboloїдні вежі по всьому світу (Цюрих – 2003, Гуанчжоу – 2010).

У наш час задачі із складною геометрією зазвичай вирішуються чисельними методами, до яких відносяться метод скінченних елементів. Цей метод не обмежений ні формою тіла, ні способом навантаження. Це разом з потужною обчислювальною технікою сприяє його поширенню в інженерній практиці. Програмний засіб FEMAP дає можливість розраховувати міцність, стійкість конструкцій будь-якої форми при будь-яких способах навантаження.

Основна ідея методу скінченних елементів полягає в тому, що область визначення неперервної величини розбивається на скінчене число малих областей – скінченних елементів. Ці елементи в сукупності апроксимують форму області.

У NASTRAN реалізовано варіант методу скінченних елементів, в якому шуканим є вектор вузлових переміщень $\{q\}$, що визначаються для задач статки з рівняння жорсткості [1, 178]

$$[\mathbf{K}]\{q\} = \{P\}, \quad (1)$$

де $\{P\}$ – вектор узагальнених сил, $[\mathbf{K}]$ – матриця жорсткості конструкції, що визначається матеріалом та формою конструкції.

Переміщення і деформації будь-яких точок всередині елемента виражається через матрицю $[\Phi]$ базисних функцій скінченного елемента та значення переміщень $\{q\}_e$ вузлів елемента, що є результатом вибірки з глобального вектора вузлових переміщень $\{q\}$:

$$\{U\} = [\Phi]\{q\}_e. \quad (2)$$

Деформації і напруження будь-яких точок всередині елемента визначаються рівняннями:

$$\{\epsilon\} = [\mathbf{B}]\{q\}_e, \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\}, \quad (4)$$

де $[B]$ – блочна матриця диференціювання по глобальним координатам, $[D]$ – матриця модулів пружності.

Метод скінченних елементів і чисельні алгоритми розв’язування динамічних задач, реалізовані в NASTRAN, дозволяють досліджувати досить широке коло прикладних проблем динаміки. При встановленні власних частот та форм коливань в NASTRAN розв’язується рівняння [1, 186]:

$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0. \quad (5)$$

де $[M]$ – матриця мас конструкції. Рівняння (5) має N додатних розв’язків – власних частот ω_k , причому можливі парні значення. Зазвичай шукаються не всі корні рівняння (5), а декілька найменших значень, оскільки тільки при нижчих власних частотах амплітуди коливань мають відносно великі значення.

Вектор вузлових зміщень конструкції $\{\lambda\}$ є лінійною комбінацією з N гармонічних коливальних рухів:

$$\{\lambda\} = \sum_{k=1}^N \{A_k\} \cos(\omega_k t + \beta_k). \quad (6)$$

де $\{A_k\}$ – вектор амплітудних значень вузлових переміщень, β_k – початкова фаза коливань, що відповідають частоті ω_k .

Кожному значенню ω_k відповідає певне співвідношення між амплітудами A_{ki} , тобто всі амплітуди вектора можуть бути виражені через одну з них. Співвідношення між амплітудами A_{ki} визначають k -ту власну форму коливань. Всі ступені вільності в процесі коливань з власною частотою ω_k здійснюють синхронний рух. Таким чином, конфігурація конструкції не змінює своєї базової форми, а змінюються тільки амплітуди.

Зміна форми лінійної пружної конструкції з часом, коли вона коливається вільно або здійснює вимушені коливання, є лінійною комбінацією всіх її власних форм.

Оскільки значення компонентів власних векторів $\{A_k\}$ можуть бути знайдені не однозначно, а з точністю до постійного множника, то звичайно їх нормують за правилом:

$$\{A_k\}^T [M] \{A_k\} = 1. \quad (7)$$

Для розрахунку програмним засобом FEMAP конструкції необхідно спочатку створити скінченно-елементну модель і задати граничні умови. Скінченно-елементні моделі сітчастих веж створювались на основі змодельованих геометрій конструкцій.

Однопорожнинний гіперболоїд є двічі лінійчатою поверхнею. Якщо він є гіперболоїдом обертаня, то його можна отримати обертанням прямої навколо іншої прямої, мимобіжною з нею. Саме цю властивість лінійчатих однопорожнинних гіперболоїдів використовують в архітектурі.

Для побудови геометрії сітчастої конструкції радіуси основ та висота задавались такими ж як у водонапірної вежі Шухова в місті Миколаєві, а саме $R_H = 6,46$ м (42 фути), $R_B = 3,504$ м (23 фути), $H = 25,6$ м (84 фути). Відповідно вибирались кількості прямолінійних стержнів (24 пари) каркасу вежі та горизонтальних кілець (9 проміжних), що укріплюють каркас конструкції. Сітчаста поверхня вежі являє собою єдину систему прямолінійних стержнів та кілець, з’єднаних заклепками між собою.

Геометричні моделі конструкцій відрізняються кутами нахилу α проєкцій прямолінійних твірних до контуру основи. У першій моделі $\alpha = 80^\circ$, у другій $\alpha = 85^\circ$, у третій $\alpha = 90^\circ$, у четвертій $\alpha = 95^\circ$, у п’ятій $\alpha = 100^\circ$. Отже у першій (рис. 1, а) і другій моделях (рис. 1, б) найвужчі перерізи займають проміжне положення між основами, причому для першої моделі це положення нижче, у третій моделі

(рис. 1, *а*) верхній переріз є самим вузьким (горлом), у четвертій (рис. 1, *з*) і п'ятій моделі (рис. 1, *д*) найвузьчі перерізи розташовані на продовженнях твірних вище верхньої основи, причому для п'ятої моделі це положення вище. Відстані між точками опирання стержнів у нижню основу для всіх гіперболоїдних моделей однаковий. Розташування розпірних кілець по висоті еквівалентне.

В якості матеріалу задавалася сталь з характеристиками: модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,32$, густина $\rho = 7800$ кг/м³.

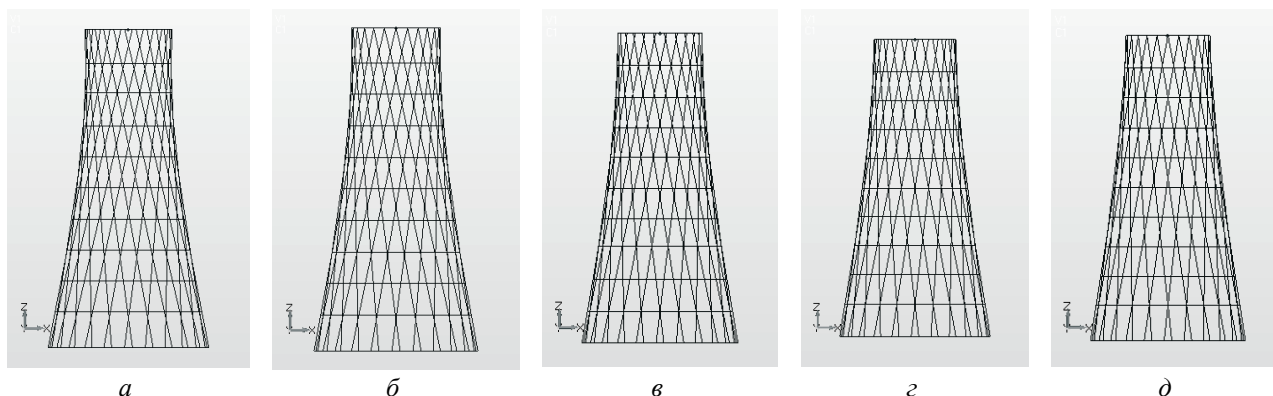


Рис. 1. Геометричні моделі гіперболоїдних веж

Для розбивки всіх моделей веж були вибрані скінченні елементи типу BEAM з профілем кутника 11×11 см товщиною 8 мм для прямих і CURVED BEAM з відповідними радіусами кривизни з прямокутним профілем розмірами 10×1 см для проміжних кілець та 20×2 см для опорних.

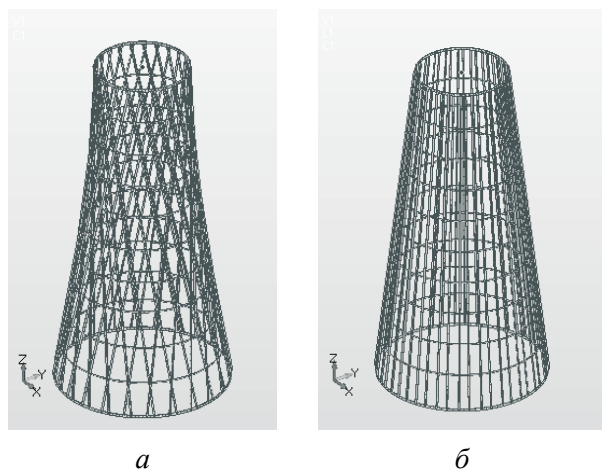


Рис. 2. Скінченно-елементні моделі гіперболоїдної (*а*), конусної (*б*) веж

Для порівняння будувалася сітчаста конструкція у формі зрізаного конуса висотою і радіусами основ рівними відповідно висоті гіперболоїдної вежі і радіусам основ вежі. Скінченно-елементні моделі гіперболоїдної (рис. 2, *а*) та конусної (рис. 2, *б*) сітчастих веж представлені.

Маси скінченно-елементних гіперболоїдних моделей не відрізняються більше ніж на 0,2%, маса скінченно-елементної конусної моделі відрізняється від мас гіперболоїдних моделей менше ніж на 0,5 % при заданих поперечних перерізах стержнів та кілець.

Конструкції закріплювалися у нижніх вузлах. Спочатку проводився розрахунок власних частот та форм коливань для ненавантажених веж. Відношення перших власних частот всіх змодельованих веж до відповідних частот гіперболоїдної вежі третьої моделі, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Приведенні значення власних частот коливань гіперболоїдних та конусної веж

№ частот	Гіперболоїдна вежа					Конусна вежа
	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	
Mode 1, 2	1,19	1,11	1	0,91	0,81	0,26
Mode 3, 4	1,20	1,11	1	0,92	0,82	0,30
Mode 5, 6	1,16	1,08	1	0,92	0,81	0,30
Mode 7, 8	1,15	1,08	1	0,92	0,84	0,30
Mode 9, 10	1,17	1,08	1	0,93	0,86	0,38

Спостерігається зменшення значень частот для гіперболоїдної вежі при збільшенні кута нахилу проєкцій прямолінійних твірних до контуру основи. Для конусної вежі частоти в 2,5 – 3,5 разу менші.

Деякі відповідні форми коливань представлені на рисунку 3 для першої моделі гіперболоїчної та для конічної сітчастих веж. Для наочності зміщення показані в збільшеному вигляді. Так як вежі мають осьову симетрію, то частоти утворюють пари близьких значень, яким відповідають однакові форми, зміщені по фазі. Форми власних коливань та порядок їх виникнення не однаковий для розглядуваних веж. Власні частоти та форми коливань розраховані для ненавантажених конструкцій.

На водонапірну вежу діє вага бака з водою та сила вітру. Вертикальне навантаження вежі задавалось 6500 кН. Розрахунки показали, що навіть при дуже сильному вітру, вітрове навантаження порівняно з вертикальним навантаженням є незначним, тому не задавалось. Для рівномірності прикладання вертикальне навантаження передавалось на вузли верхньої основи через RIGID-елемент. Враховувалася також власна вага конструкції [2, 281–282].

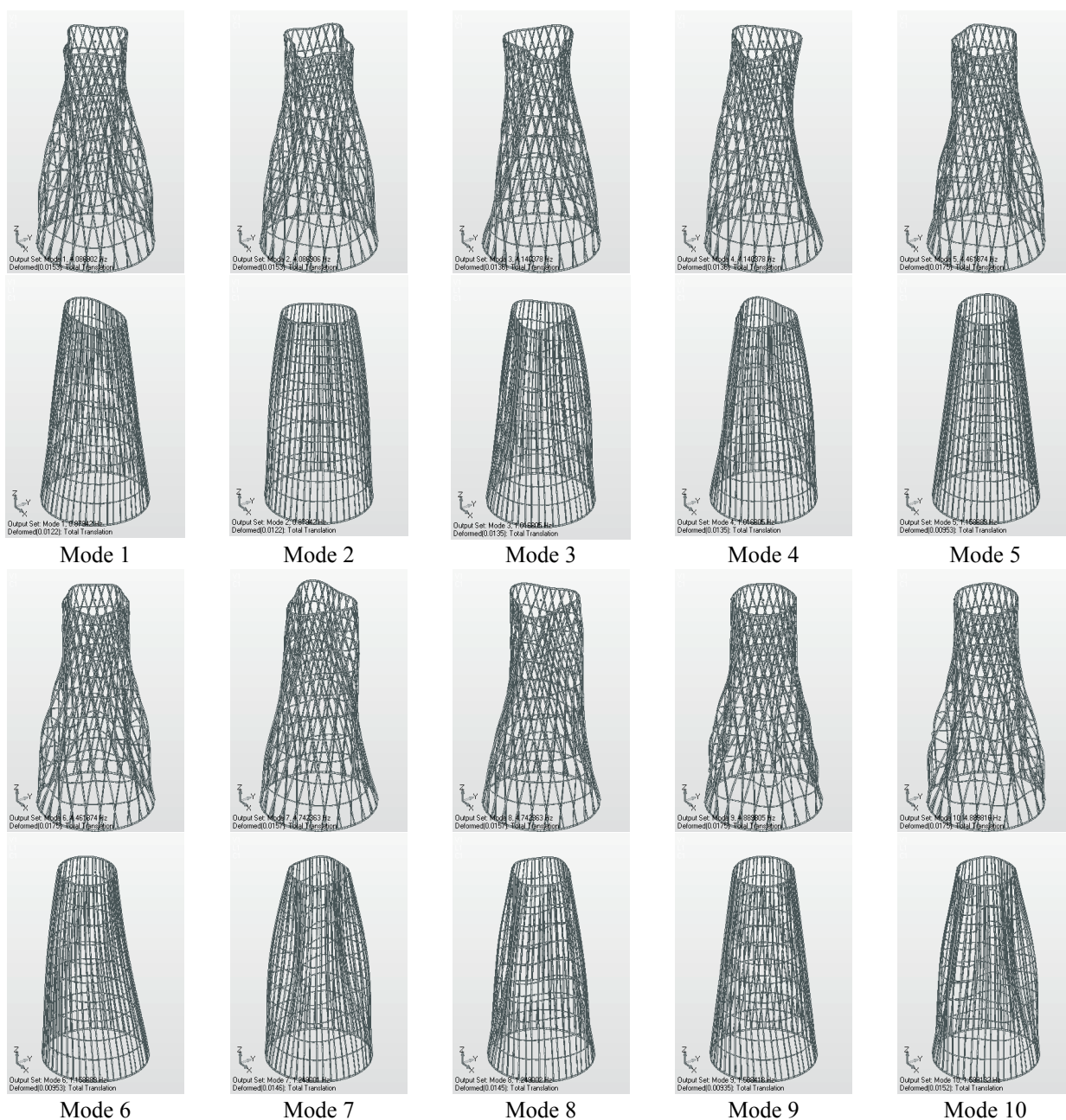


Рис. 3. Форми власних коливань першої моделі гіперболоїдної та конусної сітчастих веж

Відношення максимальних напружень розтягу і стиску та коефіцієнтів запасу стійкості для гіперболоїдних веж у відношенні до відповідних значень напружень гіперболоїдної вежі третьої моделі, отримані при заданому навантаженні, наведені в таблиці 2.

Спостерігається загальна тенденція зменшення значень напружень стиску в прямолінійних стернях та напружень розтягу в розпірних кільцях гіперболоїдної вежі при збільшенні кута нахилу проєкцій прямолінійних твірних до контуру основи. Поведінка коефіцієнта запасу стійкості аналогічна.

Таблиця 2

Приведенні значення максимальних напружень та коефіцієнтів стійкості для гіперболоїдних веж

	Гіперболоїдна вежа				
	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5
Напруження розтягу	1,70	1,42	1	1,06	0,81
Напруження стиску	1,09	0,99	1	0,98	0,98
Коефіцієнт запасу стійкості	1,2	1,1	1	0,9	0,8

Для конусної вежі коефіцієнт запасу стійкості в 2,8 разу менший в порівнянні із коефіцієнт запасу стійкості гіперболоїдної вежі третьої моделі.

Список використаних джерел

1. Рудаков К. М. FEMAP. Геометричне та скінченно-елементне моделювання конструкцій у MSC. visual Nastran for Windows : посібник / К. М. Рудаков. — К. : НТУУ «КПІ», 2005. — 218 с.
2. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д. Г. Шимкович. — М. : ДМК, 2001. — 447 с.

Olena BOYCHUK, Maxim BORISENKO
Mykolaiv

HYPERBOLOID MESH CONSTRUCTION COMPUTER SIMULATION

In this paper the hyperboloid mesh construction is researched for strength and stability. Mesh tower geometry modeling and numerical calculations of its stress-strain state, natural frequencies and free oscillations forms were made by finite element method implemented in FEMAP software with NASTRAN solver. Hyperboloid mesh tower's durability and stability at various rectilinear generators projections to a basis contour tilt angles values while maintaining the height of the structure are researched. An equivalent height, base radiuses and weight hyperboloid and conical mesh tower's strength and stability comparison is carried out.

Key words: hyperboloid mesh construction, finite element method, FEMAP, stress-deformed state, the natural frequencies, forms of free oscillations.

Елена БОЙЧУК, Максим БОРИСЕНКО
Николаев

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИПЕРБОЛОИДНОЙ СЕТЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ

В работе исследуется гиперболоидная сетчатая конструкция на прочность и устойчивость. Моделирование геометрии и численный расчет напряженно-деформированного состояния, собственных частот и форм свободных колебаний сетчатой башни выполнен методом конечных элементов, реализованным в компьютерной программе FEMAP с решателем NASTRAN. Исследуется прочность и устойчивость гиперболоидной сетчатой башни при различных значениях углов наклона проекций прямолінійных образующих к контуру основания при сохранении высоты конструкции. Проводится сравнение по прочности и устойчивости гиперболоидной сетчатой башни с конусной сетчатой башней, эквивалентной по радиусам оснований, высоте, массе.

Ключевые слова: гиперболоидная сетчатая конструкция, метод конечных элементов, FEMAP, напряженно-деформированное состояние, собственные частоты, формы свободных колебаний.

Стаття надійшла до редколегії 05.03.2016

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОСКИХ КРИВИХ У НАТУРАЛЬНІЙ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ

У статті розглядається метод моделювання плоских кривих із застосуванням лінійних, квадратичних і кубічних залежностей розподілу кривини від довжини дуги. На підставі цих ділянок формуються складені криві із забезпеченням в точках стикування рівності перших і других похідних, кривини та похідної від кривини по довжині дуги.

Ключові слова: плоска крива, складена крива, моделювання, закон розподілу кривини лінійний, квадратичний, кубічний, довжина дуги.

У сучасній науковій літературі є достатньо публікацій, присвячених розробці нових чи удосконаленню існуючих методів моделювання кривих ліній. Незважаючи на те, що в прикладній геометрії існує велика кількість способів побудови плавних кривих, все ж таки зацікавленість цим питанням не знижується, що пояснюється широким застосуванням ліній в науці і техніці. Особливої важливості питання моделювання ліній набуває при проектуванні обводів таких складних технічних об'єктів як корпус судна, кузов автомобілю, крило літака, лопатки турбін і компресорів тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У практиці моделювання кривих ліній певного поширення набули такі методи, як Ерміта [5], Безьє [6], Бола [8], бета-сплайнів [3], кривих Catmull-Rom [9], B-сплайнів [5]. В комп'ютерній графіці застосовуються NURBS-криві, які є неоднорідними раціональними сплайнами Безьє і задаються координатами початкової і кінцевої точок та сукупністю проміжних точок [11].

Останнім часом при моделюванні кривих почали застосовуватися їх параметричні рівняння, в яких за параметр береться довжина дуги кривої. Це означає, що для таких кривих можуть бути знайдені їх рівняння в функції довжини дуги. Але подібних кривих обмаль і не всі вони можуть бути корисними в практичних застосуваннях.

Автори робіт [1, 2, 7] моделюють криві із застосуванням лінійних законів розподілу кривини. Різні закони розподілу кривини для плоских кривих і кривини та скруту для просторових кривих стосовно лопаток турбін і компресорів досліджені в роботі [4].

Постановка завдання. Метою статті є моделювання та дослідження плоских кривих ліній, кривина яких підпорядковується лінійній, квадратичній або кубічній залежності від довжини її дуги, формування на їх підставі складених кривих за умови забезпечення в точках стикування рівності перших і других похідних, кривини та похідної від кривини, визначеної по довжині дуги.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що крива може бути визначена її натуральним рівнянням $k = k(s)$, де k – кривина кривої; s – довжина дуги.

Кривина кривої k визначається наступною залежністю:

$$k(s) = d\varphi/ds, \quad (1)$$

де φ – кут, утворений між віссю абсцис та дотичною до кривої лінії.

Вираз (1) дозволяє знайти диференціал кута $d\varphi$, проінтегрувавши який можна визначити кут нахилу дотичної до кривої в довільній її точці:

$$\varphi(s) = \varphi(0) + \int_0^s k(s) ds. \quad (2)$$

Рівняння кривої в натуральній параметризації мають вигляд:

$$x(s) = x(0) + \int_0^s \cos \varphi(s) ds; \quad y(s) = y(0) + \int_0^s \sin \varphi(s) ds, \quad (3)$$

де $x(0)$, $y(0)$ – сталі інтегрування, які відповідають початковій точці кривої.

У цій роботі при моделюванні кривих застосовуються лінійні (4), квадратичні (5) та кубічні (6) залежності кривини від довжини дуги:

$$k = as + b; \quad (4)$$

$$k = as^2 + bs + c; \quad (5)$$

$$k = as^3 + bs^2 + cs + d. \quad (6)$$

Невідомі коефіцієнти цих залежностей визначаються в процесі моделювання кривої, яка має проходити через певні точки та мати задані кути нахилу дотичних і навіть забезпечувати необхідні значення кривини тощо.

Застосувавши у рівнянні (2) вище записані залежності розподілу кривини, отримаємо вирази для розподілу кутів нахилу дотичних вздовж кривої:

$$\varphi(s) = \varphi(0) + as^2/2 + bs; \quad (7)$$

$$\varphi(s) = \varphi(0) + as^3/3 + bs^2/2 + cs; \quad (8)$$

$$\varphi(s) = \varphi(0) + as^4/4 + bs^3/3 + cs^2/2 + d \cdot s. \quad (9)$$

Оскільки за умовами моделювання кривих передбачається, що кути нахилу дотичних в початковій φ_1 та кінцевій φ_2 точках відомі, це дозволяє підстановкою до виразів (7) – (9) записати наступні залежності:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + aS^2/2 + bS; \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + aS^3/3 + bS^2/2 + cS; \quad (11)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + aS^4/4 + bS^3/3 + cS^2/2 + d \cdot S. \quad (12)$$

У виразах (10) – (12) під S розуміється довжина дуги кривої між початковою та кінцевою точками, яка на початку моделювання є також величиною невідомою і підлягає визначенню в процесі моделювання кривої для заданих умов її побудови.

На перший погляд з появою довжини дуги S кількість невідомих збільшується, але із виразів (10) – (12) можна знайти залежності для визначення одного із коефіцієнтів прийнятого закону розподілу кривини. При виконанні розрахунків, пов'язаних із моделюванням конкретних кривих, було визначено, що із виразів (10) – (12) доцільно визначати коефіцієнт a . Отже будемо мати:

$$a = \frac{2}{S} \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{S} - b \right); \quad (13)$$

$$a = \frac{3}{S} \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{S^2} - \frac{bS}{2} - c \right); \quad (14)$$

$$a = \frac{4}{S} \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{S^3} - \frac{bS^2}{3} - \frac{cS}{2} - d \right). \quad (15)$$

1. *Моделювання кривих з лінійним законом розподілу кривини.* Задачу моделювання кривих з лінійним законом (4) розподілу кривини будемо розв'язувати за умови, що відомі координати початкової та кінцевої точок, а також кути нахилу в них дотичних. Необхідно визначити три невідомих величини: коефіцієнти a і b та довжину дуги S . Залежність (13) зменшує кількість невідомих до двох.

Знайти ці невідомі можна тільки числовим методом, зокрема методом мінімізації. За цільову функцію в цій задачі прийнято відхилення кінцевої точки кривої, що проміжно розраховується, від заданої точки:

$$\delta_i = \sqrt{(\bar{x} - x_{i+1})^2 + (\bar{y} - y_{i+1})^2}, \quad (16)$$

де \bar{x} , \bar{y} – координати проміжної точки, визначеної з деякими значеннями невідомих параметрів.

Задавшись значеннями невідомих коефіцієнта b та довжини дуги ділянки S , можна за виразами (3) розрахувати значення координат деякої умовно кінцевої точки кривої, які, цілком зрозуміло, не будуть збігатися з вихідними значеннями координат кінцевої точки кривої, що моделюється.

Для мінімізації функціоналу (16) застосовано високоефективний алгоритм, запропонований Хуком-Дживсом [10], який розроблено для мінімізації функції багатьох змінних. Процес розрахунків закінчується, коли кінцева точка проміжної ділянки кривої наближається до заданої точки з наперед обумовленою точністю.

Отже, застосувавши алгоритм Хука-Дживса для кожної ділянки кривої, можна визначити з достатньою точністю коефіцієнт b і довжину дуги кривої S .

На рис. 1 – 4 наведені деякі результати моделювання кривих, що мають лінійний характер розподілу кривини від довжини дуги. Відрізки прямих на рисунках визначають кути нахилу дотичних в початковій і кінцевій точках. Світлі кола відповідають положенням початкової та кінцевих точок, маленькі кола на кривих лініях – проміжним точкам, отриманим у результаті моделювання кривих після остаточного визначення всіх невідомих величин.

Рис. 1 демонструє вплив ординати кінцевої точки на характер кривих за умови, що всі інші вихідні дані залишаються незмінними. Вплив абсциси кінцевої точки на змодельовані криві показано на рис. 2. Рис. 3 і 4 відображають вплив кутів нахилу дотичних до кривої, що моделюється, в початковій і кінцевій її точках. Кут φ_1 в початковій точці варіювався в межах від нуля до 50° з кроком 10° , а в кінцевій точці – від нуля до -50° з кроком -10° .

Оскільки параметри, що варіювалися, вибиралися довільно, то отримані наочні зображення підтверджують працездатність методу моделювання кривих із застосуванням лінійних залежностей від довжини дуги кривої.

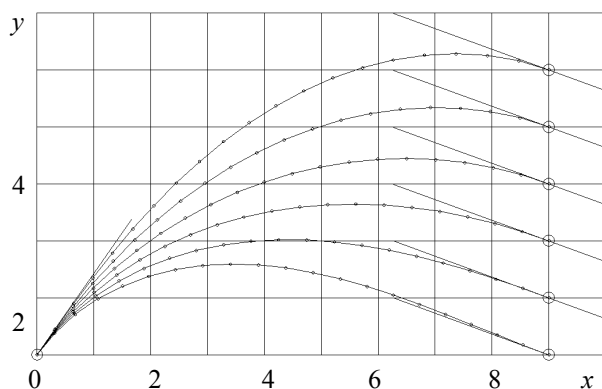


Рис. 1. Вплив ординати кінцевої точки на криві

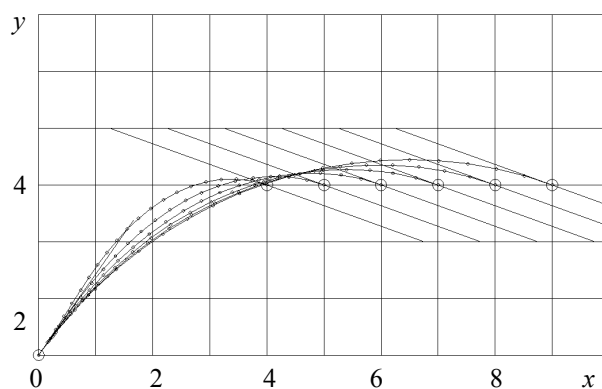


Рис. 2. Вплив абсциси кінцевої точки на криві

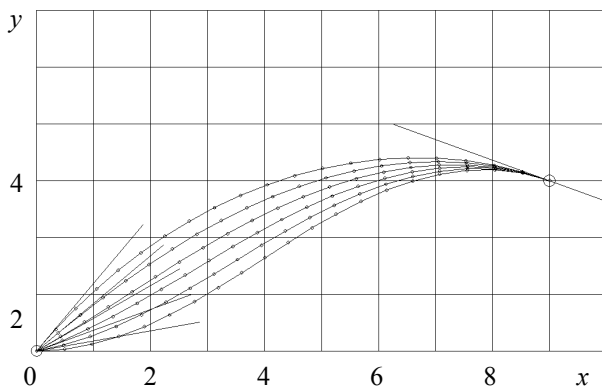


Рис. 3. Вплив кута нахилу дотичної в початковій точці на криві

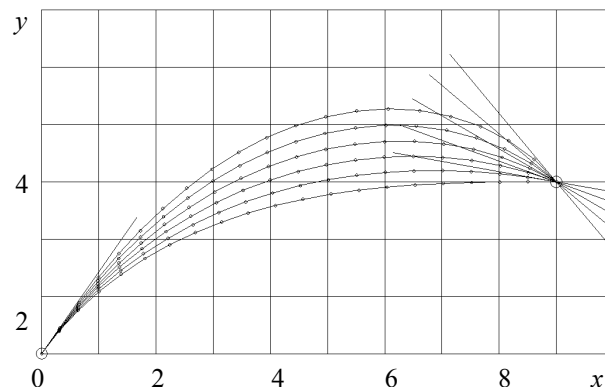


Рис. 4. Вплив кута нахилу дотичної в кінцевій точці на криві

2. *Моделювання складених кривих, ділянки яких будуються із застосуванням лінійних законів розподілу кривини.* Криві моделювалися за умови, що кривина кожної ділянки підпорядковувалася лінійній залежності від довжини дуги. Невідомі коефіцієнти a_i і b_i та довжина дуги S_i знаходилися числовим методом мінімізації функціоналу (16).

Результати моделювання складених кривих, кожна ділянка з яких підпорядковується лінійному закону розподілу кривини, наведені на рис. 5–8. Відрізки прямих, які зображені на рис. 5–7, відповідають дотичним, проведеним до кривої в точках спряження суміжних ділянок.

Окрім координат точок, що застосовуються при моделюванні кривої, мають бути задані похідні, які в геометричному сенсі відповідають кутам нахилу дотичних. Кути нахилу дотичних в першій і останній точках задавалися з вихідними даними. Кути нахилу дотичних у проміжних точках визначалися, подібно тому, як це зроблено в роботі [9]. У деякій i -й точці кут нахилу дотичної приймається рівним куту нахилу прямої, що з'єднує $(i - 1)$ та $(i + 1)$ точки. За цим принципом побудовані криві, показані на рис. 6–8.

На рис. 6 складена крива побудована за умови, що було змінено положення останньої точки та кута нахилу в ній дотичної. За цих обставин змінився кут нахилу дотичної в передостанній точці. Відповідно змінився характер проходження кривих другої та третьої ділянок.

Графічні результати, показані на рис. 7, отримані за умови, що змінено нумерацію другої і третьої точок. Зрозуміло, що результуюча складена крива суттєво змінила свою форму.

На рис. 8 показана цікава крива, яка отримана модифікованою програмою моделювання складеної кривої. В цій програмі величини кутів нахилу дотичних у всіх точках вводилися з вихідними даними, але складена крива все ж таки була побудована.

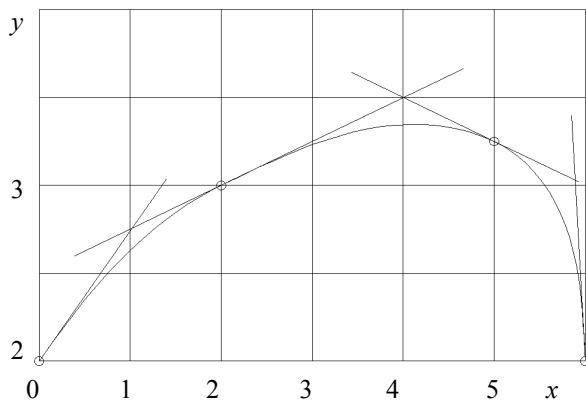


Рис. 5. Складена крива з лінійними законами розподілу кривини

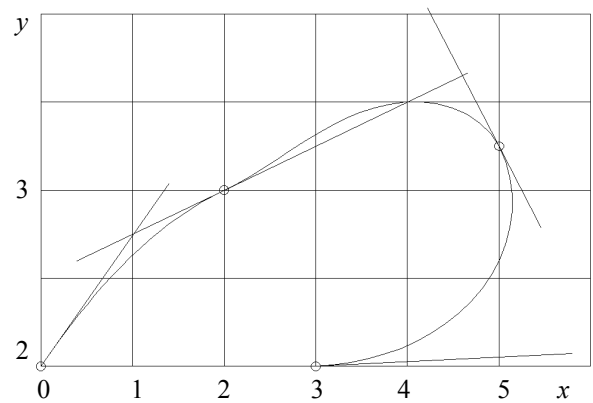


Рис. 6. Складена крива зі зміненою геометрією кінцевої точки

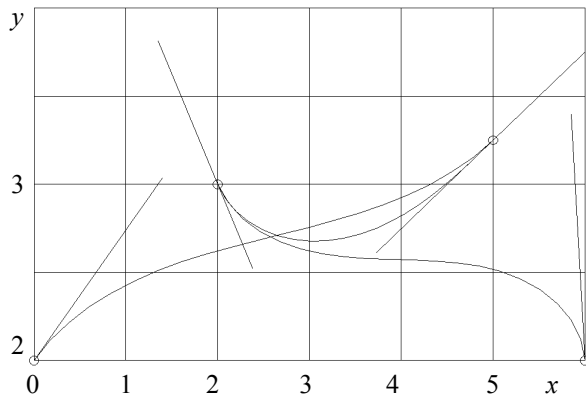


Рис. 7. Складена крива зі зміненими положеннями проміжних точок

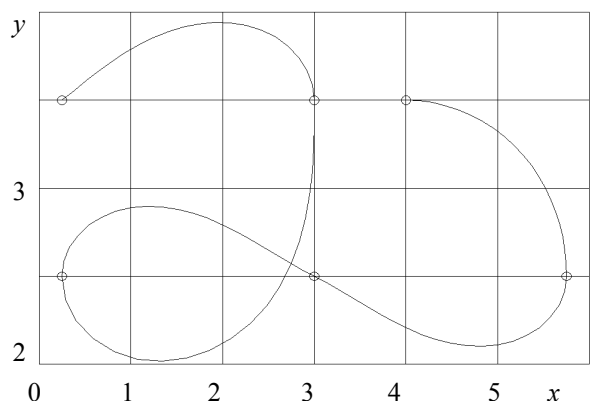


Рис. 8. Складена крива цікавої форми

3. *Моделювання складених кривих, ділянки яких будуються з лінійним і квадратичним законами розподілу кривини.* Розглянемо побудову кривої, яка складається з двох ділянок, за умови, що в точці стикування кривина ділянок буде однаковою. Подібне моделювання складеної кривої можна реалізувати, якщо будуть відомі координати початкової та кінцевої точок, а також деякої проміжної точки. Крім того, в усіх цих точках мають бути відомими кути нахилу дотичних. Тобто вихідні дані мають розташовуватися у площині так, як це показано на рис. 9.

Ділянку кривої T_1T_2 будемо моделювати з лінійним законом розподілу кривини вигляду (4). По завершенні моделювання цієї ділянки і визначенні невідомих величин можна знайти значення кривини в точці T_2 :

$$k_{T_2} = a_1 S_1 + b_1.$$

У цьому виразі індекс 1 означає приналежність коефіцієнтів і довжини дуги до першої ділянки складеної кривої, що моделюється.

Ділянку T_2T_3 будемо моделювати за умови, що в початковій її точці, тобто в точці T_2 , починається відрізок довжини дуги, отже $S_2 = 0$.

Для забезпечення умови рівності кривини в точці стикування ділянок необхідно збільшити степінь закону розподілу кривини на другій ділянці складеної кривої, зокрема застосувати квадратичну залежність вигляду (5).

Необхідність підвищення степеня закону розподілу кривини обумовлюється тим, що лінійний закон не забезпечує достатньої гнучкості для того, щоб на ділянці T_2T_3 довести криву, що моделюється, до точки T_2 із заданим кутом нахилу дотичної. Дійсно, при $S_2 = 0$ коефіцієнт b_2 буде дорівнювати значенню кривини в точці T_2 . Оскільки коефіцієнт a_2 визначається залежністю, подібній (13), то залишається тільки одна невідома величина, це довжина дуги S_2 , яка, зрозуміло, не може забезпечити доведення другої ділянки кривої до точки T_2 із заданим кутом нахилу дотичної.

Другу ділянку складеної кривої між точками T_2 і T_3 , будемо моделювати з використанням квадратичної залежності кривини від довжини дуги.

Порівнявши кривину в кінцевій точці першої ділянки з кривиною в початковій точці другої ділянки, де $S_2 = 0$, отримаємо, що $c_2 = k_{T_2}$.

Оскільки коефіцієнт a_2 визначається залежністю (14), то для моделювання другої ділянки складеної кривої необхідно числовим методом знайти коефіцієнт b_2 і довжину дуги S_2 . За рівняння, які дозволяють визначити вказані невідомі, застосовуються вирази (3) та відомі координати точки T_3 .

Працездатність запропонованого метода моделювання двохланкової складеної кривої підтверджується отриманими результатами. На рис. 10 наведені конкретні результати моделювання складеної кривої.

На рис. 10 зображені графіки розподілу кута ϕ нахилу дотичної до обводу, кривини k і похідної k' від кривини по довжині дуги. Довжина дуги взята у відносному вигляді.

З цих даних видно, що крива розподілу кута нахилу дотичної (крива 1) має задовільний характер, чого не можна сказати про дві інші криві. Крива 2 в точці стикування ділянок має злам, а крива 3 – терпить розрив.

Подібна ситуація є небажаною, необхідно розробити заходи по усуненню цього явища, що можливе тільки підвищенням степеня закону розподілу кривини.

4. *Моделювання складених кривих, ділянки яких будуються із застосуванням лінійного та кубічного законів розподілу кривини.* Моделювання ділянки T_2T_3 складеної кривої будемо виконувати

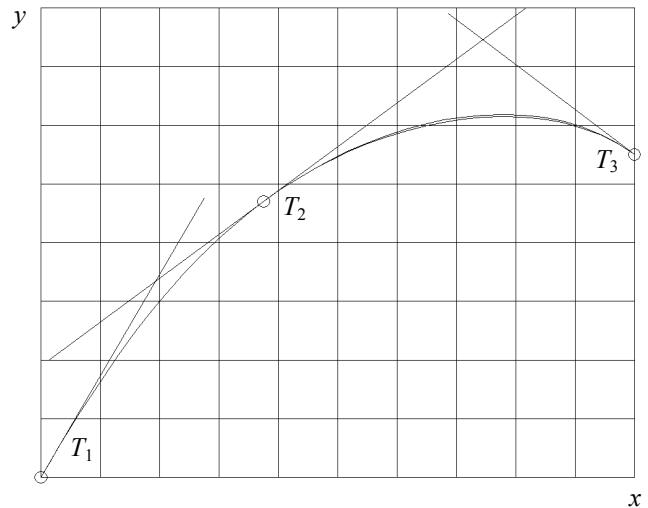


Рис. 9. Крива з лінійним і квадратичним розподілами кривини ділянок

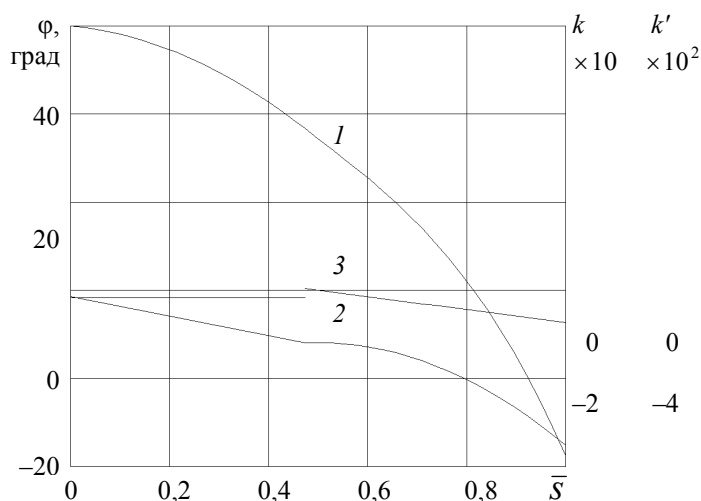


Рис. 10. Графіки диференціальних характеристик кривої з лінійним і квадратичним розподілами кривини ділянок: 1 – розподіли кута нахилу дотичної; 2 – кривини; 3 – похідної від кривини

Звідси випливає, що при $s = 0$, коефіцієнт c_2 буде дорівнювати a_1 . Оскільки коефіцієнт a_2 визначається виразом (15), то для побудови кривої другої ділянки складеної кривої залишається визначити коефіцієнт b_2 і довжину дуги S_2 , що можна зробити шляхом мінімізації відхилення кінцевої точки від заданої точки T_3 . Тобто, задача розв'язується таким же самим чином, що й у вище розглянутих прикладах.

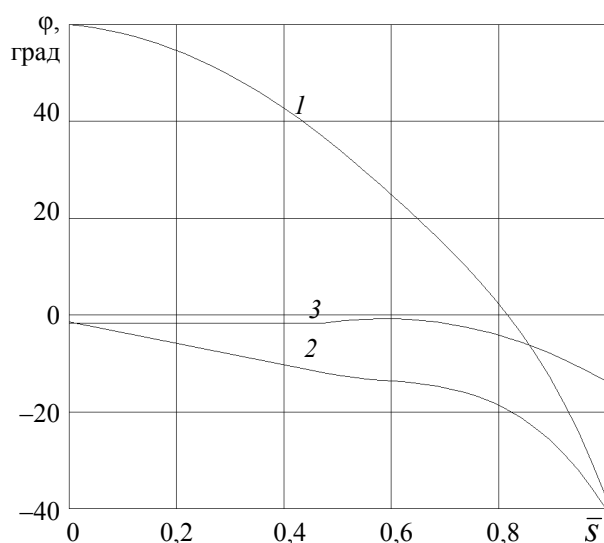


Рис. 11. Графіки диференціальних характеристик кривої з лінійним і кубічним розподілами кривини ділянок: 1 – розподіли кута нахилу дотичної; 2 – кривини; 3 – похідної від кривини

розподілу кривини від довжини дуги та складених кривих з квадратичними і кубічними залежностями кривини. Подальші зусилля в справі моделювання кривих мають бути спрямовані на забезпечення застосування законів розподілу кривини більш високих ступенів.

Список використаних джерел

1. Борисенко В. Д. Геометричне моделювання плоских кривих із застосуванням лінійного елемента кривини / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, В. С. Спіцин // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К.: КНУБА, 2006. — Вип. 76. — С. 43—49.

із застосуванням кубічного закону розподілу кривини вигляду (5). Це дозволить забезпечити в точці стикування рівність не тільки кривини, але й її похідної від довжини дуги.

Оскільки кривина ділянок складеної кривої в точці стикування має бути однаковою, то $d_2 = k_{T_2}$.

Величину коефіцієнта c_2 можна визначити за умови рівності похідної від кривини по довжині дуги в точці стикування.

Ця похідна в кінцевій точці першої ділянки буде дорівнювати величині коефіцієнта a_1 , тобто $k'_{T_2} = a_1$.

Похідна від виразу (6) для другої ділянки складеної кривої має вигляд:

$$k' = 3a_2s^2 + 2b_2s + c_2.$$

Уведення додаткової умови щодо рівності похідної кривини кривої від довжини дуги в точці стикування призвело до позитивного ефекту, який візуально можна побачити на рис. 11. На кривій залежності кривини від довжини дуги (крива 2) злам відсутній. Позитивний ефект, пов'язаний із застосованими заходами, також можна побачити на кривій розподілу похідної від кривини (крива 3), на якій усунена її неоднозначність у точці стикування.

Таким чином, завдяки підвищенню степеня закону розподілу кривини можна поліпшити графіки розподілу кривини та її похідної від довжини дуги.

Висновки і перспективи досліджень. Практичною реалізацією в широкому діапазоні варіювання вихідних даних доведена можливість моделювання кривих ліній із застосуванням лінійних графіків

2. Борисенко В. Д. Геометричне моделювання плоского криволінійного обводу за заданою кривою / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, В. Є. Спіцин // Геометричне та комп'ютерне моделювання. — Харків : ХДУХТ, 2004. — Вип. 5. — С. 30–34.
3. Поляков А. Ю. Методы и алгоритмы компьютерной графики в примерах на Visual C++ / А. Ю. Поляков, В. А. Брусенцев. — СПб. : БХВ-Петербург, 2003. — 560 с.
4. Устенко С. А. Геометрична теорія моделювання криволінійних форм лопаткових апаратів турбомашин з оптимізацією їх параметрів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.01.01 Прикладна геометрія, інженерна графіка / Сергій Анатолійович Устенко. — К. : КНУБА, 2013. — 40 с.
5. Фокс А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт. — М. : Мир, 1982. — 304 с.
6. Шикин Е. В. Кривые на плоскости и в пространстве / Е. В. Шикин, М. М. Каменецкий. — М. : Фазис, 1997. — 325 с.
7. Adams J. A. The intrinsic method for curve definition / J. A. Adams // Computer Aided Design. — 1975. — Vol. 7, No 4. — P. 243—249.
8. Ball A. A. CONSURF, Part 2: Description of the algorithms / A. A. Ball // Computer Aided Design. — 1975. — № 7. — P. 237—242.
9. Catmull E. A class of local interpolating splines / E. Catmull, R. Rom // Computer Aided Geometric Design, R. E. Barnhill and R. F. Reisenfeld, Eds. Academic Press. — New York, 1974. — P. 317—326.
10. Hooke R. Direct search solution of numerical and statistical problems / R. Hooke, T. A. Jeeves // Journal of the ACM. — 1961. — Vol. 8, No 2. — P. 212—229.
11. Rogers D. F. An introduction to NURBS: With historical perspective / D. F. Rogers. — Morgan Kaufmann Publishers, 2001. — 324 p.

**Valeriy BORISENKO, Aleksey AGARKOV,
Constantin PALKO, Maxim PALKO**
Mykolaiv

MODELING OF CURVES IN THE NATURAL PARAMETRIZATION

In the article the method of curves modelling using linear, quadratic and cubic curvature distribution dependence on the length of the arc is proposed. Based on these parts the composed curves are formed, provided that the curves in the docking points have equal first and second derivatives, the derivative of curvature and curvature to the arc length.

Key words: plane curve, composed curve, modelling, curvature of the linear, quadratic, cubic distribution, arc length.

**Валерий БОРИСЕНКО, Алексей АГАРКОВ,
Константин ПАЛЬКО, Максим ПАЛЬКО**
г. Николаев

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВЫХ В НАТУРАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ

В статье рассматривается метод моделирования участков кривых с применением линейных, квадратичных и кубических зависимостей распределения кривизны от длины дуги. На основании этих участков формируются составные кривые при условии обеспечения в точках стыковки равенства первых и вторых производных, кривизны и производной от кривизны по длине дуги.

Ключевые слова: плоская кривая, составленная кривая, моделирование, распределение кривизны линейное, квадратичное, кубическое, длина дуги.

Стаття надійшла до редколегії 19.02.2016

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У СЕРЕДОВИЩІ LABVIEW

У роботі розглядається підхід до розрахунку поля температур у металевій штабі із застосуванням програмного середовища LabVIEW, яке дозволяє не тільки проводити числові розрахунки, але й візуалізовувати у відповідному вікні результати цих розрахунків. Розрахунки проводилися за явною та неявною розрахунковими схемами.

Ключові слова: програмне середовище LabVIEW, тепловий процес, нестационарний процес, розрахунок, візуалізація.

Теплові процеси відіграють важливе значення в різних галузях науки і техніки. Від правильного визначення поля температур залежить довговічність роботи тих чи інших деталей, а отже і виробу у цілому. Відомо, що перевищення температурного режиму в деталі призводить до зростання так званих температурних напружень, що негативно впливає на міцнісні характеристики. Особливо важливим питання розрахунку поля температур є в умовах, коли рівень температур залежить від часу, тобто коли мають місце нестационарні режими прогріву деталі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел свідчить про те, що питання розрахунку теплових процесів є актуальним [1, 3, 9–11]. Його числова реалізація виконується не тільки в різних програмних середовищах, але й у класичному програмуванні [12]. Певна увага науковців була зосереджена й на середовищі програмування LabVIEW. В різні часи дослідженням та розробкою віртуальних приладів у цьому середовищі займалися В. В. Алексєєв [2], В. К. Батоврин [4], Ю. К. Євдокімов [5], Р. Ш. Загидуллін [6], Н. Кехтарнаваз [7], Є. К. Климентьев [8] та інші дослідники, але здебільшого автори розглядали проблему побудови віртуальних приладів лише для вивчення мікропроцесорної техніки та електроніки.

Дослідити на прикладі металевій штабі можливість розрахунку та візуалізації нестационарного теплового процесу, який описується диференціальним рівнянням з частинними похідними другого порядку, в програмному середовищі LabVIEW.

Виклад основного матеріалу. Робота присвячена виконанню числових розрахунків та геометричному моделюванню отриманих результатів у програмному віртуальному середовищі LabVIEW теплових процесів, відображенню їх в графічному середовищі, тобто візуально з використанням графічного елемента програми.

LabVIEW віртуальне програмне середовище, яке використовує мову програмування G. Воно було розроблено для інженерів, студентів, вчених, інших фахівців, які бажають використовувати це програмне забезпечення в своїй практичній діяльності.

Середовище програми складається з двох вікон «Передня панель» (Front Panel), «Блок-діаграма» (Block Diagram).

Більшість різноманітних процесів (фізичних, теплових, газодинамічних тощо) описуються диференціальними рівняннями першого чи другого порядку. У загальному випадку ці рівняння не мають аналітичного рішення, яке подається елементарними функціями (наприклад розподіл температури в тілі). Такі рівняння розв'язують числовим методом, який є методом наближенням, але за певних умов він дає задовільний збіг з точним рішенням.

Отже, визначимо розподіл температури $u(x, t)$ в металевій штабі для будь-якого значення часу $t > 0$ за умови, що фізичні властивості матеріалу штаби є величинами сталими. У виразі $u(x, t)$ під u розуміється температура, під x – позовжня координата, а під t – час.

Розподіл температури в металевій штабі (рис. 1) описується наступним диференціальним рівнянням другого порядку з частинними похідними:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{для } 0 < x < 1, \quad 0 < t < t_{\max}. \quad (1)$$

Це рівняння можна розв'язати за наявності граничних і початкових умов, які записуються наступним чином:

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= f(x) & 0 \leq x \leq 1; \\ u(0, t) &= g_0(t) & 0 < t < t_{\max}; \\ u(1, t) &= g_1(t) & 0 < t < t_{\max}. \end{aligned} \quad (2)$$

де A – стала величина, яка залежить від теплопровідних здібностей матеріалу, з якого виготовлено штабу, а також від деяких інших чинників.

Для числового розв'язання поставленої задачі апроксимуємо диференціальне рівняння (1) разом з початковими та граничними умовами (2) скінченними різницями.

Для цього побудуємо сітку в області, обмеженій $0 \leq x \leq 1$ і $0 \leq t \leq t_{\max}$, з кроком $\Delta x = 1/M$ і $\Delta t = t_{\max}/N$, де M і N – деякі цілі числа.

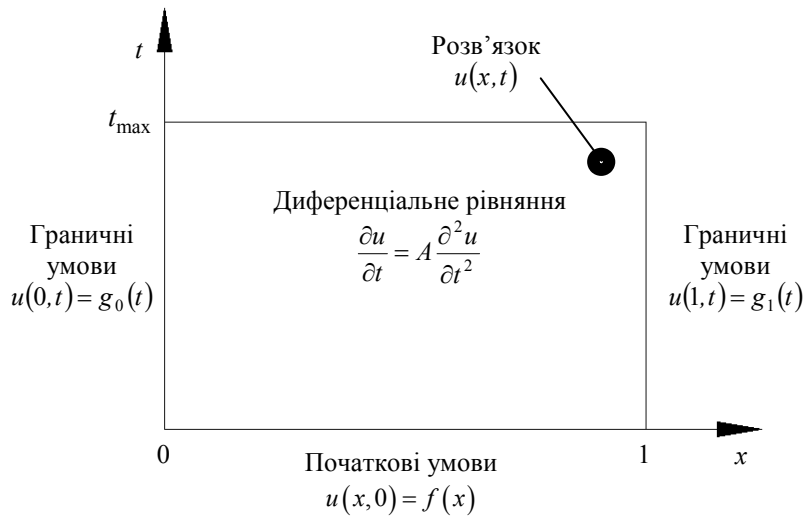


Рис. 1. Металева штаба

Під функцією $v_{i,j}$ будемо розуміти апроксимацію рівняння (1) скінченними різницями.

Для будь-якого вузла сітки (i, j) , для якого лічильник i не дорівнює 0 та M , а лічильник j не дорівнює 0, похідні диференціального рівняння (1) можна замінити скінченними різницями наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &\approx \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{\Delta \tau}; \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &\approx \frac{v_{i-1,j} - 2v_{i,j} + v_{i+1,j}}{\Delta x^2}. \end{aligned}$$

Тоді рівняння (1) наближено замінюється виразом:

$$\frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{\Delta t} = A \frac{v_{i-1,j} - 2v_{i,j} + v_{i+1,j}}{\Delta x^2}. \quad (3)$$

Існують два підходи до числового визначення значень функції $v_{i,j}$ у вузлах сітки, які прийнято називати розв'язанням за явною та неявною схемами.

При розв'язанні задачі визначення розподілу температур за явною схемою з рівняння (3) знаходять значення температури у вузлі $(i, j+1)$ за наступним виразом:

$$v_{i,j+1} = \lambda v_{i-1,j} + (1 - 2\lambda) v_{i,j} + \lambda v_{i+1,j}, \quad (4)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{A \Delta t}{\Delta x^2}.$$

Таким чином, із диференціального рівняння (1) отримано зв'язок між температурою наступного шару $(j+1)$ і поточного шару (j) .

Якщо для будь-якого рівня часу t_j відомі значення температури $v_{i,j}$, то з рівняння (4) можна безпосередньо визначити значення температури при t_{j+1} , тобто в шарі $(j+1)$.

Для визначення температури в нульовому шарі застосовуються визначені вище початкові умови, які записуються у вигляді:

$$v_{i,0} = f(x_i). \quad (5)$$

Виходячи з граничних умов, приходимо до висновку, що

$$\begin{aligned} v_{0,j+1} &= g_0(t_{j+1}); \\ v_{M,j+1} &= g_1(t_{j+1}). \end{aligned} \quad (6)$$

Застосувавши початкові умови у вигляді (5) і граничні умови у вигляді (6), можна за рівнянням (4) розрахувати значення температур у шарі ($j = 1$) і продовжити розрахунки до шару з номером N , тобто поступово збільшуючи час прогріву штаби.

Розглянемо процес зміни температури у штабі з паралельними сторонами ($0 \leq x \leq L$) за умови, що відомий коефіцієнт α її теплопровідності та в початковий момент часу ($t = 0$) температура θ_0 рівномірно розподілена вздовж штаби. Дві взаємно протилежні сторони знаходяться при постійній температурі θ_1 . Необхідно знайти розподіл температури залежно від часу та координати розташування пробної точки.

Поставлену задачу доцільно розв'язувати в безрозмірних одиницях. Уведемо до розгляду безрозмірні величини

$$T = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}; \quad \tau = \frac{\alpha t}{L^2}; \quad X = \frac{x}{L}.$$

Тоді рівняння (1) може бути переписаним і поданим у наступному вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = A \frac{\partial^2 T}{\partial X^2},$$

яке будемо розв'язувати за наявності таких умов:

$$\begin{aligned} \tau = 0: \quad T &= 0 \quad \text{для} \quad 0 \leq X \leq 1; \\ \tau > 0: \quad T &= 1 \quad \text{при} \quad X = 0 \quad \text{і} \quad X = 1. \end{aligned}$$

За цих обставин початкові і граничні умови приймуть просту форму:

$$f(X) = 0; \quad g_0(\tau) = g_1(\tau) = 1.$$

Слід зазначити, що модифікацією функціональних залежностей $f(X)$, $g_0(\tau)$, $g_1(\tau)$ для початкових і граничних умов можна розрахувати відповідне поле температур.

У вище розглянутому прикладі застосування явного методу розв'язання диференціального рівняння (1) апроксимовані температури $v_{i,j}$ у вузлах сітки залежали тільки від $v_{i-1,j-1}$, $v_{i,j-1}$ і $v_{i+1,j-1}$.

Розв'яжемо рівняння (1) з початковими і граничними умовами (2) за іншою схемою апроксимаційного подання похідних, яку називають неявною схемою. Запишемо скінченні різниці похідних у наступному вигляді:

$$\frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{\Delta t} = A \frac{v_{i-1,j+1} - 2v_{i,j+1} + v_{i+1,j+1}}{\Delta x^2}. \quad (7)$$

На відміну від попереднього прикладу, коли друга похідна визначалася в j -му шарі з часом t_j , зараз вона знаходиться зі значеннями апроксимованої температури в шарі $j+1$, якому відповідає час t_{j+1} . Це призводить до іншої схеми розташування чотирьох вузлових точок, задіяних в обчислювальному процесі.

Розв'яжемо рівняння (7) відносно $v_{i,j}$, яке запишемо в правій частині розв'язку. Будемо мати вираз:

$$-\lambda v_{i-1,j+1} + (1 + 2\lambda) v_{i,j+1} - v_{i+1,j+1} = v_{i,j}. \quad (8)$$

Граничні та початкові умови залишаються тими ж самими:

$$v_{0,j+1} = g_0(t_{j+1}), \quad v_{M,j+1} = g_1(t_{j+1}), \quad v_{i,0} = f(x_i).$$

Рівняння (8) можуть бути записані для кожної вузлової точки з діапазону $1 \leq i \leq M-1$ для будь-якого моменту часу, що призведе до системи з $M-1$ рівнянь з $M-1$ невідомими $v_{i,j+1}$ наступного вигляду:

Розглянемо розв'язання наступної системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} (1 + 2\lambda) v_{1,j+1} - \lambda v_{2,j+1} = v_{1,j} + \lambda g_0(t_{j+1}); \\ -\lambda v_{i-1,j+1} + (1 + 2\lambda) v_{i,j+1} - \lambda v_{i+1,j+1} = v_{i,j} & \text{для } 2 \leq i \leq M-2; \\ -\lambda v_{M-2,j+1} + (1 + 2\lambda) v_{M-1,j+1} = v_{M-1,j} + \lambda g_1(t_{j+1}). \end{cases}$$

Ця система рівнянь має назву тридіагональної, оскільки заповненими є тільки три діагональні елементи кожного рядка. Подібні системи доцільно розв'язувати рекурсивним методом.

На завершення треба відзначити, що розроблено алгоритми моделювання нестационарних теплових полів із застосуванням явної та неявної схем числового розв'язання диференціального рівняння, яке разом з граничними і початковими умовами описує розподіл температур.

Виконуємо основні цілі програми, тобто завдання для того щоб задовольнити всім поставленим умовам програмного продукту.

Спочатку вводимо всі необхідні константи, змінні, значення необхідні для знаходження температурних оптимальних параметрів датчика.

Розглянемо випадки роботи програми.

Загальний випадок програми.

У цьому прикладі вибрані необхідні параметри, функціонування системи, за стандартними даними.

Програма в режимі роботи «Перегрів».

У цьому режимі програма виконує обчислення температури та видає результати. При значенні більше 100°C світловий діод загоряється напроти того коефіцієнта, значення якого перевищило цю допустиму норму тоді висвітлюється повідомлення про те, що температуру перевищено до температура кипіння, або навіть вище.

Програма в режимі «Холод».

У цьому режимі програма виконує усі обчислення температури з температурних датчиків. При значенні менше нуля, тобто при всіх від'ємних значеннях, світиться, або світяться ті світлові діоди або світловий діод, в якому є від'ємні значення.

Програма в режимі «Введено значення 0»

У режимі «Введено значення 0» при введенні в поле для вводу значень, або текстових констант, які дорівнюють нулю буде світитися один, або кілька світло діодів при їх вводити в це поле.

Результати виконання програми.

На рис. 2 зображено можливі варіанти індикації світлодіодних датчиків при можливих введених значеннях.

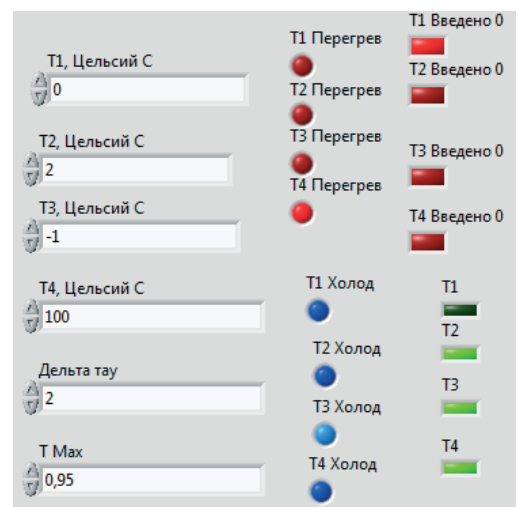


Рис. 2. Світлодіодні датчики

На рис. 3 і 4 зображені загальний вигляд програми і деякі результати розрахунків температурних полів в програмному середовищі LabVIEW.

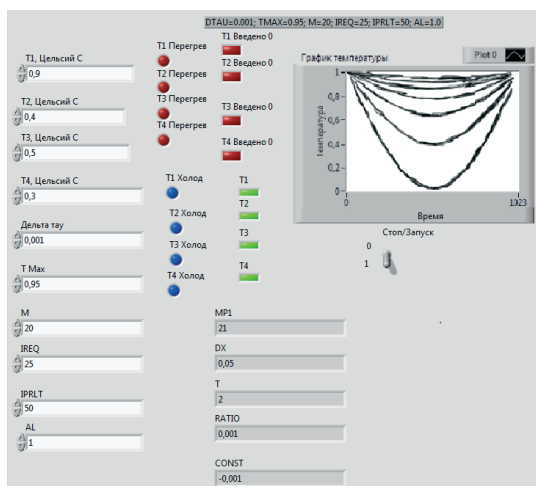


Рис. 3 Загальний вигляд програми

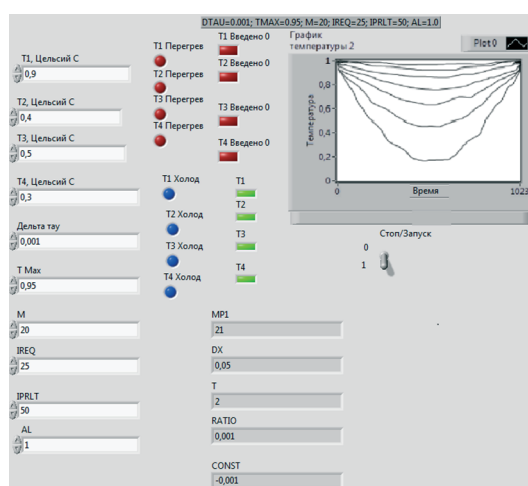


Рис. 4 Деякі результати розрахунків

На рис. 5 зображено блок схему програми в цьому програмному середовищі.

Вперше на прикладі металевої штаби застосовано програмний продукт LabVIEW для розрахунків і візуалізації нестационарного температурного поля за явною і неявною схемами числового розрахунку диференціального рівняння другого порядку з частинними похідними та заданими граничними і початковими умовами. В подальшому віртуальний лабораторний стенд, яким є програмне середовище LabVIEW, можна вдосконалити і розвивати його.

Проведені розрахунки при різних вихідних даних довели можливість застосування середовища LabVIEW для моделювання теплових нестационарних полів без написання програми алгоритмічною мовою програмування.

Практична реалізація розробленої програми розрахунків температурного поля підтвердила можливість використання програмного середовища LabVIEW для моделювання та візуалізації графіків температурних полів в металевій штабі.

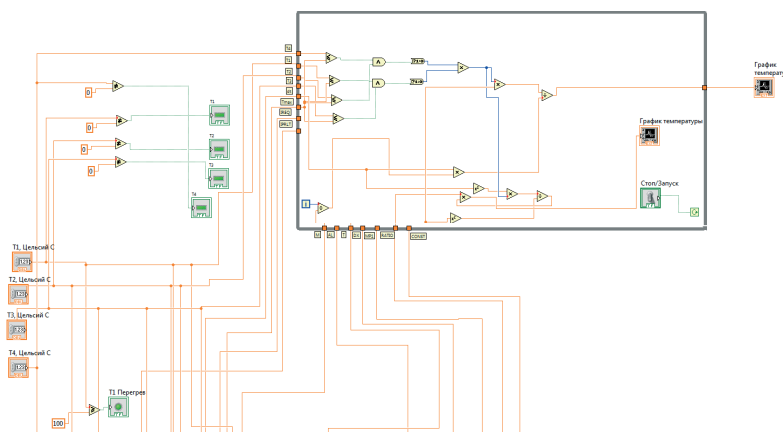


Рис. 5. Блок-схема програми

Список використаних джерел

1. Александров А. А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок : учеб. пособие / А. А. Александров. — М. : МЭИ, 2006. — 159 с.
2. Алексеев В. В. Построение вычислительных каналов с использованием среды графического программирования LabVIEW / В. В. Алексеев, Е. Г. Гридина, Б. Г. Комаров и др. — СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001 — 32 с.
3. Арсеньев Л. В. Стационарные газотурбинные установки / Л. В. Арсеньев, В. Г. Тырышкин, И. А. Богов. — Л. : Машиностроение, 1989. — 543 с.
4. Батоврин В. К. LabVIEW: практикум по электронике и микропроцессорной технике / В. К. Батоврин, А. С. Бессонов, В. В. Мошкин. — М. : ДМК Пресс, 2005 — 181 с.
5. Евдокимов Ю. К. LabVIEW для радиоинженера. От виртуальной модели к реальному прибору: практический справочник для работы в программной среде LabVIEW / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. — М. : ДМК Пресс, 2007. — 203 с.

6. Загидуллин Р. Ш. LabVIEW в исследовании и разработках / Р. Ш. Загидуллин. — М. : Горячая линия — Телеком, 2005. — 352 с.
7. Кехтарнаваз Н. Цифровая обработка сигналов на системном уровне с использованием LabVIEW / Н. Кехтарнаваз, Н. Ким. — 2007. — 288 с.
8. Климентьев Е. К. Основы графического программирования в среде LabVIEW : учебное пособие / Е. К. Климентьев. — Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. — 71 с.
9. Самойликов В. К. Расчет и проектирование нагревательных устройств : учебное пособие / В. К. Самойликов. — М. : МГИЭТ(ТУ), 1995. — 114 с.
10. Сипайлов Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. — М. : Высш. шк., 1989. — 239 с.
11. Трухний А. Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки / А. Д. Трухний, Б. В. Ломакин. — М. : МЭИ, 2002. — 540 с.
12. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. — М. : Мир, 1988. — 544 с.

Valeriy BORISENKO, Konstantin MASHYROV
Mykolaiv

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN THE ENVIRONMENT LABVIEW

In this paper the calculation of the temperature field in a metal band with a software environment LabVIEW, which allows not only to carry out numerical calculations, but also to visualize in the box results of these calculations. The calculations were made by explicit and implicit schemes calculated.

Key words: LabVIEW software environment, the thermal process, the non-stationary process, calculation, visualization.

Валерий БОРИСЕНКО, Константин МАШИРОВ
г. Николаев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДЕ LABVIEW

В этой работе рассматривается расчет поля температур в металлической полосе с применением программной среды LabVIEW, которое позволяет не только проводить числовые расчеты, но и визуализировать в соответствующем окне результаты этих расчетов. Расчеты проводились по явной и неявной расчетными схемами.

Ключевые слова: Программная среда LabVIEW, тепловой процесс, нестационарный процесс, расчет, визуализация.

Стаття надійшла до редколегії 19.02.2016

ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК КІЛЬКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РЕЗЕРВОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Розрахунок надійності роботи систем з резервуванням залишається актуальною проблемою. Найбільш ефективний метод розрахунку надійності таких систем використовує теорію випадкових марківських процесів і зводиться до розв'язку системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова. Превагою цього методу є можливість отримання розв'язку задачі про надійність системи в аналітичному вигляді. Суттєвим недоліком є зростання кількості рівнянь системи диференціальних рівнянь Колмогорова пропорційно до кількості станів системи з резервуванням, що значно ускладнює або й унеможливорює знаходження розв'язку задачі. В даній роботі розроблений простий чисельний метод розрахунку кількісних показників надійності складних комп'ютерних резервованих систем. Ітераційний процес зводиться до перемноження на кожному кроці вектор-рядка ймовірностей станів на матрицю ймовірностей переходу. В якості тестування чисельного способу розраховані кількісні показники надійності резервованого ОЗП, що складається з двох блоків. Чисельний розв'язок збігається до аналітичного, що знайдений за допомогою системи диференціальних рівнянь Колмогорова. Також чисельним способом обчислюються показники надійності локальної комп'ютерної мережі з резервуванням комутаторів і без при умові, що надійність мережі визначається тільки наявністю або відсутністю зв'язків між комутаторами.

Ключові слова: марківський процес, надійність, резервування комутаторів, резервована система, чисельний метод.

Вихід з ладу комп'ютерної системи і окремих її компонентів може призвести до наслідків, що дорого коштують, в роботі будь-якого підприємства. Крім простою в виробничому або технологічному процесі, необхідно враховувати витрати, пов'язані з повторним запуском системи, а також відновленням даних [4].

Використання відмовостійких компонентів в системі управління процесами може мінімізувати дані ризики. Основним методом забезпечення відмовостійкості системи є конструкція, що використовує резервування [4]. При виникненні несправності або виходу з ладу одного з компонентів комп'ютерної системи компоненти, що справно працюють забезпечують продовження роботи системи.

При розрахунку надійності роботи систем з резервуванням застосовуються методи, засновані на використанні паралельно-последовних структур і методи графів станів [4].

Найбільш ефективний метод розрахунку надійності систем з резервуванням використовує теорію випадкових марківських процесів [1; 3; 4]. Задачі розрахунку кількісних показників надійності резервованих систем розв'язуються таким чином [2]. Спочатку будується розрахункова надійнісна схема. В цій схемі окремі елементи системи можуть відновлюватися, а потоки відмов і відновлень елементів враховуються найпростішими. Тому для розрахунку необхідних показників надійності можна використовувати теорію марківських випадкових процесів. На основі схеми будують граф станів системи, які можуть приймати значення «робочий» і «відмовний». За допомогою графа за відомими правилами [2] записується система диференціальних рівнянь Колмогорова, що зв'язує ймовірності знаходження системи в будь-якому з можливих її станів в довільний момент часу. Цю лінійну систему розв'язують методами операційного числення з урахуванням того, що в момент вмикання системи всі її елементи справні. У результаті знаходять ймовірності станів системи в довільний момент часу, час напрацювання та інші кількісні показники надійності.

Превагою розглянутого методу є можливість отримання розв'язку задачі про надійність системи в аналітичному вигляді. Суттєвим недоліком цього методу є зростання кількості рівнянь системи диференціальних рівнянь Колмогорова пропорційно до кількості станів системи з резервуванням, що значно ускладнює або й унеможливорює знаходження розв'язку задачі.

Метою даної роботи є розробка на основі теорії випадкових марківських процесів чисельного методу розрахунку параметрів надійності резервованої системи при довільній скінченній кількості її станів.

Розглянемо деяку систему, яка в кожний момент часу знаходиться в одному із станів. В окремі моменти часу $n\Delta t$, де $\Delta t = \text{const.}$ – крок за часом, $n = 0, 1, 2, \dots$, система переходить із стану i в стан j . Зокрема, після випробування система може залишитися в тому ж стані ("перейти" зі стану i в стан i). Нехай в момент часу $t = n\Delta t$ ймовірності станів системи є $p_j(t)$ ($j = \overline{1, k}$). Для того, щоб знайти ймовірності станів системи $p_j(t + \Delta t)$ ($j = \overline{1, k}$) в момент часу $t + \Delta t$, скористаємося формулою повної ймовірності:

$$p_j(t + \Delta t) = p_1(t)r_{1j}(t) + \dots + p_k(t)r_{kj}(t) = \sum_{i=1}^k p_i(t)r_{ij}(t), \quad (1)$$

де $r_{ij}(t)$ – ймовірність переходу системи зі стану i , який вона брала в момент часу t , в стан j , який вона приймає в момент часу $t + \Delta t$. Запишемо (1) у векторній формі:

$$\mathbf{p}(t + \Delta t) = \mathbf{p}(t)\mathbf{R}(t), \quad (2)$$

де $\mathbf{p}(t) = (p_1(t), p_2(t), \dots, p_k(t))$, $\mathbf{p}(t + \Delta t) = (p_1(t + \Delta t), p_2(t + \Delta t), \dots, p_k(t + \Delta t))$ – вектор-рядки ймовірностей станів системи в моменти часу t і $t + \Delta t$ відповідно, $\mathbf{R}(t) = \left\| r_{ij}(t) \right\|_{i,j=1}^k$ –

матриця ймовірностей переходу, яка має такі властивості, що всі її елементи ненегативні й сума елементів кожного рядка дорівнює 1. Враховуючи, що потоки відмов і відновлень найпростіші, будемо задавати елементи матриці ймовірностей переходу в наступному вигляді

$$r_{ij} = \alpha_{ij}\Delta t \exp(-\alpha_{ij}\Delta t), \quad (3)$$

де $\alpha_{ij} = \text{const}$ – інтенсивності переходу системи зі стану i в стан j . Якщо Δt мале, точніше $\alpha_{ij}\Delta t \ll 1$, то (3) можна записати в вигляді

$$r_{ij} = \alpha_{ij}\Delta t. \quad (4)$$

Якщо заданий початковий вектор-рядок ймовірностей станів системи $\mathbf{p}(0) = (p_1(0), p_2(0), \dots, p_k(0))$ і відома матриця ймовірностей переходу $\mathbf{R}(t)$, то за ітераційною формулою (2) легко знаходяться ймовірності станів системи в будь-який момент часу.

Якщо система являє собою однорідний марківський ланцюг (в цьому випадку матриця ймовірностей переходу не залежить від t , тобто $\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}(0)$ для $t = n\Delta t$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)), то за теоремою про граничні ймовірності [1] ітераційний процес (2) збігається при $n \rightarrow \infty$ до граничного розподілу ймовірностей $\mathbf{p}^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_k^*)$, $p_j^* = \text{const.}$ ($j = \overline{1, k}$), взагалі кажучи, залежного від початкового стану системи $\mathbf{p}(0)$.

Для обчислення часу T_i перебування системи в i -ому стані за умови, що з моменту початку роботи системи минув час $T = N\Delta t$; N – деяке натуральне число, будемо користуватися наступним міркуванням. Час перебування системи в i -ому стані в проміжку часу від $t = n\Delta t$ до $t + \Delta t$, очевидно, дорівнює $p_i(t)\Delta t = p_i(n\Delta t)\Delta t$. Тоді

$$T_i = \sum_{n=1}^N p_i(n\Delta t)\Delta t. \quad (5)$$

Виникає питання про збіжність розв'язку за ітераційною формулою (2). Перепишемо (2) в координатній формі, враховуючи властивість матриці \mathbf{R} , яка полягає в тому, що сума всіх елементів i -го рядка цієї матриці дорівнює одиниці:

$$p_i(t + \Delta t) = \sum_{j=1}^k p_j(t) r_{ji} = \sum_{j=1}^{i-1} p_j(t) r_{ji} + p_i(t) \left(1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k r_{ji}\right) + \sum_{j=i+1}^k p_j(t) r_{ji}. \quad (6)$$

Застосовуючи до (6) операцію транспонування, отримаємо систему алгебраїчних рівнянь

$$p_i(t + \Delta t) = \sum_{j=1}^{i-1} r_{ij} p_j(t) + p_i(t) \left(1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k r_{ji}\right) + \sum_{j=i+1}^k r_{ij} p_j(t), \quad i = \overline{1, k},$$

яку з урахуванням (4) легко привести до вигляду:

$$\frac{p_i(t + \Delta t) - p_i(t)}{\Delta t} = \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} p_j(t) + \sum_{j=i+1}^k \alpha_{ij} p_j(t) - p_i(t) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k \alpha_{ji} \quad (7)$$

Система (7) це різницева схема Ейлера системи диференціальних рівнянь Колмогорова. Нескладно бачити, що системи (6) та (7) еквівалентні при умові (4) та $\Delta t \neq 0$. Таким чином, розрахунок ймовірностей станів за ітераційною формулою (2) еквівалентний розв'язуванню системи диференціальних рівнянь Колмогорова методом Ейлера. Цей метод, як відомо, збігається при $\Delta t \rightarrow 0$.

В якості тестування чисельного методу розглядалась задача про розрахунок кількісних показників надійності ОЗП, що складається з двох однакових блоків, один з котрих використовується в режимі гарячого (навантаженого) резерву і може замінити другий блок на період його ремонту.

Виявилось, що чисельний результат на основі ітераційної формули (2) співпадає з достатньою точністю з аналітичним розв'язком [2] цієї задачі.

В якості приклада застосування представленого чисельного методу розглянемо задачу про обчислення кількісних показників надійності нерезервованої ЛКМ. Необхідно обчислити ймовірність безвідмовної роботи і напрацювання на відмову ЛКМ (рис. 1), що не відновлюється, при умові, що надійність мережі визначається тільки наявністю або відсутністю зв'язків між комутаторами. Зв'язки між комутаторами 1 і 2, 2 і 3, 3 і 4 позначимо 1, 2, 3 відповідно. Інтенсивності відмов зв'язків між комутаторами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ постійні в часі. Потоки відмов зв'язків між комутаторами вважатимемо найпростішими. Прийнемо, що в момент включення мережі всі зв'язки справні.

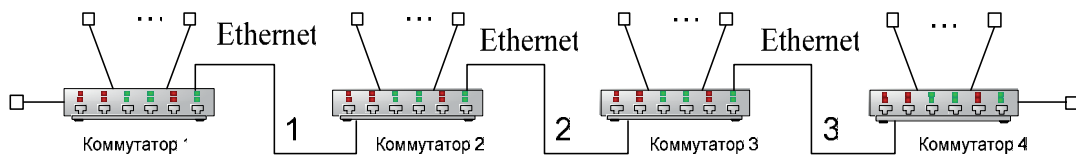


Рис. 1. Нерезервована ЛКМ

Розглянемо можливі стани мережі в період її експлуатації і зведемо їх у таблицю 1.

Таблиця 1

Стани мережі в період її експлуатації			
Стан	Працюючі зв'язки	Зв'язки, що відмовили	Стан мережі в цілому
1	1, 2, 3	—	робочий
2	2, 3	1	відмовний
3	1, 3	2	відмовний
4	1, 2	3	відмовний

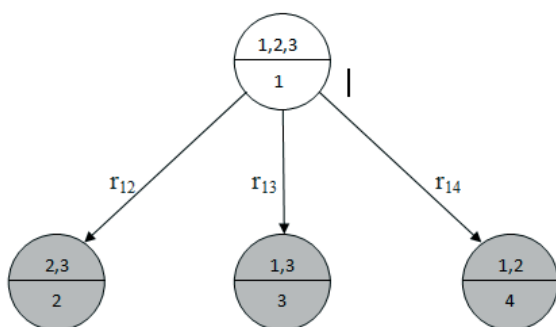


Рис. 2. Граф станів нерезервованої ЛКМ

Враховуючи умови задачі, будується граф станів (рис. 2). У зображенні вершин вказується номер стану системи і працюючі зв'язки між комутаторами в цьому стані. Вершини 2, 3, 4 графу станів, що відповідають відмовному стану, зафарбовані.

Матриця ймовірностей переходу розглянутої системи має вигляд

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1-r_{12}-r_{13}-r_{14} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

де враховано, що потоки відмов і відновлень найпростіші і тому елементи матриці ймовірностей переходу можна записати в вигляді

$$r_{ij} = \alpha_{ij} \Delta t \exp(-\alpha_{ij} \Delta t),$$

$\alpha_{ij} = \text{const}$ – інтенсивності переходу системи зі стану i в стан j . За умовою задачі $\alpha_{12} = \lambda_1$, $\alpha_{13} = \lambda_2$, $\alpha_{14} = \lambda_3$.

Використовуючи математичний пакет Mathcad, знаходимо рішення розглянутої задачі за формулами (2), (5) при значеннях $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$, де величини λ_1 , λ_2 , λ_3 мають розмірність $[1/\text{одиниця часу}]$.

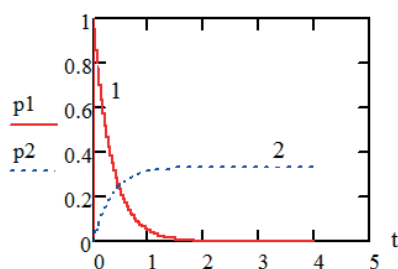


Рис. 3. Залежність ймовірностей $p_i(t)$ перебування системи в станах i від часу t

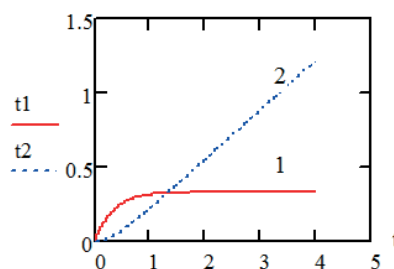


Рис. 4. Залежність часу $T_i(t)$ перебування системи в станах i від часу t

На рис. 3, 4 представлені результати розрахунків ймовірностей $p_i(t)$ і часу перебування системи в станах i ($i = \overline{1,4}$) $T_i(t)$ залежно від часу t . Крок за часом Δt приймався рівним 0.0001 одиниць часу. На малюнку 3 крива 1 представляє залежність $p_1(t)$, крива 2 – залежність $p_2(t) = p_3(t) = p_4(t)$. Оскільки система являє собою однорідний марківський ланцюг, то, як було зазначено вище, чисельне рішення збігається при $n \rightarrow \infty$ (тобто при $t \rightarrow \infty$) до граничного розподілу ймовірностей \mathbf{p}^* . В даному випадку, як видно з рис.3, $\mathbf{p}^* = (0, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$.

На рис. 4 крива 1 представляє залежність $T_1(t)$, крива 2 – залежність $T_2(t) = T_3(t) = T_4(t)$. З рисунка 4 видно, що час T_1 збігається при $t \rightarrow \infty$ до граничного значення T_1^* . При чисельному розрахунку в якості граничного значення приймалося T_1 при $t = 100$ одиниць часу. При цьому

виявилося, що $T_1(100) = 0,333$ одиниць часу, $T_2(100) = T_3(100) = T_4(100) = 32,222$ одиниць часу. Тоді напрацювання на відмову визначається середнім часом знаходження системи в єдиному робочому стані – стані 1, тобто $T_0 = T_1(100) = 0,333$ одиниць часу.

У попередньому прикладі розглядалась нерезервована ЛКМ, яка виходить з ладу, коли порушується зв'язок хоча б між однією парою комутаторів. Для того, що б підвищити надійність ЛКМ, створюють резервний канал між першим та останнім комутаторами. Таким чином утворюється кільце:

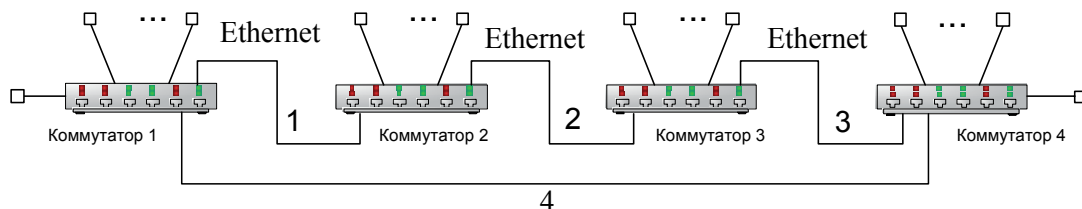


Рис. 5. ЛКМ з кільцевим резервуванням

Розглянемо наступну задачу. Необхідно обчислити ймовірність безвідмовної роботи і напрацювання на відмову резервованої ЛКМ (рис. 5), що відновлюється, при умові, що надійність мережі визначається тільки наявністю або відсутністю зв'язків між комутаторами. Зв'язки між комутаторами 1 і 2, 2 і 3, 3 і 4, 1 і 4 позначимо 1, 2, 3, 4 відповідно. Інтенсивності потоків відмов зв'язків між комутаторами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ і потоків відновлень цих зв'язків $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ постійні в часі. Потоків відмов та відновлень зв'язків між комутаторами вважатимемо найпростішими. Прийнемо, що в момент включення мережі всі зв'язки справні.

Розглянемо можливі стани мережі в період її експлуатації і зведемо їх у таблицю 2.

Таблиця 2

Стани мережі в період її експлуатації

Стан	Працюючі зв'язки	Зв'язки, що відмовили	Стан мережі в цілому
1	1, 2, 3, 4	—	робочий
2	2, 3, 4	1	робочий
3	1, 3, 4	2	робочий
4	1, 2, 4	3	робочий
5	1, 2, 3	4	робочий
6	3, 4	1 або 2	відмовний
7	2, 4	1 або 3	відмовний
8	2, 3	1 або 4	відмовний
9	1, 4	2 або 3	відмовний
10	1, 3	2 або 4	відмовний
11	1, 2	3 або 4	відмовний

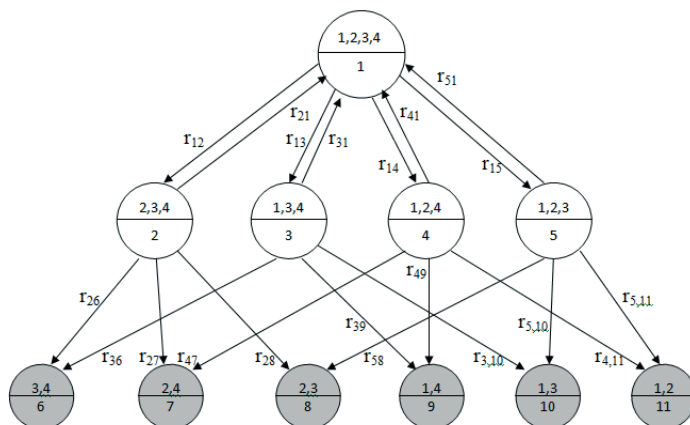


Рис. 6. Граф станів резервованої ЛКМ

Враховуючи умови задачі, будується граф станів (рис. 6). У зображенні вершин графа вказується номер стану системи і працюючі зв'язки між комутаторами в цьому стані. Вершини 6, 7, 8, 9, 10, 11 графу станів, що відповідають відмовному стану, зафарбовані.

Матриця ймовірностей переходу системи, що розглядається, має вигляд

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1-\sum_1 & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_{21} & 1-\sum_2 & 0 & 0 & 0 & r_{26} & r_{27} & r_{28} & 0 & 0 & 0 \\ r_{31} & 0 & 1-\sum_3 & 0 & 0 & r_{36} & 0 & 0 & r_{39} & r_{3,10} & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 & 1-\sum_4 & 0 & 0 & r_{47} & 0 & r_{49} & 0 & r_{4,11} \\ r_{51} & 0 & 0 & 0 & 1-\sum_5 & 0 & 0 & r_{58} & 0 & r_{5,10} & r_{5,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

де $\sum_1 = r_{12} + r_{13} + r_{14} + r_{15}$, $\sum_2 = r_{21} + r_{26} + r_{27} + r_{28}$, $\sum_3 = r_{31} + r_{36} + r_{39} + r_{3,10}$,
 $\sum_4 = r_{41} + r_{47} + r_{49} + r_{4,11}$, $\sum_5 = r_{51} + r_{58} + r_{5,10} + r_{5,11}$.

Оскільки потоки відмов і відновлень найпростіші, то елементи матриці ймовірностей переходу можна записати в вигляді

$$r_{ij} = \alpha_{ij} \Delta t \exp(-\alpha_{ij} \Delta t),$$

$\alpha_{ij} = \text{const}$ – інтенсивності переходу системи зі стану i в стан j . За умовою задачі (рис. 6 або табл. 2) маємо $\alpha_{12} = \alpha_{36} = \alpha_{47} = \alpha_{58} = \lambda_1$, $\alpha_{13} = \alpha_{26} = \alpha_{49} = \alpha_{5,10} = \lambda_2$, $\alpha_{14} = \alpha_{27} = \alpha_{39} = \alpha_{5,11} = \lambda_3$, $\alpha_{15} = \alpha_{28} = \alpha_{3,10} = \alpha_{4,11} = \lambda_4$.

Використовуючи математичний пакет Mathcad, знаходимо рішення розглянутої задачі за формулами (2), (5) при значеннях $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 1$ [1/одиниця часу].

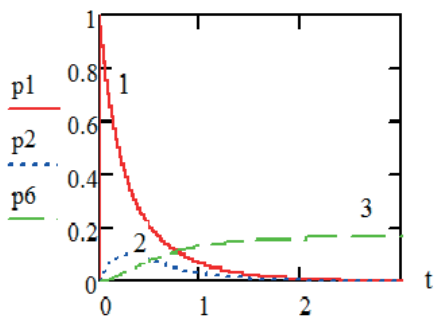


Рис. 7. Залежність ймовірностей $p_i(t)$ перебування системи в станах i від часу t

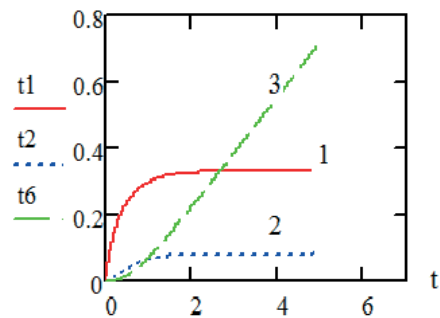


Рис. 8. Залежність часу $T_i(t)$ перебування системи в станах i від часу t

На рис. 7, 8 представлені результати розрахунків ймовірностей $p_i(t)$ і часу перебування системи в станах i ($i = \overline{1,11}$) $T_i(t)$ залежно від часу t . Крок за часом Δt приймався рівним 0.0001 одиниць часу. На малюнку 7 крива 1

представляє залежність $p_1(t)$, крива 2 – залежність $p_2(t) = p_3(t) = p_4(t) = p_5(t)$,

крива 3 – залежність $p_6(t) = p_7(t) = p_8(t) = p_9(t) = p_{10}(t) = p_{11}(t)$. Оскільки система являє собою однорідний марківський ланцюг, то, як було зазначено вище, чисельне рішення збігається при $n \rightarrow \infty$ (тобто при $t \rightarrow \infty$) до граничного розподілу ймовірностей \mathbf{p}^* . В даному випадку, як видно з рис. 7, $\mathbf{p}^* = (0, 0, 0, 0, 0, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$.

На рис. 8 крива 1 представляє залежність $T_1(t)$, крива 2 – залежність $T_2(t) = T_3(t) = T_4(t) = T_5(t)$, крива 3 – залежність $T_6(t) = T_7(t) = T_8(t) = T_9(t) = T_{10}(t) = T_{11}(t)$. З рисунка 8 видно, що час T_1 і час T_2 збігаються при $t \rightarrow \infty$ до граничних значень T_1^* і T_2^* . При чисельному розрахунку в якості граничних значень приймалися T_1 і T_2 при $t = 100$ одиниць часу. При цьому виявилось, що $T_1(100) = 0,333$ одиниць часу; $T_2(100) = T_3(100) = T_4(100) = T_5(100) = 0,083$ одиниць часу. Тоді напрацювання на відмову T_0^R локальної комп'ютерної мережі з кільцевим резервуванням визначається середнім часом знаходження системи в робочих станах – станах 1, 2, 3, 4, 5, тобто $T_0^R = T_1(100) + 4T_2(100) = 0,333 + 4 \cdot 0,083 = 0,667$ одиниць часу.

Цікаво порівняти значення часу напрацювання T_0 нерезервованої ЛКМ з часом напрацювання ЛКМ з кільцевим резервуванням. Для цього проведемо чисельний розрахунок при значеннях параметрів задачі $\lambda = 1$ і $\mu = 0$. Виявилось, що $T_1(100) = 0,25$ одиниць часу; $T_2(100) = T_3(100) = T_4(100) = T_5(100) = 0,083$ одиниць часу. Тобто $T_0^R = T_1(100) + 4T_2(100) = 0,25 + 4 \cdot 0,083 = 0,583$ одиниць часу. Порівняння значень T_0 і T_0^R показує, що створення резервного каналу між першим та останнім комутаторами нерезервованої ЛКМ, збільшує при $\lambda = 1$ час напрацювання ЛКМ, що не відновлюється ($\mu = 0$), в $\frac{T_0^R}{T_0} = \frac{0,583}{0,333} = 1,751$ разів.

Крім цього виникає питання, як буде залежати час напрацювання T_0^R ЛКМ з кільцевим резервуванням, що відновлюється, від інтенсивності потоку відновлень μ . Був проведений розрахунок при значенні інтенсивності потоків відмов зв'язків між комутаторами $\lambda = 1$ і значеннях інтенсивності потоку відновлень $\mu = 0, 5, 10, 15, 20, \dots, 100, 120, 140, 160, \dots, 300$. Виявилось, що ця залежність лінійна (рис. 9).

Таким чином, розроблений простий чисельний метод дозволяє обчислювати параметри надійності резервованої комп'ютерної системи. Він може бути реалізований програмним шляхом і застосовуватись для розв'язання задач розрахунку відмовостійкості систем різноманітної складності з достатньою точністю. Подальші дослідження будуть спрямовані в напрямку застосування чисельного способу для обчислення кількісних показників надійності резервованих систем з урахуванням залежності інтенсивностей відмов (наприклад, після ремонту) і відновлень від часу.

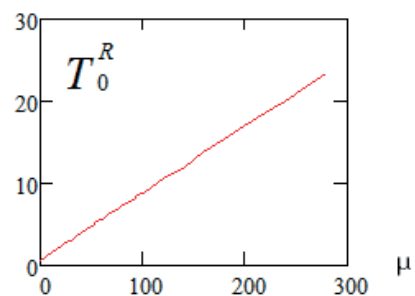


Рис. 9. Залежність часу напрацювання T_0^R ЛКМ з кільцевим резервуванням, що відновлюється, від інтенсивності потоку відновлень μ

Список використаних джерел

1. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей : учебник / Б. В. Гнеденко. — Изд. 8-е, испр. и доп. — М. : Едиториал УРСС, 2005. — 448 с.
2. Микропроцессоры : в 3-х кн. Средства отладки, лабораторный практикум и задачник : учеб. для вузов / Н. В. Воробьев, В. Л. Горбунов, А. В. Горячев [и др.] ; под редакцией Л. Н. Преснухина. — М. : Высш. шк., 1986. — Кн. 3. — 351 с.
3. Романцев В. В. Аналитические модели систем массового обслуживания : учеб. пособие / В. В. Романцев. — СПб. : СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1998. — 67 с.
4. Шишмарев В. Ю. Надежность технических систем: учебник для вузов / В. Ю. Шишмарев. — М. : Академия, 2010. — 304 с.

Eugene BORCHIK, Olexiy STOVBA
Mykolaiv

NUMERICAL CALCULATION OF QUANTITATIVE INDICATORS OF RELIABILITY OF REDUNDANT COMPUTER SYSTEMS

The calculation of the reliability of redundant systems is an urgent problem. The most effective method of calculating the reliability of such systems using the theory of Markov random processes and reduced to solving a system of linear differential Kolmogorov equations. The advantage of this method is the possibility of solving the problem of the reliability of the system in an analytical way. An essential drawback of this method is the increasing number of equations of Kolmogorov system of differential equations in proportion to the number of states of the redundant system, that greatly hinders or even prevents the solution of the problem. This paper developed a simple numerical method to calculate quantitative indicators of reliability of complex computer redundant systems. Iterative process comes to every step multiplying of vector-row probabilities of states to the matrix of transition probabilities. As a way of testing the numerical method reliability of redundant RAM consisting of two blocks is calculated. The numerical solution comes to the analytical one which was found by the Kolmogorov system of differential equations. Also numerical method is used for calculation of reliability characteristics of Local Area Net with redundant switches and without their.

Key words: Markov process, reliability, redundant switch, redundant system, numerical method.

Евгений БОРЧИК, Алексей СТОВБА
г. Николаев

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

Расчет надежности работы систем с резервированием остается актуальной проблемой. Наиболее эффективный метод расчета надежности таких систем использует теорию случайных марковских процессов и сводится к решению системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова. Преимуществом этого метода является возможность получения решения задачи о надежности системы в аналитическом виде. Существенным недостатком является рост количества уравнений системы дифференциальных уравнений Колмогорова пропорционально количеству состояний системы с резервированием, что значительно усложняет или даже делает невозможным нахождение решения задачи. В данной работе разработан простой численный метод расчета количественных показателей надежности сложных компьютерных резервируемых систем. Итерационный процесс сводится к умножению на каждом шагу вектор-строки вероятностей состояний на матрицу вероятностей перехода. В качестве тестирования численного метода рассчитывались количественные показатели надежности резервированного ОЗУ, состоящего из двух блоков. Численное решение сходится к аналитическому, найденному с помощью системы дифференциальных уравнений Колмогорова. Также численным методом вычисляются показатели надежности локальной компьютерной сети с резервированием коммутаторов и без при условии, что надежность сети определяется только наличием или отсутствием связей между коммутаторами.

Ключевые слова: марковский процесс, надежность, резервирование коммутаторов, резервированная система, численный метод.

Стаття надійшла до редколегії 27.02.2016

АНАЛІЗ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ПОЛОГИХ ШАРУВАТИХ ОБОЛОНОК У ПОСТАНОВЦІ МІНДЛІНА МЕТОДОМ СПЛАЙН-КОЛОКАЦІЇ

У статті розглядаються вільні коливання симетричних шаруватих пологих двоопуклих оболонок змінної товщини з прямокутним планом. Рівняння руху оболонки виведені в рамках уточненої теорії першого порядку. Отримана двовимірною системою диференціальних рівнянь відносно переміщень і кутів повороту, зведена до одновимірної методом сплайн-апроксимації з використанням В-сплайнів третього порядку. Застосувавши метод колокації, отримана задача на власні значення з відповідними крайовими умовами. Розв'язувальна система з різними граничними умовами, з якої можна отримати значення власних частот і відповідних їм форм коливань, представлена у векторно-матричній формі.

Ключові слова: вільні коливання, шарувата полога оболонка, метод сплайн-колокації, теорія Міндліна.

Шаруваті оболонки широко використовуються в багатьох галузях сучасної техніки, будівництва, судно-, літако-, ракето- будівництва та ін. У процесі експлуатації такі системи потрапляють під вплив різних динамічних навантажень, які можуть викликати небезпечні коливання як елементів, так і всієї конструкції. Щоб оптимально спроектувати оболонкову конструкцію для роботи під дією певних статичних і динамічних навантажень, треба визначити умови міцності і надійності. Для аналізу міцності і несучої здатності шаруватих оболонок необхідно перш за все знати фактори напружено-деформованого стану, а також швидкість їх зміни у часі. Таким чином, є необхідність розробки оптимальних і достатньо точних підходів до математичного, геометричного і комп'ютерного моделювання динамічних задач теорії шаруватих оболонок з їх послідовним розв'язанням не менш точними й ефективними методами.

Розвиток, аналіз і класифікація багатьох існуючих уточнених теорій багатошарових пластин і оболонок наведені в огляді [1]. Аналіз підходів до моделювання сендвічевих пластин наведений у сучасних оглядових статтях [6, 10]. Огляди, присвячені задачам динаміки шаруватих пластин і оболонок, розглянуті в [5, 7]. Багато важливих питань розробки, аналізу та побудови тришарових пластин і пологих оболонок у тому числі і з композитних матеріалів повністю обговорені в монографії [12]. Я. М. Григоренко з колегами в роботах [2, 3, 4] узагальнив досягнення в теорії пластин і оболонок.

Результати досліджень проблем шаруватих оболонок, а також велика кількість розв'язаних конкретних задач узагальнені в сучасних монографіях: М. С. Кату [8] описав динамічну поведінку шаруватих пластин і пологих оболонок; В. Соєдел [11] вивчив динаміку пластин і оболонок із композитів; Дж. Н. Редді [9] зосереджився на аналізі напружень і загальній механіці композитних пластин і оболонок.

Основна ціль роботи полягає у виведенні розв'язувальної системи рівнянь для задачі про вільні коливання шаруватих пологих оболонок і застосуванні до неї методу сплайн-колокації.

Об'єктом дослідження є не тонкі ($1/10 \leq h/a < 1/5$) симетричні, щодо серединної поверхні, шаруваті пологі оболонки змінної товщини з прямокутним планом і не нульовою Гуссовою кривизною. Вважається, що головні напрямки пружності кожного шару співпадають з координатними лініями. А в якості вихідних для кожного шару оболонки використовуються основні припущення теорії пружності неоднорідного ортотропного тіла:

- у межах кожного шару передбачається справедливою гіпотеза суцільності;
- приймаються умови ідеального контакту шарів, пов'язані з відсутністю їх відриву і взаємного проковзування по поверхні контакту;
- матеріал кожного шару вважається ортотропним, лінійно-пружним і підпорядковується узагальненому закону Гука;

Для пакету шарів у цілому передбачається справедливою теорія типу Міндіна-Тимошенка, згідно з якою приймаються такі гіпотези:

- прямої лінії (кінематична): прямолінійний елемент нормалі до вихідної координатної поверхні при малих деформаціях зберігає свою довжину і прямолінійність, але не залишається перпендикулярним до деформованої координатної поверхні;
- статична: нормальними напруженнями на майданчиках, паралельних координатній поверхні, можна знехтувати в порівнянні з аналогічними напруженнями на майданчиках, перпендикулярних їй.

Також враховуються сили інерції, пов'язані зі зміщенням елемента координатної поверхні й обертанням елемента нормалі. У даній роботі коефіцієнт пружної основи типу Вінклера $K_p = 0$.

Загальні рівняння теорії оболонок можна використовувати безпосередньо при розгляді вільних коливань пологих оболонок. Однак, застосування деяких додаткових припущень призводить до зниження складності розв'язувальної системи рівнянь:

1. Оболонка проектується на площину, яка проходить через вершини її контуру, у вигляді прямокутника зі сторонами a і b . Стріла підйому оболонки над цією поверхнею $f \leq 1/5l$, де l – найменший характерний розмір на серединній поверхні. Отже, замість криволінійної використовується ортогональна система координат, а геометрія близька до геометрії пластини (параметри Ламе $A = B = 1$). Стріла підйому виражається так:

$$f = f_x + f_y, \quad f_x = R_x - \sqrt{R_x^2 - \frac{a^2}{4}}, \quad f_y = R_y - \sqrt{R_y^2 - \frac{b^2}{4}},$$

де R_x , R_y – радіуси кривизни.

Зміни кривизни, викликані компонентами u , v , малі в порівнянні зі змінами, викликаними складовою w . Можна вважати

$$\frac{u_i}{R_i} \ll 1; \quad Q_i \ll R_i \frac{\partial N_i}{\partial i}; \quad 1 + \frac{z}{R_i} \approx 1,$$

де u_i – тангенціальні компоненти переміщення u або v ; Q_i – поперечні сили Q_x або Q_y ; N_i – навантаження N_x , N_y або N_{xy} ; R_i – радіуси кривизни R_x , R_y або R_{xy} . Вираз (∂i) позначає похідну по x або y .

Зазначимо, що в залежності від знаку Гауссової кривизни, пологі оболонки поділяють (рис. 1) на сферичні ($k > 0$), циліндричні ($k = 0$) та гіперболічно параболічні ($k < 0$).

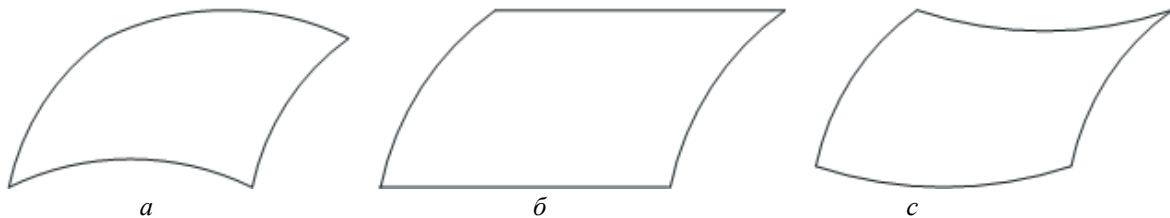


Рис. 1. Сферичні (а), циліндричні (б) та гіперболічно параболічні (с) пологі оболонки

Прийняті гіпотези дозволяють замість тривимірної задачі динаміки оболонки як просторового тіла розглядати двовимірну задачу коливання її координатної поверхні, а припущення щодо геометрії дозволяють записати характеристики в ортогональних координатах. Замість $u_\alpha(\alpha, \beta, \gamma, t)$, $u_\beta(\alpha, \beta, \gamma, t)$, $u_\gamma(\alpha, \beta, \gamma, t)$ розглядаються переміщення $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$, $w(x, y, t)$. Компоненти деформації тривимірного тіла e_α , e_β , e_γ , $e_{\alpha\beta}$, $e_{\alpha\gamma}$, $e_{\beta\gamma}$ замінюються тангенціальними ε_x , ε_y ,

ε_{xy} і згинальними χ_x , χ_y , $2\chi_{xy}$. Напружений стан описується зведеними до координатної поверхні тангенціальними N_x , N_y , N_{xy} , N_{yx} і перерізуючими Q_x , Q_y зусиллями та згинаючими M_x , M_y і скручуючими M_{xy} , M_{yx} моментами які є інтегральними характеристиками напружень σ_α , σ_β , σ_γ , $\tau_{\alpha\beta}$, $\tau_{\alpha\gamma}$, $\tau_{\beta\gamma}$, статично їм еквівалентними.

Слід зазначити, що реальний розподіл деформацій поперечного зсуву і відповідних напружень – параболічний по товщині не тонкої оболонки. Більше того, прийнята кінематична гіпотеза не задовольняє умову зникнення дотичних напружень на верхній і нижній поверхнях об'єкту дослідження. Тому повстає необхідність увести коефіцієнт корекції зсуву. Коефіцієнт визначається з умов узгодження двох прийнятих незалежно друг від друга припущень щодо характеру розподілу переміщень і дотичних напружень по товщині оболонки. Існує багато підходів для його визначення, наприклад, метод Купера, метод Стефена-Хаткінса, енергетичний підхід; але в більшості випадків для шаруватих пластин і пологих оболонок використовують значення $5/6$ – модель Рейсснера або $\pi^2/12$ – модель Міндліна. У даній роботі коефіцієнт корекції зсуву приймається рівним $5/6$.

Наведемо основні співвідношення вільних коливань оболонок вище зазначеного типу.

– Зв'язок кінематичних і деформаційних факторів з відповідними факторами тривимірної теорії пружності

$$\begin{aligned} u_x(x, y, z, t) &= u(x, y, t) + z\psi_x, & u_y(x, y, z, t) &= v(x, y, t) + z\psi_y, \\ u_z(x, y, z, t) &= w(x, y, t); & e_x(x, y, z, t) &\approx \varepsilon_x(x, y, t) + \gamma\chi_x(x, y, t), \\ e_y(x, y, z, t) &\approx \varepsilon_y(x, y, t) + \gamma\chi_y(x, y, t), & e_{xy}(x, y, z, t) &\approx \varepsilon_{xy}(x, y, t) + 2\gamma\chi_{xy}(x, y, t), \\ e_{xz}(x, y, z, t) &\approx \gamma_x(x, y, t), & e_{yz}(x, y, z, t) &\approx \gamma_y(x, y, t). \end{aligned}$$

– Зв'язок між деформаціями координатної поверхні і переміщеннями її точок

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + k_1 w, & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + k_2 w, & \varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \\ \chi_x &= \frac{\partial \psi_x}{\partial x} - k_1^2 w, & \chi_y &= \frac{\partial \psi_y}{\partial y} - k_2^2 w, & 2\chi_{xy} &= \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x}, \\ \gamma_x &= \psi_x - \vartheta_x, & \vartheta_x &= -\frac{\partial w}{\partial x} + k_1 u, & \gamma_y &= \psi_y - \vartheta_y, & \vartheta_y &= -\frac{\partial w}{\partial y} + k_2 v. \end{aligned} \quad (1)$$

У виразах (1) k_1 , k_2 – кривизни; ψ_x , ψ_y – кути повороту нормалі без врахування поперечних зсувів; γ_x , γ_y – кути повороту нормалі, обумовлені поперечними зсувами.

– Рівняння руху

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} &= 0, & \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - k_1 N_x - k_2 N_y &= I_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, & \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} - Q_x &= I_2 \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y &= I_2 \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial t^2}, & N_{xy} - k_2 M_{yx} - N_{yx} + k_1 M_{xy} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де

$$I_0 = \sum_i^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} \rho^i dz; \quad I_2 = \sum_i^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} \rho^i z^2 dz;$$

I_2 – момент інерції обертання нормального елемента відносно осей x , y з урахуванням шаруватої структури оболонки і змінної товщини шарів, що її складають; M – кількість шарів; $\rho^i = \rho^i(x, y, z)$ – густина; $z = z_{i-1}(x, y)$, $z = z_i(x, y)$ – рівняння обмежуючих поверхонь.

– Співвідношення пружності

$$\begin{aligned} N_x &= C_{11}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y, & N_y &= C_{12}\varepsilon_x + C_{22}\varepsilon_y, \\ N_{xy} &= C_{66}\varepsilon_{xy} + 2k_2D_{66}\chi_{xy}, & N_{yx} &= C_{66}\varepsilon_{xy} + 2k_1D_{66}\chi_{xy}, \\ M_x &= D_{11}\chi_x + D_{12}\chi_y, & M_y &= D_{12}\chi_x + D_{22}\chi_y, \\ M_{xy} &= M_{yx} = 2D_{66}\chi_{xy}, & Q_x &= K_1\gamma_x, \quad Q_y = K_2\gamma_y, \end{aligned} \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} C_{11} &= \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{E_x^i}{1 - \nu_x^i \nu_y^i} dz, & C_{12} &= \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{\nu_y^i E_x^i}{1 - \nu_x^i \nu_y^i} dz, \\ C_{22} &= \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{E_y^i}{1 - \nu_x^i \nu_y^i} dz, & C_{66} &= \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} G_{xy}^i dz, \\ D_{11} &= \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{E_x^i}{1 - \nu_x^i \nu_y^i} z^2 dz, & D_{12} &= \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{\nu_y^i E_x^i}{1 - \nu_x^i \nu_y^i} z^2 dz, \\ D_{22} &= \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{E_y^i}{1 - \nu_x^i \nu_y^i} z^2 dz, & D_{66} &= \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} G_{xy}^i z^2 dz, \\ K_1 &= \frac{5}{6} \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} G_{xz}^i dz, & K_2 &= \frac{5}{6} \sum_{i=1}^M \int_{z_{i-1}}^{z_i} G_{yz}^i dz. \end{aligned} \quad (4)$$

У формулах (4) E_x^i , E_y^i , ν_x^i , ν_y^i – модулі пружності і коефіцієнти Пуассона в напрямках x і y ; G_{yz}^i , G_{xz}^i , G_{xy}^i – модулі зсуву шарів оболонки в площинах, паралельних координатним поверхням $x = \text{const}$; $y = \text{const}$, $z = \text{const}$ відповідно.

Розглядатимемо на сторонах $x = 0$, $x = a$ такі граничні умови:

1) контур жорстко закріплений:

$$u = v = w = 0, \quad \psi_x = \psi_y = 0; \quad (5)$$

2) контур шарнірно опертий:

$$N_x = 0, \quad v = w = 0, \quad M_x = 0, \quad \psi_y = 0; \quad (6)$$

3) контур вільний:

$$N_x = 0, \quad N_{xy} = 0, \quad Q_x = 0, \quad M_x = 0, \quad M_{xy} = 0. \quad (7)$$

Аналогічні умови можна отримати на сторонах $y = 0$, $y = b$ зробивши заміни $x \rightarrow y$, $u \rightarrow v$, $\psi_x \rightarrow \psi_y$.

Замість початкових умов припускається, що всі точки пружного тіла здійснюють коливання з однаковою частотою, так що досліджуваний процес характеризується сукупністю гармонійних складових вигляду

$$\bar{N}(x, y, t) = \bar{F}(x, y) e^{i\omega t},$$

$$\bar{N}(X, Y, t) = \begin{pmatrix} u(x, y, t) \\ v(x, y, t) \\ w(x, y, t) \\ \Psi_x(x, y, t) \\ \Psi_y(x, y, t) \end{pmatrix}; \quad \bar{F}(x, y) = \begin{pmatrix} U(x, y) \\ V(x, y) \\ W(x, y) \\ \Psi_x(x, y) \\ \Psi_y(x, y) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де ω – частота вільних коливань; компоненти вектора $\bar{F}(x, y)$ характеризують відповідну до частоти форму вільних коливань.

Для уповільнення накоплення похибки при розв'язанні задачі чисельними методами на ПК необхідно обезрозмірити рівняння системи зробивши заміну:

$$x = aX, \quad y = bY, \quad (9)$$

де a і b – лінійні розміри оболонки.

Підставивши вирази (3) у рівняння рівноваги (2) з урахуванням (1), (8) і (9), отримаємо систему рівнянь відносно функцій u , v , w , Ψ_x , Ψ_y .

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} &= a_{11} \frac{\partial U}{\partial X} + a_{12} \frac{\partial U}{\partial Y} + a_{13} \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + a_{14} \frac{\partial V}{\partial X} + a_{15} \frac{\partial V}{\partial Y} + a_{16} \frac{\partial^2 V}{\partial X \partial Y} + \\ &+ a_{17} W + a_{18} \frac{\partial W}{\partial X} + a_{1,9} \frac{\partial \Psi_x}{\partial Y} + a_{1,10} \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial Y^2} + a_{1,11} \frac{\partial \Psi_y}{\partial X} + a_{1,12} \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial X \partial Y}, \\ \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} &= a_{21} \frac{\partial U}{\partial X} + a_{22} \frac{\partial U}{\partial Y} + a_{23} \frac{\partial^2 U}{\partial X \partial Y} + a_{24} V + a_{25} \frac{\partial V}{\partial X} + a_{26} \frac{\partial V}{\partial Y} + a_{27} \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \\ &+ a_{28} W + a_{29} \frac{\partial W}{\partial Y} + a_{2,10} \frac{\partial \Psi_x}{\partial X} + a_{2,11} \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial X \partial Y} + a_{2,12} \Psi_y + a_{2,13} \frac{\partial \Psi_y}{\partial Y} + a_{2,14} \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial Y^2}, \\ \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} &= a_{31} U + a_{32} \frac{\partial U}{\partial X} + a_{33} V + a_{34} \frac{\partial V}{\partial Y} + a_{35} W + a_{36} \frac{\partial W}{\partial X} + a_{37} \frac{\partial W}{\partial Y} + \\ &+ a_{38} \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + a_{39} \Psi_x + a_{3,10} \frac{\partial \Psi_x}{\partial X} + a_{3,11} \Psi_y + a_{3,12} \frac{\partial \Psi_y}{\partial Y}, \\ \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial X^2} &= a_{41} U + a_{42} W + a_{43} \frac{\partial W}{\partial X} + a_{44} \Psi_x + a_{45} \frac{\partial \Psi_x}{\partial X} + a_{46} \frac{\partial \Psi_x}{\partial Y} + \\ &+ a_{47} \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial Y^2} + a_{48} \frac{\partial \Psi_y}{\partial X} + a_{49} \frac{\partial \Psi_y}{\partial Y} + a_{4,10} \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial X \partial Y}, \\ \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial X^2} &= a_{51} V + a_{52} W + a_{53} \frac{\partial W}{\partial Y} + a_{54} \frac{\partial \Psi_x}{\partial X} + a_{55} \frac{\partial \Psi_x}{\partial Y} + a_{56} \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial X \partial Y} + \\ &+ a_{57} \Psi_y + a_{58} \frac{\partial \Psi_y}{\partial X} + a_{59} \frac{\partial \Psi_y}{\partial Y} + a_{5,10} \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial Y^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Коефіцієнти $a_{ij} = a_{ij}(X, Y)$ системи (10) мають такі значення:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= -\frac{1}{C_{11}} \frac{\partial C_{11}}{\partial X}, \quad a_{12} = -\frac{a^2}{b^2 C_{11}} \frac{\partial C_{66}}{\partial Y}, \quad a_{13} = -\frac{a^2 C_{66}}{b^2 C_{11}}, \quad a_{14} = -\frac{a}{b C_{11}} \frac{\partial C_{66}}{\partial Y}, \\
a_{15} &= -\frac{a}{b C_{11}} \frac{\partial C_{12}}{\partial X}, \quad a_{16} = -\frac{a}{b C_{11}} (C_{12} + C_{66}), \quad a_{17} = -\frac{a}{C_{11}} \left(k_1 \frac{\partial C_{11}}{\partial X} + k_2 \frac{\partial C_{12}}{\partial X} \right), \\
a_{18} &= -\frac{a}{C_{11}} (k_1 C_{11} + k_2 C_{12}), \quad a_{1,9} = -\frac{a^2 k_1}{b^2 C_{11}} \frac{\partial D_{66}}{\partial Y}, \quad a_{1,10} = -\frac{a^2 k_1 D_{66}}{b^2 C_{11}}, \quad a_{1,11} = -\frac{a k_1}{b C_{11}} \frac{\partial D_{66}}{\partial Y}, \\
a_{1,12} &= -\frac{a k_1 D_{66}}{b C_{11}}, \quad a_{21} = -\frac{a}{b C_{66}} \frac{\partial C_{12}}{\partial Y}, \quad a_{22} = -\frac{a}{b C_{66}} \frac{\partial C_{66}}{\partial X}, \quad a_{23} = -\frac{a}{b C_{66}} (C_{12} + C_{66}), \\
a_{24} &= \frac{a^2 k_2^2 K_2}{C_{66}}, \quad a_{25} = -\frac{1}{C_{66}} \frac{\partial C_{66}}{\partial X}, \quad a_{26} = -\frac{a^2}{b^2 C_{66}} \frac{\partial C_{22}}{\partial Y}, \quad a_{27} = -\frac{a^2 C_{22}}{b^2 C_{66}}, \\
a_{28} &= -\frac{a^2}{b C_{66}} \left(k_1^2 k_2 \frac{\partial D_{12}}{\partial Y} + k_2^3 \frac{\partial D_{22}}{\partial Y} + k_1 \frac{\partial C_{12}}{\partial Y} + k_2 \frac{\partial C_{22}}{\partial Y} \right), \\
a_{29} &= -\frac{a^2}{b C_{66}} \left(k_1^2 k_2 D_{12} + k_2^3 D_{22} + k_2 K_2 + k_1 C_{12} + k_2 C_{22} \right), \quad a_{2,10} = \frac{a k_2}{b C_{66}} \frac{\partial D_{12}}{\partial Y}, \\
a_{2,11} &= \frac{a k_2 D_{12}}{b C_{66}}, \quad a_{2,12} = -\frac{a^2 k_2 K_2}{C_{66}} + \frac{a^2 \omega^2 k_2 I_2}{C_{66}}, \quad a_{2,13} = \frac{a^2 k_2}{b^2 C_{66}} \frac{\partial D_{22}}{\partial Y}, \quad a_{2,14} = \frac{a^2 k_2 D_{22}}{b^2 C_{66}}, \\
a_{31} &= \frac{a k_1}{K_1} \frac{\partial K_1}{\partial X}, \quad a_{32} = \frac{a}{K_1} (k_1 K_1 + k_1 C_{11} + k_2 C_{12}), \quad a_{33} = \frac{a^2 k_2}{b K_1} \frac{\partial K_2}{\partial Y}, \\
a_{34} &= \frac{a^2}{b K_1} (k_2 K_2 + k_1 C_{12} + k_2 C_{22}), \quad a_{35} = \frac{a^2}{K_1} (k_1^2 C_{11} + 2 k_1 k_2 C_{12} + k_2^2 C_{22}) - \frac{a^2 \omega^2 I_0}{K_1}, \\
a_{36} &= -\frac{1}{K_1} \frac{\partial K_1}{\partial X}, \quad a_{37} = -\frac{a^2}{b^2 K_1} \frac{\partial K_2}{\partial Y}, \quad a_{38} = -\frac{a^2 K_2}{b^2 K_1}, \quad a_{39} = -\frac{a}{K_1} \frac{\partial K_1}{\partial X}, \quad a_{3,10} = -a, \\
a_{3,11} &= -\frac{a^2}{b K_1} \frac{\partial K_2}{\partial Y}, \quad a_{3,12} = -\frac{a^2 K_2}{b K_1}, \quad a_{41} = -\frac{a^2 k_1 K_1}{D_{11}}, \quad a_{42} = \frac{a}{D_{11}} \left(k_1^2 \frac{\partial D_{11}}{\partial X} + k_2^2 \frac{\partial D_{12}}{\partial X} \right), \\
a_{43} &= \frac{a}{D_{11}} (k_1^2 D_{11} + k_2^2 D_{12} + K_1), \quad a_{44} = \frac{a^2 K_1}{D_{11}} - \frac{a^2 \omega^2 I_2}{D_{11}}, \quad a_{45} = -\frac{1}{D_{11}} \frac{\partial D_{11}}{\partial X}, \\
a_{46} &= -\frac{a^2}{b^2 D_{11}} \frac{\partial D_{66}}{\partial Y}, \quad a_{47} = -\frac{a^2 D_{66}}{b^2 D_{11}}, \quad a_{48} = -\frac{a}{b D_{11}} \frac{\partial D_{66}}{\partial Y}, \quad a_{49} = -\frac{a}{b D_{11}} \frac{\partial D_{12}}{\partial X}, \\
a_{4,10} &= -\frac{a}{b D_{11}} (D_{12} + D_{66}), \quad a_{51} = -\frac{a^2 k_2 K_2}{D_{66}}, \\
a_{52} &= \frac{a^2}{b D_{66}} \left(k_1^2 \frac{\partial D_{12}}{\partial Y} + k_2^2 \frac{\partial D_{22}}{\partial Y} \right), \quad a_{53} = \frac{a^2}{b D_{66}} (k_1^2 D_{12} + k_2^2 D_{22} + K_2), \\
a_{54} &= -\frac{a}{b D_{66}} \frac{\partial D_{12}}{\partial Y}, \quad a_{55} = -\frac{a}{b D_{66}} \frac{\partial D_{66}}{\partial X}, \quad a_{56} = -\frac{a}{b D_{66}} (D_{12} + D_{66}), \\
a_{57} &= \frac{a^2 K_2}{D_{66}} - \frac{a^2 \omega^2 I_2}{D_{66}}, \quad a_{58} = -\frac{1}{D_{66}} \frac{\partial D_{66}}{\partial X}, \quad a_{59} = -\frac{a^2}{b^2 D_{66}} \frac{\partial D_{22}}{\partial Y}, \quad a_{5,10} = -\frac{a^2 D_{22}}{b^2 D_{66}}.
\end{aligned} \tag{11}$$

Граничні умови (5)–(7) з урахуванням заміни (8), (9) на сторонах $X = 0$, $X = 1$ мають такий вигляд:

1) контур жорстко закріплений:

$$U = V = W = 0, \quad \Psi_X = \Psi_Y = 0; \quad (12)$$

2) контур шарнірно опертий:

$$N_X = 0, \quad V = W = 0, \quad M_X = 0, \quad \Psi_Y = 0 \quad (13)$$

або

$$\frac{\partial U}{\partial X} = 0, \quad V = W = 0, \quad \frac{\partial \Psi_X}{\partial X} = 0, \quad \Psi_Y = 0;$$

3) контур вільний:

$$\begin{aligned} N_X &= 0, \quad N_{XY} = 0, \\ Q_X &= 0, \quad M_X = 0, \quad M_{XY} = 0; \end{aligned} \quad (14)$$

або

$$\begin{aligned} C_{11} \left(\frac{\partial U}{a \partial X} + k_1 W \right) + C_{12} \left(\frac{\partial V}{b \partial Y} + k_2 W \right) &= 0, \\ C_{66} \left(\frac{\partial U}{b \partial Y} + \frac{\partial V}{a \partial X} \right) + k_2 D_{66} \left(\frac{\partial \Psi_X}{b \partial Y} + \frac{\partial \Psi_Y}{a \partial X} \right) &= 0, \\ \Psi_X + \frac{\partial W}{a \partial X} - k_1 U &= 0, \\ D_{11} \left(\frac{\partial \Psi_X}{a \partial X} - k_1^2 W \right) + D_{12} \left(\frac{\partial \Psi_Y}{b \partial Y} - k_2^2 W \right) &= 0, \\ \frac{\partial \Psi_X}{b \partial Y} + \frac{\partial \Psi_Y}{a \partial X} &= 0. \end{aligned}$$

Аналогічні умови можна отримати на сторонах $Y = 0$, $Y = 1$ зробивши заміни $X \rightarrow Y$, $U \rightarrow V$, $\Psi_X \rightarrow \Psi_Y$.

Отже, система (10) з коефіцієнтами (11) і крайовими умовами (12)–(14) описує вільні коливання симетричних щодо серединної поверхні шаруватих пологих оболонок змінної товщини з прямокутним планом і не нульовою Гуссовою кривизною, виготовлених з ортотропного матеріалу в рамках теорії Міндліна-Тимошенка. Отримані вирази можна звести до системи лінійних звичайних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами шляхом сплай-апроксимації вздовж одного з координатних напрямків. Зазначимо, що в (10) не входять похідні від шуканих функцій по координаті Y вище другого порядку, тому можна обмежитися застосуванням В-сплайнів третього порядку.

Представимо шукані функції наступним чином:

$$\begin{aligned} U(X, Y) &= \sum_{i=0}^N u_i(X) \phi_{1i}(Y), \quad V(X, Y) = \sum_{i=0}^N v_i(X) \phi_{2i}(Y), \\ W(X, Y) &= \sum_{i=0}^N w_i(X) \phi_{3i}(Y), \quad \Psi_X(X, Y) = \sum_{i=0}^N \psi_{Xi}(X) \phi_{4i}(Y), \\ \Psi_Y(X, Y) &= \sum_{i=0}^N \psi_{Yi}(X) \phi_{5i}(Y), \end{aligned}$$

де $u_i(X)$, $v_i(X)$, $w_i(X)$, $\psi_{Xi}(X)$, $\psi_{Yi}(X)$ – шукані функції змінної X ; $\phi_{ji}(Y)$ ($j = \overline{1,5}$) – лінійні комбінації В-сплайнів третього степеня на рівномірній сітці Δ : $0 = Y_0 < Y_1 < \dots < Y_N = 1$, які задовольняють граничні умови на контурах $Y = 0$ і $Y = 1$. Функції $\phi_{ji}(Y)$ мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} \phi_{j0}(Y) = \alpha_{11}^j B_3^{-1}(Y) + \alpha_{12}^j B_3^0(Y) + \alpha_{13}^j B_3^1(Y); \\ \phi_{j1}(Y) = \alpha_{21}^j B_3^{-1}(Y) + \alpha_{22}^j B_3^0(Y) + \alpha_{23}^j B_3^1(Y); \\ \phi_{ji}(Y) = B_3^i(Y), \quad i = \overline{2, N-2}; \\ \phi_{jN-1}(Y) = \beta_{21}^j B_3^{N-1}(Y) + \beta_{22}^j B_3^N(Y) + \beta_{23}^j B_3^{N+1}(Y); \\ \phi_{jN}(Y) = \beta_{11}^j B_3^{N-1}(Y) + \beta_{12}^j B_3^N(Y) + \beta_{13}^j B_3^{N+1}(Y); \end{cases} \quad j = \overline{1,5}.$$

Параметри α_{pq}^j , β_{pq}^j ($p = 1, 2$; $q = 1, 2, 3$) визначаються в залежності від типу граничних умов на контурах $Y = 0$, $Y = 1$.

Вимагатимемо задоволення рівнянь у заданих оптимальних точках колокації ξ_k , $k = \overline{0, N}$. Під оптимальними мають на увазі такі вузли колокації на сітці Δ : $0 = Y_0 < Y_1 < \dots < Y_N = 1$, ($Y_k = kh$, $h = 1/N$, $k = \overline{0, N}$), які задовольняють умови

$$\begin{aligned} \xi_{2i} &\in [x_{2i}, x_{2i+1}]; \quad \xi_{2i+1} \in [x_{2i}, x_{2i+1}]; \\ \xi_{2i} &= x_{2i} + t_1 h; \quad \xi_{2i+1} = x_{2i} + t_2 h \quad (i = \overline{0, s}), \end{aligned}$$

причому $N = 2s + 1$ ($s \geq 3$), а точки t_1 і t_2 є коренями полінома Лежандра другого степеня $P_2(t) = 6t^2 - 6t + 1$:

$$t_1 = \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{6}; \quad t_2 = 1 - t_1 = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{6}.$$

Таким чином, на кожному проміжку $[x_{2i}, x_{2i+1}]$ є два вузли колокації, а на сусідніх інтервалах $[x_{2i-1}, x_{2i}]$ та $[x_{2i+1}, x_{2i+2}]$ вони відсутні.

Виконавши всі перетворення, зведемо отриману систему до векторно-матричного вигляду. Для цього позначимо

$$\Phi_{j\alpha}(\xi) = [\phi_{ji}^{(\alpha)}(\xi_k)] = \begin{pmatrix} \phi_{j0}^{(\alpha)}(\xi_0) & \phi_{j1}^{(\alpha)}(\xi_0) & \dots & \phi_{jN}^{(\alpha)}(\xi_0) \\ \phi_{j0}^{(\alpha)}(\xi_1) & \phi_{j1}^{(\alpha)}(\xi_1) & \dots & \phi_{jN}^{(\alpha)}(\xi_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{j0}^{(\alpha)}(\xi_N) & \phi_{j1}^{(\alpha)}(\xi_N) & \dots & \phi_{jN}^{(\alpha)}(\xi_N) \end{pmatrix};$$

$$\bar{u}(X) = \begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_N \end{pmatrix}, \quad \bar{v}(X) = \begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix}, \quad \bar{w}(X) = \begin{pmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{pmatrix}, \quad \bar{\psi}_X(X) = \begin{pmatrix} \psi_{X0} \\ \psi_{X1} \\ \vdots \\ \psi_{XN} \end{pmatrix}, \quad \bar{\psi}_Y(X) = \begin{pmatrix} \psi_{Y0} \\ \psi_{Y1} \\ \vdots \\ \psi_{YN} \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}
u'_i(X) &= \tilde{u}_i(X), \quad v'_i(X) = \tilde{v}_i(X), \\
w'_i(X) &= \tilde{w}_i(X), \\
\psi'_{Xi}(X) &= \tilde{\psi}_{Xi}(X), \quad \psi'_{Yi}(X) = \tilde{\psi}_{Yi}(X);
\end{aligned}$$

$$\bar{u}(X) = \begin{pmatrix} \tilde{u}_0 \\ \tilde{u}_1 \\ \vdots \\ \tilde{u}_N \end{pmatrix}; \quad \bar{v}(X) = \begin{pmatrix} \tilde{v}_0 \\ \tilde{v}_1 \\ \vdots \\ \tilde{v}_N \end{pmatrix}; \quad \bar{w}(X) = \begin{pmatrix} \tilde{w}_0 \\ \tilde{w}_1 \\ \vdots \\ \tilde{w}_N \end{pmatrix};$$

$$\bar{\Psi}_X(X) = \begin{pmatrix} \tilde{\Psi}_{X0} \\ \tilde{\Psi}_{X1} \\ \vdots \\ \tilde{\Psi}_{XN} \end{pmatrix}; \quad \bar{\Psi}_Y(X) = \begin{pmatrix} \tilde{\Psi}_{Y0} \\ \tilde{\Psi}_{Y1} \\ \vdots \\ \tilde{\Psi}_{YN} \end{pmatrix}.$$

Отже, маємо

$$\frac{d\bar{R}}{dX} = A\bar{R}, \quad (15)$$

де $\bar{R} = \bar{R}(X) = [\bar{u} \ \bar{u} \ \bar{v} \ \bar{v} \ \bar{w} \ \bar{w} \ \bar{\Psi}_X \ \bar{\Psi}_X \ \bar{\Psi}_Y \ \bar{\Psi}_Y]^T$ – вектор-стовпець розмірності $10(N+1)$;
 $A = A(X, \xi, \lambda)$ – квадратна матриця розмірності $10(N+1)$, $\xi = \xi_k$ ($k = \overline{0, N}$) – вузли колокації,
 $\lambda = \omega^2$ – параметр системи.

Граничні умови в загальному вигляді:

$$\begin{aligned}
B_1 \bar{R}(0) &= \bar{0}, \\
B_2 \bar{R}(1) &= \bar{0},
\end{aligned} \quad (16)$$

де B_1, B_2 – матриці розмірності $10(N+1) \times 5(N+1)$.

1) контур жорстко закріплений:

$$B_l = \begin{pmatrix} \Phi_{10} & O & O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & \Phi_{20} & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \Phi_{30} & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & \Phi_{40} & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O & \Phi_{50} & O \end{pmatrix}, \quad l = 1, 2;$$

2) контур шарнірно опертий:

$$B_l = \begin{pmatrix} O & \Phi_{10} & O & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & \Phi_{20} & O & O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & \Phi_{30} & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & \Phi_{40} & O & O \\ O & O & O & O & O & O & O & O & \Phi_{50} & O \end{pmatrix}, \quad l = 1, 2;$$

3) контур вільний:

$$B_l = \begin{pmatrix} O & C_{11} \frac{1}{a} \Phi_{10} & C_{12} \frac{1}{b} \Phi_{21} & O & (C_{11}k_1 + C_{12}k_2)\Phi_{30} & O \\ C_{66} \frac{1}{b} \Phi_{11} & O & O & C_{66} \frac{1}{a} \Phi_{20} & O & O \\ -k_1 \Phi_{10} & O & O & O & O & \frac{1}{a} \Phi_{30} \\ O & O & O & O & -(D_{11}k_1^2 + D_{12}k_2^2)\Phi_{30} & O \\ O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O \\ O & O & O & O & O & O \\ k_2 D_{66} \frac{1}{b} \Phi_{41} & O & O & O & \frac{1}{a} \Phi_{50} & O \\ \Phi_{40} & O & O & O & O & O \\ O & D_{11} \frac{1}{a} \Phi_{40} & D_{12} \frac{1}{b} \Phi_{51} & O & O & O \\ \frac{1}{b} \Phi_{41} & O & O & O & \frac{1}{a} \Phi_{50} & O \end{pmatrix}, \quad l = 1, 2;$$

Отже, отримана система (15) з крайовими умовами (16) описує вільні коливання симетричних шаруватих двоопуклих пологих оболонок змінної товщини з прямокутним планом виготовлених з ортотропного матеріалу в рамках теорії Міндліна-Тимошенка і може бути ефективно розв'язана стійким чисельним методом дискретної ортогоналізації. Аналізуючи результати, можна прийти до висновку, що метод сплайн-колокації виділяється серед інших проєкційних методів винятковою простотою чисельної реалізації. Він полягає в знаходженні сплайна, який задовольняє крайові умови, а також диференціальних рівнянь у достатній кількості точок. Наближений розв'язок шукається в просторі кубічних сплайнів, що підвищує точність. Значимість наведених математичних викладок має виключно теоретичний характер, а виведені вирази дозволяють провести розрахунки конкретних задач.

Список використаних джерел

1. Григолюк Э. И. Пути развития теории упругих многослойных пластин и оболочек / Э. И. Григолюк, Г. М. Куликов // Вестник Тамбовского ГТУ. — 2005. — 11, № 2А. — С. 439—448.
2. Григоренко Я. М. Свободные колебания элементов оболочечных конструкций / Я. М. Григоренко, Е. И. Беспалова, А. Б. Китайгородский, А. И. Шинкарь. — К. : Наук. думка, 1986. — 172 с.
3. Григоренко Я. М. Розв'язання задач теорії оболонок на основі дискретно-континуальних методів : навчальний посібник / Я. М. Григоренко, В. Д. Буда, О. Я. Григоренко. — Миколаїв : Іліон, 2010. — 294 с.
4. Григоренко Я. М. Методы расчета оболочек. Т. 4. Теория оболочек переменной жесткости / Я. М. Григоренко, А. Т. Василенко. — К. : Наук. думка, 1981. — 544 с.
5. Григоренко Я. М. Задачи статики и динамики анизотропных неоднородных оболочек с переменными параметрами и их численное решение (обзор) / Я. М. Григоренко, А. Я. Григоренко // Прикл. Механіка. — 2013. — 49, № 2. — С. 3—70.
6. Carrera E. A Survey With Numerical Assessment of Classical and Refined Theories for the Analysis of Sandwich Plates / E. Carrera, S. Brischetto // Applied Mechanics Reviews. — 2009. — 62, № 1. — P. 1—17.
7. Qatu M. S. Recent research advances on the dynamic analysis of composite shells: 2000–2009 / M. S. Qatu, R. W. Sullivan, W. Wang // Elsevier Academic Press, Netherlands. — 2010. — 93, № 1. — P. 14—31.
8. Qatu M. S. Vibration of laminated shells and plates. — San Diego, CA: Elsevier, 2004. — 385 p.
9. Reddy J. N. Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and Analysis. — CRC Press, 2nd Ed., 2004. — 854 p.
10. Sayyad A. S. On the free vibration analysis of laminated composite and sandwich plates: A review of recent literature with some numerical results / A. S. Sayyad, Yu. M. Ghugal // Composite Structures. — 2015. — 129. — P. 177—201.
11. Soedel W. Vibrations of Shells and Plates. — New York: Marcel Dekker, 3rd edition, 2004. — 592 p.
12. Vinson J. R. The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials. — Technomic, Lancaster, PA, 1999. — 545 p.

FREE VIBRATION ANALYSIS OF LAMINATED SHALLOW SHELLS USING MINDLIN THEORY BY SPLINE COLLOCATION METHOD

The present study deals with the free vibration of symmetrically laminated doubly curved shallow shells with variable thickness and rectangular platform. The equations of motion of the shell are derived using first order shear deformation theory. Spline function approximation technique, which includes B-splines of the third order, is used to reduce two-dimensional system of coupled differential equations in terms of displacement and rotational functions to one-dimensional. A generalized eigenvalue problem is obtained by applying a point collocation method with suitable boundary conditions. The vector-matrix form of the governing equations with different boundary conditions, from which values of a frequency parameter and the corresponding mode shapes of vibration are obtained, is presented.

Key words: free vibrations, laminated shallow shell, spline collocation method, Mindlin theory.

Валерий БУДАК, Олег ПАВЛЕНКО
г. Николаев

АНАЛИЗ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СЛОИСТЫХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК В ПОСТАНОВКЕ МИНДЛИНА МЕТОДОМ СПЛАЙН-КОЛЛОКАЦИИ

В статье рассматриваются свободные колебания симметричных слоистых пологих оболочек двоякой кривизны переменной толщины с прямоугольным планом. Уравнения движения оболочки выведены в рамках уточненной теории первого порядка. Полученная двумерная система дифференциальных уравнений относительно перемещений и углов поворота, сведена к одномерной методом сплайн-аппроксимации с использованием В-сплайнов третьего порядка. Применяя метод коллокации, получена задача на собственные значения с соответствующими краевыми условиями. Разрешающая система с разными граничными условиями, из которой можно получить значения собственных частот и соответствующих им форм колебаний, представлена в векторно-матричной форме.

Ключевые слова: свободные колебания, слоистые пологие оболочки, метод сплайн-коллокации, теория Миндлина.

Стаття надійшла до редколегії 19.02.2016

УДК 004.415.28

Олександра БУЛГАКОВА, Павло КИСЛИЧЕНКО

м. Миколаїв
sashabulgakova@list.ru, pavelkislichenko@gmail.com

АРХІТЕКТУРА КРУПНИХ МАСШТАБОВАНИХ ДОДАТКІВ В КОНТЕКСТІ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

У статті розглянута архітектура крупно-масштабованих додатків в контексті об'єктно-орієнтованого програмування. Наведена методологія декомпозиції у сфері Інтернет-комерції, на спрощеному прикладі проектування модуля персонального кошика.

Для забезпечення високорівневого інтерфейсу для клієнтських класів, та приховування від них низькорівневого інтерфейсу класів підсистеми, запропоновано використовувати найбільш популярні абстрактні архітектурні рішення, які також називаються шаблонами проектування або патернами.

Ключові слова: програмні системи, архітектура, об'єктно-орієнтоване програмування, проектування програмного забезпечення, система, додаток.

Одним з основних питань, яке найчастіше виникає після завершення розробки та запуску програмної системи, як готового продукту, є можливість масштабування. Тобто можливість інтегрування у систему нових модулів, які забезпечать додатковий функціонал, або модифікацію вже існуючих. Неможливість цього зробити без значної зміни інших частин системи – є результатом нестійкої архітектури усього додатку, тобто великої кількості залежностей між класами і формулює основну проблему, яка розглянута у статті.

З приходом об'єктно-орієнтованного програмування (надалі ООП) у світ інформаційних технологій робота на стадії проектування значно полегшилась, так як ООП – мови надають спеціальні мовні конструкції для абстрагування процесу, що моделюється та формулювання високорівневого інтерфейсу для клієнтських класів, такі як абстрактний клас або інтерфейс.

На протязі останніх десятиліть розробки програмних систем за допомогою ООП – мов, співтовариство програмістів виявило ряд схожих задач, які повторюються при моделюванні різних процесів та розробило ряд архітектурних рішень, які на даний момент є загальносхваленими. Однак правильної, як такої, архітектури не існує, так як кожна програмна система моделює конкретний процес у конкретній сфері діяльності, отже майже кожна система – унікальна. Більш правильним буде сказати, що архітектура є найбільш відповідна або належна до додатку, що розробляється.

Найчастіше знайдені рішення являються лише компонентами загальної архітектури програмної системи, так як підходять для моделювання конкретних локальних частин додатку. На даний момент у світі існують 23 найбільш популярних абстрактних архітектурних рішень, які також називаються шаблонами проектування або патернами.

Патерн – це лише абстрактний приклад правильного використання невеликої кількості комбінацій найпростіших технік ООП [1, 19]. Патерни проектування – це прості абстраговані приклади, що показують правильні способи організації взаємодій між класами або об'єктами [1, 19].

Розроблені шаблони проектування поділяють на три категорії по меті [1, 23]:

- поражаючі (описують процес створення нових екземплярів класів у системі);
- структурні (описують правильну організацію екземплярів класів);
- поведінкові (описують взаємодію між екземплярами класів);
- та на дві категорії по застосовності [1, 28]:
- до класів;
- до об'єктів.
- Можна сформулювати основні причини, які аргументують важливість правильного проектування додатку [5, 1]:
- складність системи, як правило, зростає значно швидше її розмірів і якщо не потурбуватися про це завчасно, то достатньо швидко настає момент, коли команда розробників перестає контролювати систему;
- правильно побудована архітектура дозволяє розпаралелити процес розробки системи. З цього випливає економія часу, сил та фінансових витрат;
- добре спроектований додаток має відносно легку читаємість коду, що дозволяє впроваджувати до розробки нових членів команди, без затрат часу на вивчення екзотичної організації системи;
- програмну систему з добре продуманою архітектурою легше розширювати, змінювати, тестувати, підлагоджувати та розуміти.

Виходячи з вище описаних причин, постановкою задачі є розробка архітектури програмного забезпечення з рядом, цілком усвідомлених, критеріїв, а саме:

Ефективність системи. Сюди можна віднести такі характеристики, як безпека, надійність, масштабованість, можливість впоратися з навантаженням.

Гнучкість системи. Чим швидше та зручніше можна внести зміни у вже існуючий функціонал, чим менше проблем та помилок це викликає – тим гнучкіша і конкурентоспроможна система.

Можливість розширення. Можливість додавати до системи нові сутності та функції, не порушуючи її основної структури. Ця вимога являється настільки важливою, що вона навіть сформульована у вигляді окремого принципу – *Принципу відкритості/закритості* (Open-Closed – Principle – другий, з п'яти принципів SOLID): *Програмні сутності (класи, модулі, функції, тощо) повинні бути відкритими для розширювання, але закритими для модифікації.*

Можливість повторного використання. Систему бажано проектувати таким чином, щоб її підсистеми або модулі можна було б повторно використовувати у інших системах.

Гарно структурований, зрозумілий код. У процесі розробки, як правило, беруть участь декілька розробників і є ймовірність, що вони залишать проект та прийдуть нові. Супроводжувати програмну систему також, як правило, доводиться новим людям, котрі не брали участі у розробці. Тому гарна

архітектура повинна надавати можливість відносно легко та швидко зрозуміти систему новим розробникам.

Не дивлячись на різноманітність критеріїв, все ж таки головною при проектуванні крупних масштабованих додатків є зниження складності. Основним шляхом для досягнення цієї цілі є *декомпозиція* програмної системи на окремі частини.

Однією з не багатьох архітектур, котрі можна умовно назвати універсальними є *модульна архітектура*. Декомпозиція на окремі модулі у даному рішенні є основною. Складна програмна система повинна складатися з більш простіших підсистем, а ті, в свою чергу, також поділяються на частини меншої ступені складності і так до тих пір, поки не будуть виявлені найпростіші, безпосередньо зрозумілі, частини.

Поряд зі зниженням складності така архітектура забезпечує гнучкість системи, надає гарні можливості для масштабування, а також дозволяє підвищувати стійкість.

У процесі декомпозиції програмної системи на модулі відбувається послаблення їх залежності один від одного, що дозволяє достатнього зрозуміло організувати модульну взаємодію між собою та зовнішнім світом. Існує ряд правил, котрих слід дотримуватись використовуючи методологію декомпозиції. Поділяти систему слід ієрархічно, рис. 1. Кожна підсистема (функціональні модулі, сервіси, шари програми) повинні виконувати свою певну, конкретну функцію і в ідеальному випадку можуть бути працездатними автономно або у іншому оточенні.

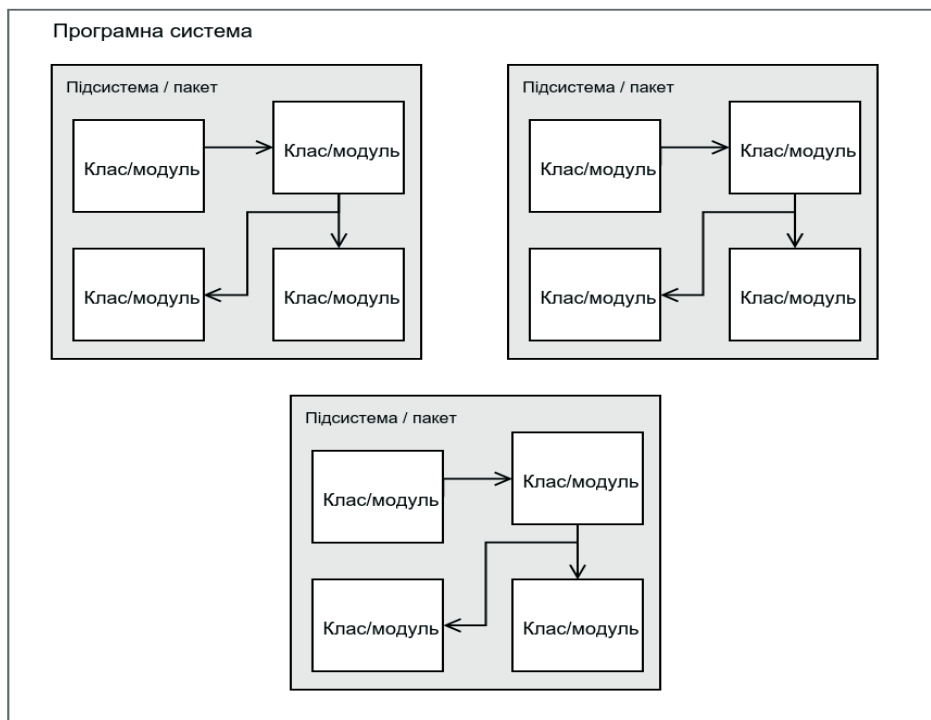


Рис. 1. Ієрархічна декомпозиція програмної системи

Результатом такого поділу є програма – конструктор, що складається з набору організованих модулів/частин, котрі взаємодіють між собою по гарно обміркованим правилам.

Розглянемо методологію декомпозиції детальніше у сфері Інтернет-комерції, на спрощеному прикладі проектування модуля персонального кошика. Спочатку слід виявити основні функції, котрі виконує персональний кошик користувача:

- перелік продуктів/атрибутів продуктів (ціна, назва, ідентифікатор, тощо);
- розрахунок знижки для конкретного продукту;
- розрахунок вартості доставки у конкретний регіон;
- розрахунок загальної вартості, враховуючи знижки і доставку;

Виходячи з першого із принципів *SOLID* (на кожен клас покладений один єдиний обов'язок/функція), не важко розподілити даний модуль на окремі програмні одиниці/частини:

- Product – клас, котрий буде описувати низькорівневий (відносно сутності кошика) інтерфейс для роботи з продуктом (отримання/встановлення атрибутів);
- ShippingCalculator – клас, що відповідає за розрахунок вартості доставки, з урахуванням конкретної країни, міста та податку;
- Discount Calculator – клас, який описує інтерфейс розрахунку знижки;
- ShoppingCart – безпосередньо клас самого кошика, описуючий високорівневий інтерфейс (відносно клієнтських класів) взаємодії з ним.

У даному випадку для забезпечення високорівневого інтерфейсу для клієнтських класів, та приховування від них низькорівневого інтерфейсу класів підсистеми можна спроектувати дещо схоже на патерн «Фасад». Основна ідея цього патерну закладена у управлінні та перенаправленні запитів. Під клієнтськими класами розуміються класи – посередники між підсистемами/модулями/пакетами, котрі реалізують їх взаємодію.

UML – діаграма класів зображена на рис. 2.

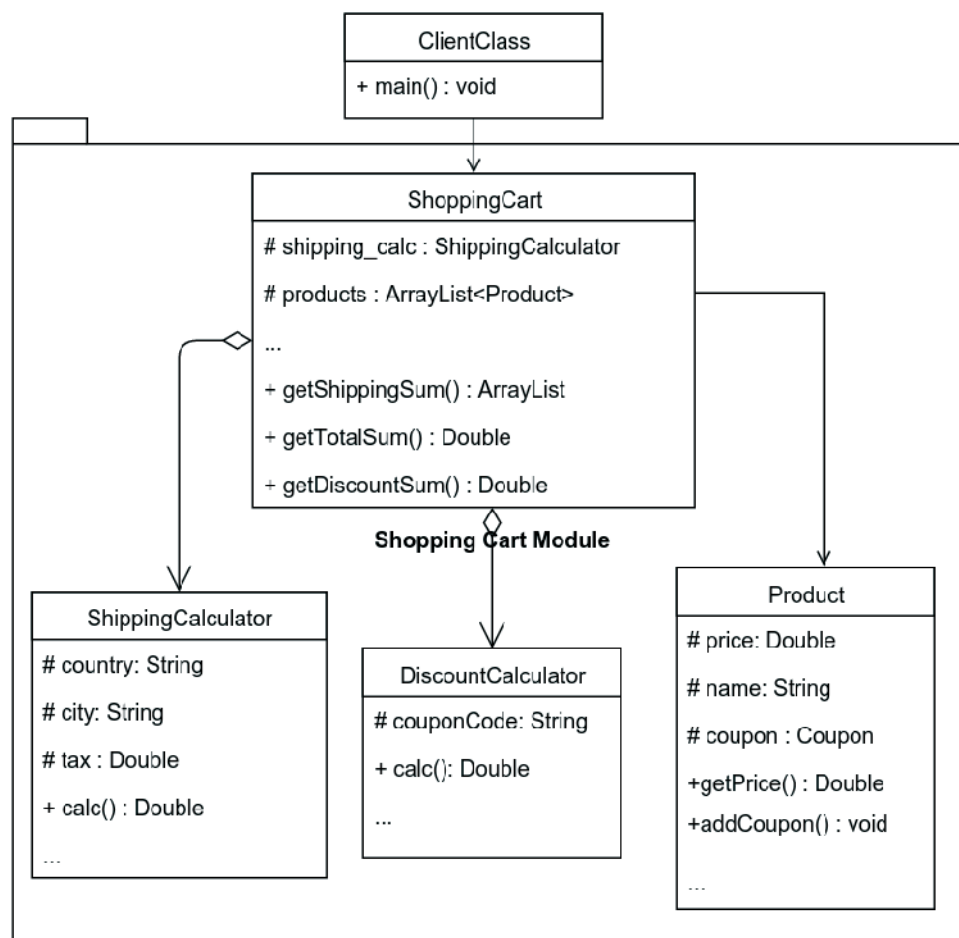


Рис. 2. UML – діаграма класів модуля персонального кошика

Слід зазначити, що дана діаграма достатньо стисла, та для простоти сприйняття не описує усіх методів, котрі можуть бути реалізовані у реальному проекті. Однак, на ній чітко видно, що кожен клас підсистеми займається своєю справою, і майже нічого один про одного не знає. А керує процесом клас **ShoppingCart**, з котрим і взаємодіють клієнтські класи із інших підсистем.

Кожен клас модуля можна використовувати повторно, так як кожен з них може працювати автономно або у іншому оточенні. Це забезпечено пониженням кількості зв'язків між класами підсистеми та організовану взаємодію між ними.

Отже результати проектування відповідають усім, вище поставленим, критеріям достатньо стійкої архітектури додатку.

Масштабування. Отримана підсистема має можливість масштабування, за рахунок додавання нових класів, без значної зміни інших.

Повторне використання. Модуль може бути використаний у інших програмних системах або у іншому оточенні. Це справедливо також і для класів модуля.

Супроводжуваність. Дана спроектована підсистема достатньо проста та інтуїтивно зрозуміла.

Найголовнішим досягненням є *ефективність* спроектованої підсистеми, вона чітко виконує покладену на неї функцію.

Архітектура програмного забезпечення являється вже достатньо не молодим напрямом але стрімко розвивається. З ростом технічних можливостей, ростуть і можливості розробки більш складних, масштабних алгоритмів та систем, які породжують за собою достатньо цікаві і такі важливі архітектурні рішення.

Список використаних джерел

1. Шевчук А. Design Patterns via C#. Приемы объектно-ориентированного проектирования / А. Шевчук, Д. Охрименко, А. Касьянов. – 2015. – 200 с.
2. Гамма Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Д. Влиссидес. – Addison Wesley Longman Inc., 1995. – 196 с.
3. Мартин Фаулер. Patterns of Enterprise Application Architecture, 2007.
4. Цвалина К. Инфраструктура программных проектов. Соглашения, идиомы и шаблоны для многократно используемых библиотек.NET / К. Цвалина, Б. Абрамс. – Издательство Вильямс, 2011.
5. Создание архитектуры программы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://habrahabr.ru/post/276593/>

Oleksandra BULGAKOVA, Pavlo KYSLYCHENKO
Mykolaiv

THE LARGE SCALABLE APPLICATIONS ARCHITECTURE IN OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING CONTEXT

The paper present the large-scalable applications architecture in object-oriented programming context. Decomposition methodology in the e-commerce field, in example of the personal basket design module was presented.

To ensure a high-level interface for client classes, and concealing from them the low-level interface subsystem classes, proposed to use the most popular abstract architectural solutions, which are also called templates or design patterns.

Key words: software systems, architecture, object-oriented programming, software design, system application.

Александра БУЛГАКОВА, Павел КИСЛИЧЕНКО
г. Николаев

АРХИТЕКТУРА КРУПНЫХ МАСШТАБИРУЕМЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ В КОНТЕКСТЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

В статье рассмотрена архитектура крупно-масштабируемых приложений в контексте объектно-ориентированного программирования. Приведена методология декомпозиции в сфере Интернет-коммерции, на упрощенном примере проектирования модуля персональной корзины.

Для обеспечения высокоуровневого интерфейса для клиентских классов, и сокрытие от них низкоуровневого интерфейса классов подсистемы, предложено использовать наиболее популярные абстрактные архитектурные решения, которые также называются шаблонами проектирования или паттернами.

Ключевые слова: программные системы, архитектура, объектно-ориентированное программирование, проектирование программного обеспечения, система, приложение.

Стаття надійшла до редколегії 26.02.2016

ЗАСТОСУВАННЯ CRM-СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ОБСЛУГОВУВАННЯ КЛІЄНТІВ

У статті розглянута задача підвищення ефективності та якості обліку взаємовідносин підприємства з клієнтами на основі застосування CRM-систем для автоматизації оцінки показників обслуговування клієнтів. Представлена CRM-система призначена для систематизації обліку роботи з клієнтами, кількісного обліку клієнтів, обліку статусу клієнтів, ведення обліку контактної інформації (поштових адрес, телефонів, Skype, ICQ, та інших), обліку ділових контактів (дзвінків, листів, перемов), планування роботи з клієнтами, аналізу кількісних показників роботи співробітників.

Описані інструменти розробки, створення баз даних, розробка інтерфейсу користувача, та наведені результати тестування системи.

Ключові слова: управління взаємовідносинами з клієнтами, CRM-система, мова структурованих запитів SQL, система керування базами даних, веб-додаток, технологія AJAX, серверна частина системи, клієнтська частина системи.

Швидкий розвиток інформаційних технологій передбачає повсюдне їх використання у процесах управління підприємством та його комунікації з оточенням. Інформаційна технологія є рушійною силою та одним із основних стратегічних засобів, необхідних для реалізації завдань керування підприємством.

Одним із завдань керування підприємством є менеджмент клієнтів. Ефективне управління клієнтами сприяє реалізації маркетингової стратегії фірми на ринку і дозволяє отримати конкурентні переваги за рахунок швидшої реакції на зміни попиту споживача. Управління клієнтами спрямоване на пошук шляхів задоволення запитів безлічі різних клієнтів.

Наявність бази даних клієнтів дає змогу: ідентифікувати клієнтів за рівнем доходу, укласти більшу кількість угод, краще пізнати потенційних клієнтів і перетворити їх на реальних покупців, укласти список попередніх клієнтів, які надалі залишаються майбутніми споживачами, виявити послуги, які приносять найбільший дохід, вести відповідну цінову політику, порівнювати витрати і доходи, оцінювати показники обслуговування клієнтів, визначати ефективність управлінських рішень.

Зі сказаного випливає, що підвищення ефективності обліку роботи з клієнтами для підприємств, шляхом розробки CRM-систем є актуальною задачею.

Наразі існує багато різних систем CRM (Customer relationship management – Управління взаємовідносинами з клієнтами), серед яких є як і відкриті так і комерційні системи. Також є багато фірм, які займаються впровадженням CRM на підприємствах. CRM бувають як галузеві так і уніфіковані. Ключовою рисою усіх є наявність модулю клієнтської бази, списку контрагентів, ведення ділових контактів. У галузевих системах інтегрована специфічна функціональність, але часто орієнтованість на конкретну галузь зводиться до створення в системі специфічного каталогу реквізитів та додавання спеціалізованих полів до стандартної бази [1].

Існуючі системи також підрозділяються за технологією роботи. Деякі побудовані на базі відкритого програмного забезпечення та веб-технології, деякі побудовані на базі програмної платформи 1С: Підприємство, яка у деяких випадках також дозволяє роботу у якості веб-додатка. Є системи побудовані на базі технології Microsoft ASP.NET, яка є дуже зручною та функціональною платформою для веб-систем.

Багато з існуючих систем мають можливість працювати за схемою SaaS (Software as a Service). У такому випадку система працює не на обладнанні підприємства, а у дата-центрі постачальника послуги, а користування тарифікується в залежності від кількості користувачів та часу використання системи.

При порівнянні існуючих систем були розглянуті системи, вказані у таблиці 1.

CRM системи

Назва	Розробник	Платформа або мова програмування
1С: Підприємство 8. CRM СТАНДАРТ	1С Парус	1С: Підприємство 8
FreshOffice	«Свіжі рішення»	Microsoft SQL Server
БІТ:CRM 8	«Перший Біт»	1С: Підприємство 8
SugarCRM	SugarCRM	Web-платформа (PHP)
vtiger CRM	Vtiger	Web-платформа (PHP)
TeamLab	TeamLab	Web-платформа (ASP.NET)

Розглянуті системи є ефективними та багатофункціональними рішеннями. Серед розглянутих систем є як безкоштовні так і платні варіанти з невеликою вартістю. Усі представлені у огляді системи є системами з відкритим кодом, тобто дозволяють доробку та розширення функціональності. Але функціональність усіх цих систем є дуже широкою, через що вони є громіздкими, складними для освоєння кінцевими користувачами. Через це було прийнято рішення розробити нову систему для власного користування.

У роботі буде описана система, яка призначена для систематизації обліку роботи з клієнтами, кількісного обліку клієнтів, обліку статусу клієнтів, ведення обліку контактної інформації (поштових адрес, телефонів, Skype, ICQ, та інших), обліку ділових контактів (дзвінків, листів, перемов), планування роботи з клієнтами, аналізу кількісних показників роботи співробітників.

Кінцева ціль даної системи – надання користувачам-агентам простого і зручного інструменту систематизації робочих даних.

В якості моделі даних для системи була обрана реляційна модель організації даних. Реляційна модель даних (РМД) – логічна модель даних, прикладна теорія побудови баз даних, яка є додатком до завдань обробки даних таких розділів математики як теорії множин і логіка першого порядку.[2]

Діаграма сутностей та зв'язків системи представлена на рис. 1.

Така схема даних дозволяє за допомогою відповідних запитів отримати усю необхідну інформацію у різних розрізах.

Таблиці зв'язані між собою за допомогою зовнішніх ключів для дотримання посилальної цілісності.

Основними діями користувачів при роботі з системою є:

- внесення даних про нових клієнтів;
- актуалізація старих даних;
- реєстрація ділових контактів з клієнтами;
- друк наліпок з адресами для поштових розсилок.

Розглянемо кожну з дій детальніше. При внесенні даних про клієнта дії користувача відбуваються за схемою (рис. 2). При зміні/актуалізації даних про вже існуючого клієнта або внесення (реєстрації) ділового контакту користувач виконує наступні дії (рис. 3):

Згідно з поставленою задачею, при створенні системи використано сучасні технології розробки web-додатків та сучасну багатофункціональну систему керування базами даних.

Подібні додатки працюють за клієнт-серверною схемою роботи. Для їх створення використовують такі технології і мови програмування як ASP.NET, JSP (JavaServer Pages), PHP, Javascript, Ruby on Rails, Python та багато інших.

В якості системи керування базами даних було обрано PostgreSQL. Вибір саме цієї СКБД обумовлений передусім більш багатогранною функціональністю у порівнянні з іншими відкритими СКБД:

- багаті можливості для написання збережених процедур у базі даних;
- можливість використання вкладених підзапросів у представленнях;
- повна відповідність стандартам мови запитів SQL.

PostgreSQL – широко поширена система керування базами даних з відкритим програмним кодом [3].

PostgreSQL є широко використаною системою баз даних. Серед користувачів найбільш крупними та відомими є система інтернет-телефонії Skype, сервіс музичних вподобань Last.fm, Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (NASA) [4] та інші.

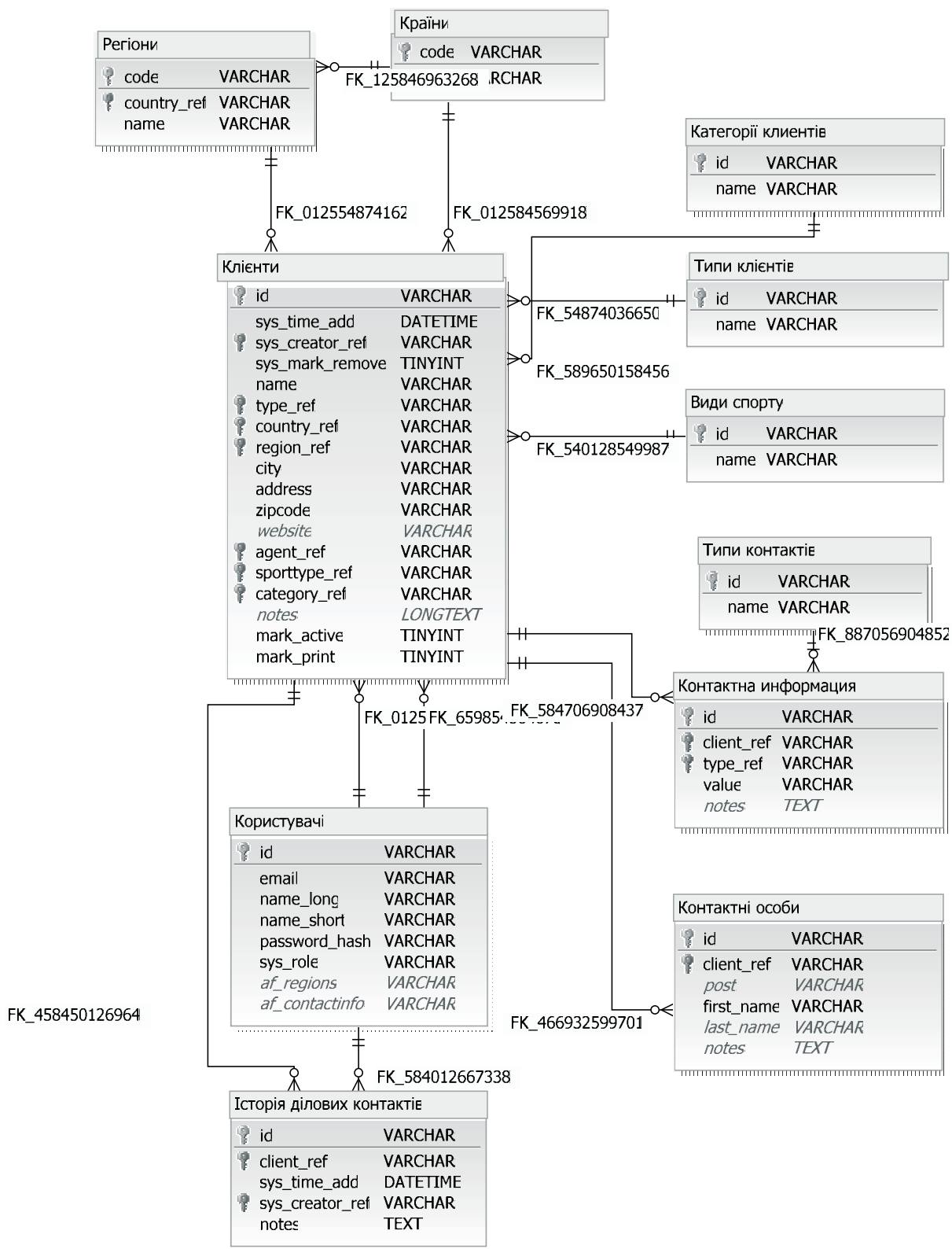


Рис. 1. Діаграма сутностей та зв'язків системи

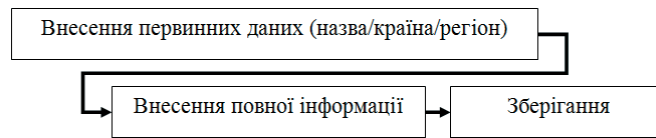


Рис. 2. Порядок дії при внесенні даних у базу

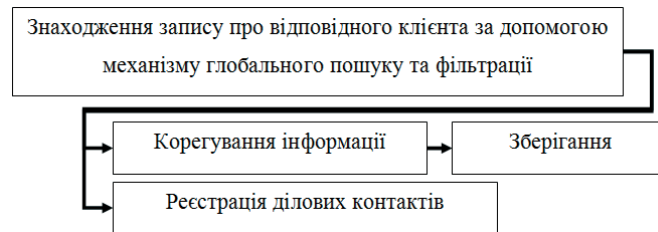


Рис. 3. Порядок дії при коригуванні даних

Для тестування роботи системи був використаний механізм генерації штучних даних. Для генерації цих даних був підготовлений великий список лексем, найменувань, та, часом, просто слів з словника, на основі яких було згенеровано набір штучних даних для системи. Потім ще деяка кількість даних була занесена операторами у систему, після чого був виконаний аналіз проведеної роботи. Після цього у систему були внесені необхідні виправлення тих помилок, які були виявлені під час тестування.

У роботі розглянуті питання проектування системи, проектування схеми даних, алгоритмів дій користувачів, розроблена та реалізована система для систематизації обліку роботи з клієнтами. Для реалізації системи було обрано сучасні технології програмування, такі як PHP, Javascript, HTML5, AJAX. Тестування у процесі розробки виконувалося за допомогою автоматизованих модульних тестів, інтерфейс користувача тестувався автоматизованими сценаріями Selenium.

Реалізована система надала користувачам-агентам дуже простий і зручний інструмент систематизації робочих даних, що позначилося на якості роботи агентів – за короткий термін була систематизована уся клієнтська база та сформована історія ділових контактів.

Список використаних джерел

1. Всё о CRM: [Customer Relationship Management] / А. Албитов, Е. Соломатин // Информация и бизнес. — 2002. — № 3.
2. К. Дж. Дейт. Введение в системы баз данных = Introduction to Database Systems. — 8-е изд. — М.: Вильямс, 2006. — С. 1328.
3. PostgreSQL history [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.postgresql.org/about/history/>.
4. Adrian Bridgwater. Where NASA and Instagram get open source databases [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.computerweekly.com/blogs/cwbn/2012/09/where-nasa-and-instagram-get-their-open-source-databases.html>.

Oleksandra BULGAKOVA, Andriy KUDRYAVTSEV,
Oleksandr BONDAR
 Mykolaiv

THE USE OF CRM-SYSTEMS FOR CUSTOMER SERVICE EVALUATION INDICATORS AUTOMATION

The paper present the problem of improving registration efficiency and quality enterprise customer relationships through the use CRM-systems for the customer service evaluation indicators automation.

Presented CRM-system is designed to systematize the customer service accounting, quantifying customer, customer status accounting, record keeping contact information (mailing address, phone, Skype, ICQ, etc.), taking into account business contacts (calls, letters, meetings), planning work with customers, staff quantitative indicators analysis.

Described the development tools, databases, user interface development, given the system testing results.

Key words: customer relationship management, CRM-system, structured SQL queries language, database management system, AJAX technology, web application, system server part, client system part.

Александра БУЛГАКОВА, Андрей КУДРЯВЦЕВ,
Александр БОНДАРЬ
г. Николаев

ПРИМЕНЕНИЕ CRM-СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ КЛИЕНТОВ

В статье рассмотрена задача повышения эффективности и качества учета взаимоотношений предприятия с клиентами на основе применения CRM-систем для автоматизации оценки показателей обслуживания клиентов.

Представленная CRM-система предназначена для систематизации учета работы с клиентами, количественного учета клиентов, учета статуса клиентов, ведение учета контактной информации (почтовых адресов, телефонов, Skype, ICQ и других), учета деловых контактов (звонков, писем, переговоров), планирование работы с клиентами, анализа количественных показателей работы сотрудников.

Описаны инструменты разработки, создания баз данных, разработка интерфейса пользователя, приведены результаты тестирования системы.

Ключевые слова: управление взаимоотношениями с клиентами, CRM-система, язык структурированных запросов SQL, система управления базами данных, веб-приложение, технология AJAX, серверная часть системы, клиентская часть системы.

Стаття надійшла до редколегії 26.02.2016

УДК 519.63.001.57

Олена ГЛАДКА, Ярослав БАБИЧ,
Володимир ГОЧ
м. Рівне
viklom@ukr.net

СИНТЕЗ МЕТОДІВ КОНФОРМНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ ТА СУМАРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У LEF-ПЛАСТАХ

Розроблено методику моделювання нелінійних квазіідеальних фільтраційних процесів у криволінійних пористих LEF-пластах, що обмежені лініями течії і еквіпотенціальними лініями. В основу підходу покладено ідею синтезу числових методів конформних відображень та сумарних зображень. Розроблено алгоритм розв'язування відповідних крайових задач, що автоматично вирішує проблему вибору вузлів розрахункової сітки та побудови динамічної сітки, обчислення повної фільтраційної витрати і є основою для розрахунку поля швидкості та інших характеристик.

Ключові слова: нелінійні моделі, числовий метод конформних відображень, метод сумарних зображень, динамічна сітка, LEF-пласт.

У наш час залишаються актуальними проблеми створення якісних обчислювальних технологій для розрахунків основних кількісних характеристик процесів руху, зокрема, рідин і газів у пористому пласті. Незважаючи на велику кількість розробок у цьому напрямку, існують певні класи задач, для яких використання відомих методів є недостатнім. У роботах [1–3, 7, 8] запропоновано конструктивний підхід до моделювання квазіідеальних полів для одно- та багатозв'язних криволінійних областей, обмежених лініями течії і еквіпотенціальними лініями, на основі синтезу числових методів конформних (квазіконформних) відображень та сумарних зображень.

У цьому дослідженні, як і в [1–3], для моделювання нелінійних фільтраційних процесів застосовуються методи комплексного аналізу, у яких як компонента використовується метод сумарних зображень [4–6]. Числово-аналітичні методи сумарних зображень, як відомо, мають низку переваг: більшість невідомих, які входять у різницеву задачу, у рахунок участі не беруть, що забезпечує зменшення обсягу обчислювальної роботи, явний вигляд формул сумарних зображень дає змогу, зокрема, робити вибіркові обчислення, а також уникати накопичення обчислювальних похибок; ці методи є стійкими і добре адаптованими до комп'ютерної реалізації.

Суттєвим обмеженням методів сумарних зображень є можливість використання їх лише для деяких канонічних областей та їх об'єднань. Це обмеження зняте при дослідженні широкого класу задач в областях з криволінійними ділянками межі (лініями течії та еквіпотенціалами) шляхом обернення конформних відображень.

У цій роботі розроблювана методика викладена на прикладі, коли дослідження ідеального поля зведено до конформного відображення прямокутника з невідомою висотою (повною фільтраційною витратою) на LEF-область [1] – криволінійну чотирикутну область, обмежену лініями течії та еквіпотенціальними лініями (випадок 1) [3] чи криволінійну кільцеподібну двозв'язну область, обмежену еквіпотенціальними лініями (випадок 2) [2].

Розглянемо задачу знаходження гармонічної функції $\varphi = \varphi(x, y)$ (потенціалу) у криволінійній чотирикутній LEF-області G_z ($z = x + iy$), обмеженій еквіпотенціальними лініями $L_* = AB = \{z: f_1(x, y) = 0\}$, $L^* = CD = \{z: f_3(x, y) = 0\}$ і лініями течії $L_0 = DA = \{z: f_4(x, y) = 0\}$, $L^0 = BC = \{z: f_2(x, y) = 0\}$ (рис. 1, а), за крайових умов $\varphi|_{L_*} = \varphi_*$, $\varphi|_{L^*} = \varphi^*$, $\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}}|_{L_0} = \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}}|_{L^0} = 0$, де φ_* , φ^* – сталі, $-\infty < \varphi_* < \varphi^* < +\infty$, \mathbf{n} – зовнішня нормаль до відповідної кривої. Випадок двозв'язної криволінійної LEF-області G_z° , що обмежена двома еквіпотенціалами – гладкими замкненими контурами – внутрішнім $L_* = \{z: f_*(x, y) = 0\}$ і зовнішнім $L^* = \{z: f^*(x, y) = 0\}$ з умовами на них $\varphi|_{L_*} = \varphi_*$, $\varphi|_{L^*} = \varphi^*$, зводиться до попереднього шляхом проведення умовного розрізу Γ вздовж лінії течії (яка знаходиться в процесі розв'язання задачі), що проходить через зафіксовану на контурі L_* деяку точку A , і утворення однозв'язної області $G_z = G_z^\circ \setminus \Gamma$, у якій L_0 і L^0 – відповідно верхній і нижній береги розрізу Γ (рис. 1, б) [2]. Процес фільтрації описується законом Дарсі $\vec{v} = \kappa \cdot \text{grad } \varphi$ і рівнянням нерозривності $\text{div } \vec{v} = 0$ [8], де $\vec{v} = v_x(x, y) + i v_y(x, y)$ – швидкість фільтрації, κ – деяка обмежена в G_z функція (чи тензор функцій другого роду), яка характеризує провідність середовища.

Аналогічно до [1–3], введенням функції течії $\psi = \psi(x, y)$, комплексно спряженої до $\varphi = \varphi(x, y)$, отримано більш загальну задачу на конформне відображення $\omega = \omega(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$ області G_z на відповідну прямокутну область комплексного потенціалу $G_\omega = \{\omega = \varphi + i\psi: \varphi_* < \varphi < \varphi^*, 0 < \psi < Q\}$ з невідомим параметром (повною фільтраційною витратою) Q :

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \kappa \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \kappa \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (x, y) \in G_z, \\ \varphi|_{L_*} = \varphi_*, \quad \varphi|_{L^*} = \varphi^*, \quad \psi|_{L_0} = 0, \quad \psi|_{L^0} = Q, \\ Q = \int_{L_*} -\frac{\partial \varphi}{\partial y} dx + \frac{\partial \varphi}{\partial x} dy. \end{cases} \quad (1)$$

Задачу (1) (наслідуючи методологію, розроблену в [1–3]) замінимо на обернену до неї, оскільки, по-перше, область комплексного потенціалу G_ω є прямокутником, на відміну від геометрично складної фізичної області G_z , а по-друге, перехід до оберненого відображення автоматично вирішує проблему дискретизації задачі при застосуванні числових методів, дозволяє використати переваги методу сумарних зображень для розв'язання відповідних різницевих задач, будувати динамічну сітку руху речовини, визначити повну фільтраційну витрату Q (не розв'язуючи інтегрального рівняння) тощо.

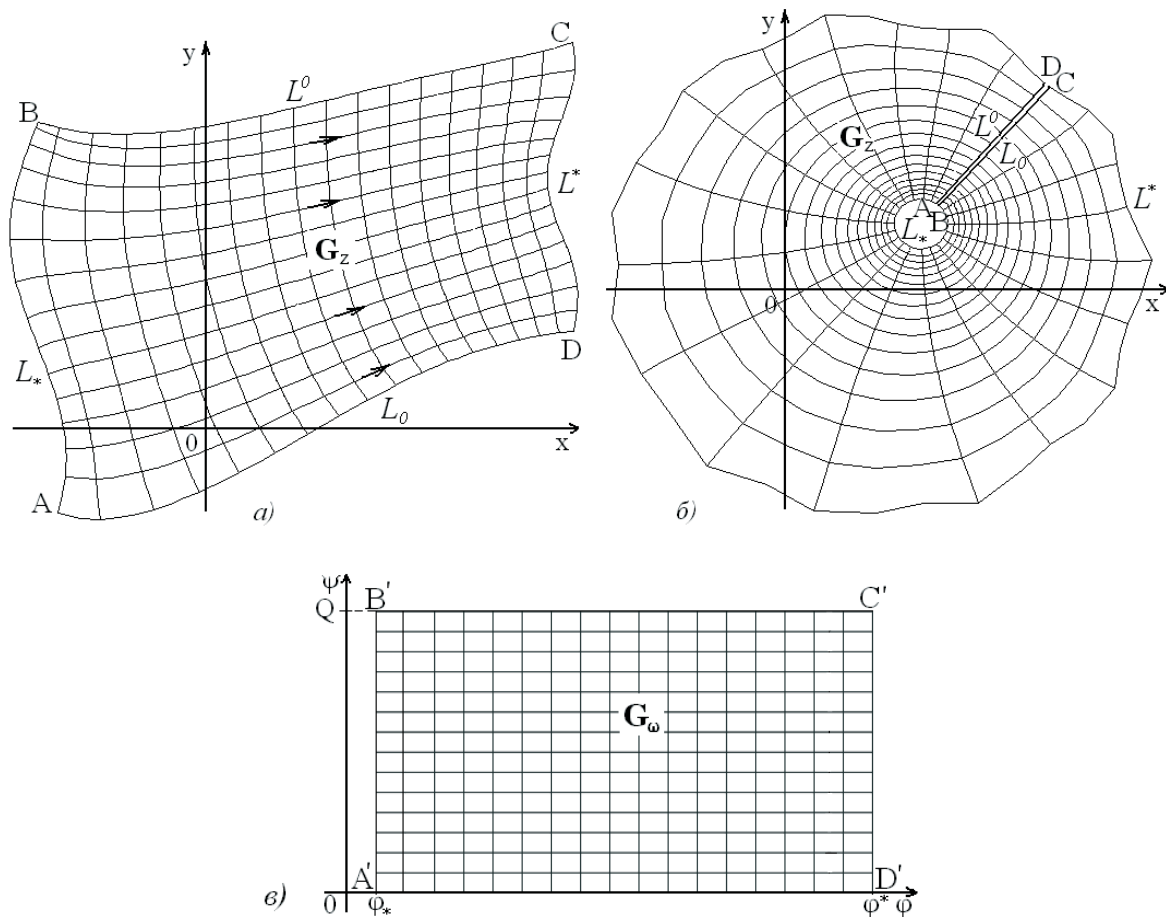


Рис. 1. Схема одно- (а) та двозв'язної (б) криволінійної LEF-області і відповідної їй області комплексного потенціалу (в)

Використовуючи формули переходу:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{J} \frac{\partial y}{\partial \psi}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{1}{J} \frac{\partial x}{\partial \psi}, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{1}{J} \frac{\partial y}{\partial \varphi}, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{1}{J} \frac{\partial x}{\partial \varphi}, \quad J = \frac{\partial x}{\partial \varphi} \frac{\partial y}{\partial \psi} - \frac{\partial x}{\partial \psi} \frac{\partial y}{\partial \varphi},$$

отримуємо відповідну крайову задачу на обернене конформне відображення $z = z(\omega) = x(\varphi, \psi) + iy(\varphi, \psi)$ області G_ω на G_z :

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa \frac{\partial x}{\partial \varphi} = \frac{\partial y}{\partial \psi}, \quad \frac{\partial y}{\partial \varphi} = -\kappa \frac{\partial x}{\partial \psi}, \quad (\varphi, \psi) \in G_\omega, \\ f_*(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) = 0, \quad f^*(x(\varphi^*, \psi), y(\varphi^*, \psi)) = 0, \quad 0 \leq \psi \leq Q, \\ f(x(\varphi, 0), y(\varphi, 0)) = 0, \quad f(x(\varphi, Q), y(\varphi, Q)) = 0, \quad \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^*, \\ Q = \int_0^Q \kappa \left[\left(\frac{\partial x}{\partial \psi} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \psi} \right)^2 \right] d\psi. \end{array} \right. \quad (2)$$

Доповнивши задачу (2) умовами ортогональності ліній течії та еквіпотенціальних ліній до відповідних ділянок межі фізичної області:

$$\text{grad } \psi(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) \cdot \text{grad } f_1(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) = 0,$$

$$\text{grad } \varphi(x(\varphi, 0), y(\varphi, 0)) \cdot \text{grad } f_2(x(\varphi, 0), y(\varphi, 0)) = 0,$$

$$\text{grad } \psi(x(\varphi^*, \psi), y(\varphi^*, \psi)) \cdot \text{grad } f_3(x(\varphi^*, \psi), y(\varphi^*, \psi)) = 0,$$

$$\text{grad } \varphi(x(\varphi, Q), y(\varphi, Q)) \cdot \text{grad } f_4(x(\varphi, Q), y(\varphi, Q)) = 0$$

(випадок 1) чи

$$\text{grad } \psi(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) \cdot \text{grad } f_*(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) = 0,$$

$$\text{grad } \psi(x(\varphi^*, \psi), y(\varphi^*, \psi)) \cdot \text{grad } f^*(x(\varphi^*, \psi), y(\varphi^*, \psi)) = 0$$

(випадок 2),

як і в [1], зводимо до розв'язування в G_ω еліптичних диференціальних рівнянь другого порядку

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{\partial x}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\kappa \frac{\partial x}{\partial \psi} \right) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{\partial y}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\kappa \frac{\partial y}{\partial \psi} \right) = 0, \quad (\text{рівнянь Лапласа } \Delta x(\varphi, \psi) = 0,$$

$\Delta y(\varphi, \psi) = 0$ при $\kappa = 1$), за умов (у випадку 1):

$$f_1(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) = 0, \quad f_3(x(\varphi^*, \psi), y(\varphi^*, \psi)) = 0, \quad 0 \leq \psi \leq Q, \quad (3)$$

$$f_2(x(\varphi, Q), y(\varphi, Q)) = 0, \quad f_4(x(\varphi, 0), y(\varphi, 0)) = 0, \quad \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^*,$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial y} - \frac{\partial y}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial x} \right) \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, \quad \left(\frac{\partial x}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial y} - \frac{\partial y}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial x} \right) \Big|_{\psi=Q} = 0, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial f_3}{\partial y} - \frac{\partial y}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial f_3}{\partial x} \right) \Big|_{\varphi=\varphi^*} = 0, \quad \left(\frac{\partial x}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial f_4}{\partial y} - \frac{\partial y}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial f_4}{\partial x} \right) \Big|_{\psi=0} = 0$$

чи умов (у випадку 2):

$$f_*(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) = 0, \quad f^*(x(\varphi^*, \psi), y(\varphi^*, \psi)) = 0, \quad 0 \leq \psi \leq Q, \quad (5)$$

$$x(\varphi, 0) = x(\varphi, Q), \quad y(\varphi, 0) = y(\varphi, Q), \quad \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^*,$$

$$\lim_{\psi \rightarrow 0+0} \frac{\partial x(\varphi, \psi)}{\partial \psi} = \lim_{\psi \rightarrow Q-0} \frac{\partial x(\varphi, \psi)}{\partial \psi}, \quad \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^*,$$

$$\lim_{\psi \rightarrow 0+0} \frac{\partial y(\varphi, \psi)}{\partial \psi} = \lim_{\psi \rightarrow Q-0} \frac{\partial y(\varphi, \psi)}{\partial \psi}, \quad \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^*,$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial f_*}{\partial y} - \frac{\partial y}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial f_*}{\partial x} \right) \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, \quad \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial f^*}{\partial y} - \frac{\partial y}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial f^*}{\partial x} \right) \Big|_{\varphi=\varphi^*} = 0. \quad (6)$$

Для числового розв'язання задачі виконується її дискретизація шляхом побудови в G_ω ортогона-

льної сітки $G_\omega^\gamma = \{(\varphi_i, \psi_j) : \varphi_i = \varphi_* + \Delta_\varphi \cdot i, \quad i=\overline{0, m+1}; \quad \psi_j = \Delta_\psi \cdot j, \quad j=\overline{0, n+1}; \quad \Delta_\varphi = \frac{\varphi^* - \varphi_*}{m+1},$

$\Delta_\psi = \frac{Q}{n+1}, \quad m, n \in \mathbb{N}\}$, де $\gamma = \Delta_\varphi / \Delta_\psi$ – конформний інваріант, та заміни крайових умов і умов

ортогональності в околі межі області – спеціальними числово-аналітичними різницевиими рівняннями, зокрема, умов (3), (4):

$$\begin{cases} f_1(x_{0,j}, y_{0,j}) = 0, & f_3(x_{m+1,j}, y_{m+1,j}) = 0, & j=\overline{0, n+1}, \\ f_2(x_{i,n+1}, y_{i,n+1}) = 0, & f_4(x_{i,0}, y_{i,0}) = 0, & i=\overline{0, m+1}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f'_{1x}(x_{0,j}, y_{0,j})(y_{1,j} - y_{0,j}) - f'_{1y}(x_{0,j}, y_{0,j})(x_{1,j} - x_{0,j}) = 0, \\ f'_{3x}(x_{m+1,j}, y_{m+1,j})(y_{m,j} - y_{m+1,j}) - f'_{3y}(x_{m+1,j}, y_{m+1,j})(x_{m,j} - x_{m+1,j}) = 0, \\ f'_{2x}(x_{i,n+1}, y_{i,n+1})(y_{i,n} - y_{i,n+1}) - f'_{2y}(x_{i,n+1}, y_{i,n+1})(x_{i,n} - x_{i,n+1}) = 0, \\ f'_{4x}(x_{i,0}, y_{i,0})(y_{i,1} - y_{i,0}) - f'_{4y}(x_{i,0}, y_{i,0})(x_{i,1} - x_{i,0}) = 0, \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, \end{array} \right. \quad (8)$$

а умов (5), (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} f^*(x_{0,j}, y_{0,j}) = 0, \quad f^*(x_{m+1,j}, y_{m+1,j}) = 0, \quad j = \overline{0, n+1}, \\ x_{i,0} = x_{i,n+1}, \quad y_{i,0} = y_{i,n+1}, \quad i = \overline{0, m+1}. \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{i,0} = \alpha(x_{i+1,0} + x_{i-1,0}) + \beta(x_{i,1} + x_{i,n}) + 0.05(x_{i-1,1} + x_{i+1,1} + x_{i-1,n} + x_{i+1,n}), \\ y_{i,0} = \alpha(y_{i+1,0} + y_{i-1,0}) + \beta(y_{i,1} + y_{i,n}) + 0.05(y_{i-1,1} + y_{i+1,1} + y_{i-1,n} + y_{i+1,n}), \\ i = \overline{1, m}, \quad \alpha = \frac{0.5\Delta_\psi^2 - 0.1\Delta_\phi^2}{\Delta_\phi^2 + \Delta_\psi^2}, \quad \beta = \frac{0.5\Delta_\phi^2 - 0.1\Delta_\psi^2}{\Delta_\phi^2 + \Delta_\psi^2}, \\ (4x_{1,j} - 3x_{0,j} - x_{2,j})(x_{0,j+1} - x_{0,j-1}) + (4y_{1,j} - 3y_{0,j} - y_{2,j}) \times \\ \times (y_{0,j+1} - y_{0,j-1}) = 0, \quad (3x_{m,j} + x_{m-2,j} - 4x_{m-1,j})(x_{m,j+1} - x_{m,j-1}) + \\ + (3y_{m,j} + y_{m-2,j} - 4y_{m-1,j})(y_{m,j+1} - y_{m,j-1}) = 0, \quad j = \overline{1, n}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Формулу для наближеного знаходження конформного інваріанту γ отримаємо на підставі умови «конформної подібності в малому» відповідних елементарних чотирикутників областей G_ω^γ і G_z^γ (динамічної сітки, що утворена у фізичній області G_z шляхом перетину ліній течії і еквіпотенціалей) [3]:

$$\gamma = \frac{1}{(m+1)(n+1)} \sum_{i,j=0}^{m,n} \gamma_{i,j}, \quad (11)$$

$$\text{де } \gamma_{i,j} = \frac{\sqrt{(x_{i+1,j} - x_{i,j})^2 + (y_{i+1,j} - y_{i,j})^2} + \sqrt{(x_{i+1,j+1} - x_{i,j+1})^2 + (y_{i+1,j+1} - y_{i,j+1})^2}}{\sqrt{(x_{i,j+1} - x_{i,j})^2 + (y_{i,j+1} - y_{i,j})^2} + \sqrt{(x_{i+1,j+1} - x_{i+1,j})^2 + (y_{i+1,j+1} - y_{i+1,j})^2}}.$$

Невідому витрату Q у процесі ітераційних наближень знаходитимемо за формулою [3]:

$$Q = \Delta_\phi \cdot (n+1) / \gamma. \quad (12)$$

Різницеві аналоги рівнянь Лапласа $\Delta x = 0$, $\Delta y = 0$ у сітковій області G_ω^γ , запишемо за різнице-вими схемами [5]:

$$\mathcal{L}_\gamma x_{i,j} = 0, \quad \mathcal{L}_\gamma y_{i,j} = 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

$$\text{де } \mathcal{L}_\gamma x_{i,j} = x_{i+1,j} - 2(1 + \gamma^2)x_{i,j} + x_{i-1,j} + \gamma^2(x_{i,j+1} + x_{i,j-1}),$$

розв'язки яких у процесі ітерацій знаходимо за формулами сумарних зображень [1, 3–6]:

$$x_{i,j} = \sum_{k=1}^n p_{j,k} \left(\mu_k^i a_k + \nu_k^i b_k + \gamma^2 \sum_{t=1}^m \frac{\nu_k^{|i-t|}}{\mu_k - \nu_k} (p_{1,k} x_{t,0} + p_{n,k} x_{t,n+1}) \right)$$

$$y_{i,j} = \sum_{k=1}^n p_{j,k} \left(\mu_k^i c_k + v_k^i d_k + \gamma^2 \sum_{t=1}^m \frac{v_k^{|i-t|}}{\mu_k - v_k} (p_{1,k} y_{t,0} + p_{n,k} y_{t,n+1}) \right) \quad (13)$$

$$i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

де $x_{i,j} = x(\varphi_i, \psi_j)$, $y_{i,j} = y(\varphi_i, \psi_j)$, елементи матриці P -трансформацій $P = [p_{j,k}]_{j,k=1}^n$ обчислюються як $p_{j,k} = \frac{2}{\sqrt{2n+1}} \sin \frac{jk\pi}{n+1}$, елементи діагональних матриць $\mu^i = [\mu_k^i]_{k=1}^n$, $v^i = [v_k^i]_{k=1}^n$ визначаються за формулами

$$\mu_k = \eta_k + \sqrt{\eta_k^2 - 1},$$

$v_k = \eta_k - \sqrt{\eta_k^2 - 1}$, $\eta_k = 1 + \gamma^2 \left(1 - \cos \frac{k\pi}{n+1} \right)$, а довільні сталі a_k, b_k, c_k, d_k знаходяться із умов на ділянках AB і CD межі області.

Алгоритм числового розв'язування задачі будується на основі ідей методу блочної ітерації шляхом поетапної параметризації величини конформного інваріанту відображення, шуканих координат граничних та внутрішніх вузлів динамічної сітки. У результаті розв'язання задачі знаходиться значення повної фільтраційної витрати Q та значення шуканих функцій x і y (координат вузлів побудованої в області фільтрації динамічної сітки).

Задавши кількість $m \times n$ вузлів розбиття сіткової області G_ω^γ , параметр ε , що характеризує точність наближення розв'язку відповідної різницевої задачі, бажаний рівень конформності відображення δ_* , нульове наближення невідомої величини γ (або шуканої витрати Q), початкові значення функцій x і y у граничних вузлах сіткової області G_ω^γ (початкові наближення координат граничних вузлів динамічної сітки G_z^γ) з урахуванням крайових умов (7) (у випадку 1) чи (9) (у випадку 2) та обчисливши методом сумарних зображень (13) відповідні початкові значення функцій x і y у внутрішніх вузлах сіткової області G_ω^γ (початкові наближення координат внутрішніх вузлів динамічної сітки G_z^γ), знаходимо за формулами (11), (12) початкові наближення конформного інваріанту γ і повної витрати Q . Далі, уточнюємо значення функцій x і y у граничних вузлах (координати граничних вузлів динамічної сітки) за формулами (7), (8) чи (9)–(10) відповідно, вважаючи фіксованими два навколишні та відповідні приграничні вузли [3]. Нове наближення значень функцій x і y у внутрішніх вузлах (координат внутрішніх вузлів) знову проводимо за формулами сумарних зображень (13), які, на відміну від сіткових ітераційних методів, дозволяють відразу (за один крок без організації внутрішнього ітераційного процесу) отримати прийнятний розв'язок. Після цього, знову уточнюємо γ та Q за формулами (11) і (12).

Наприкінці кожної ітерації перевіряємо виконання умов стабілізації координат граничних вузлів динамічної сітки [3]. Визначаємо величину зміщення вузлів на межі за проведену k -ту ітерацію [3]; якщо вона більша за ε , то переходимо до подальшого уточнення вузлів. У протилежному випадку зупиняємо ітераційний процес і оцінюємо ступінь конформності δ [3] отриманого відображення області комплексного потенціалу на фізичну область. Якщо $\delta \leq \delta_*$, то вважаємо, що задача розв'язана із необхідною точністю, інакше, збільшуємо кількість вузлів розбиття області чи змінюємо співвідношення між m і n (значення параметрів m і n доцільно задавати так, щоб виконувалася умова $\gamma \approx 1$, що з геометричної точки зору є умовою близькості сітки до квадратної) та повторно виконуємо кроки алгоритму.

Числові розрахунки, проведені для криволінійних областей різної конфігурації, зокрема з особливостями (негладкими ділянками межі, що може задаватися декількома аналітичними співвідношен-

нями та містити «зломи» під різними кутами, ділянками порушення конформності відображення то-що) та при різній дискретизації підтверджують, що запропонована обчислювальна схема є швидкозбіжною і економною стосовно використовуваних комп'ютерних ресурсів [3].

На рис. 2а наведена розрахована динамічна сітка, на рис. 2б – поверхня значень нев'язок конформності для області $G_z^{(1)}$, що обмежена кривими:

$$AA_0 = \{z: x = \sin(y + a) - 10, -a \leq y \leq 4, a = 3 + 0.05(8 + \sin \pi(\sin 2 - 3))^2\},$$

$$A_0B = \{z: x = 0.021(y - 4)^3 + y + \sin(4 + a) - 14, 4 \leq y \leq 10\},$$

$$BC = \{z: 0 \leq x \leq 10, y = -5 \sin 0.2x + 10\},$$

$$CC_0 = \{z: x = \sin 0.2\pi(y + b) + 10, -b \leq y \leq -5, b = 5 \sin 2 - 10\},$$

$$C_0D = \{z: 2 \leq x \leq c, y = -0.05(x - c)^2 - 5, c = \sin \pi(\sin 2 - 3) + 10\},$$

$$AD = \{z: -10 \leq x \leq 2, y = -\sin 0.25\pi x - a - 1\}.$$

При розбитті області 80×80 отримані значення $Q = 1.03043$, $\delta = 0.07605$ (тут і надалі, $\varphi_* = 0$, $\varphi^* = 1$, $\varepsilon = 10^{-6}$). Як бачимо, не зважаючи на «значну криволінійність» цієї області, найбільші «порушення» конформності відображення спостерігаються лише в околах особливих точок.

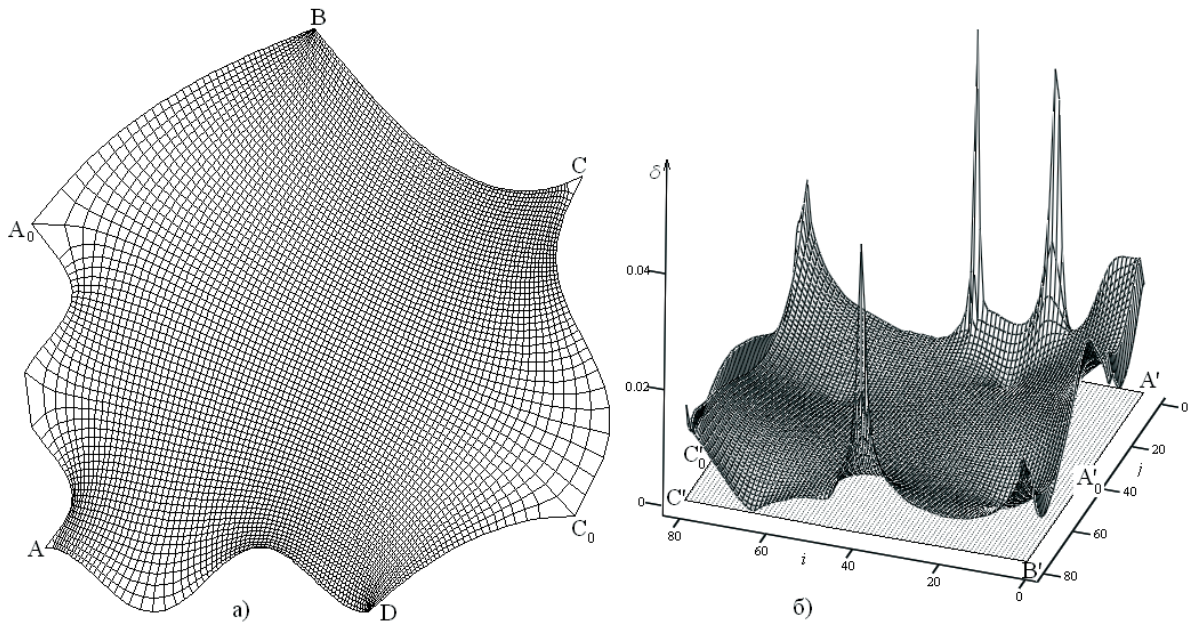


Рис. 2. Динамічна сітка в області $G_z^{(1)}$ (а) і поверхня значень нев'язок конформності відносно відповідної області комплексного потенціалу (б)

Область $G_z^{(2)}$ (рис. 3, а) обмежена колами з радіусами 1 і 35 відповідно, внутрішнє коло має зміщений центр на 10 по осях $0x$ і $0y$. За $k = 196$ ітерацій при розбитті області 50×80 отримано значення $Q = 1.54383$ і $\delta = 0.07467$. Розраховані результати для області $G_z^{(3)}$ (рис. 3 б), що обмежена лініями

$$L_* = \{x + iy: x = 0.095 \cos \tau - 0.1, y = 0.095 \sin \tau + 0.15, 0 \leq \tau < 2\pi\},$$

$$L^* = \{x + iy: +0.1 \cos 3\tau, y = 1.5 \sin \tau - 0.1 \sin 3\tau, 0 \leq \tau < 2\pi\},$$

при $m \times n = 50 \times 70$, становлять: $k = 193$, $Q = 2.02231$, $\delta = 0.00667$.

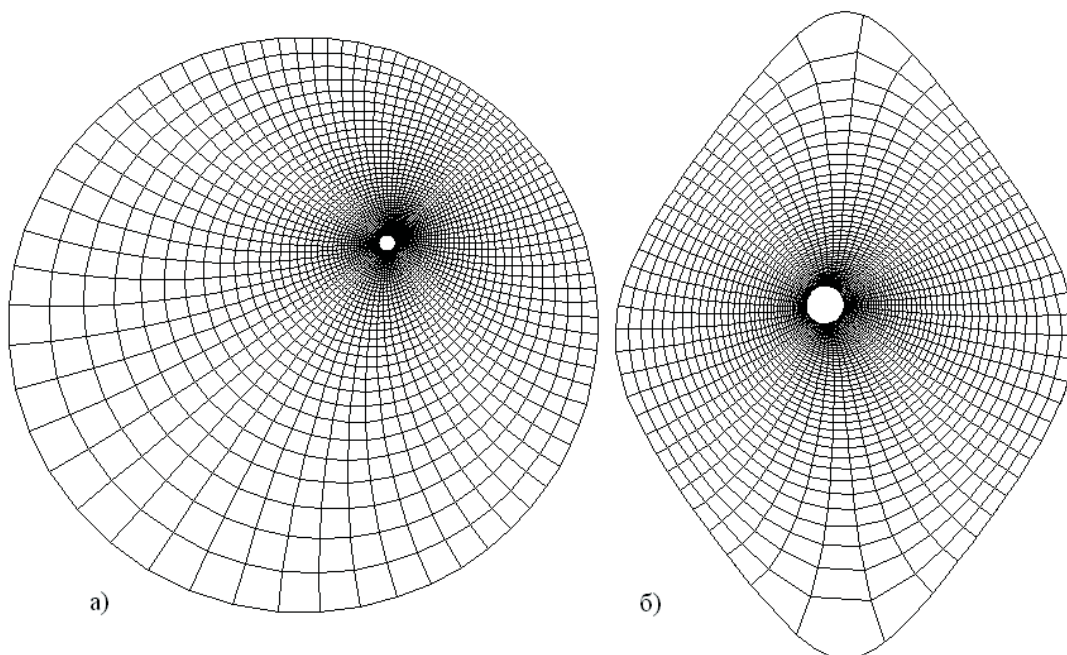


Рис. 3. Динамічні сітки в областях $G_z^{(2)}$ (а) і $G_z^{(3)}$ (б)

Таким чином, на основі синтезу числових методів сумарних зображень та конформних відображень розроблено методику моделювання ідеальних полів для криволінійних LEF-областей, а також створено обчислювальну технологію розв'язування відповідних нелінійних крайових задач для систем еліптичних диференціальних рівнянь. Використання методу сумарних зображень як компоненти розробленої раніше методики на основі комплексного аналізу дає можливість у комплексі (сумарно) на кожному ітераційному кроці враховувати вплив граничних та навколишніх внутрішніх вузлів, котрі в свою чергу «підправляються» на наступному ітераційному кроці за допомогою так званих умов ортогональності [12], які є наслідками умов Коші-Рімана і, отже, пришвидшує досягнення спряженості шуканих гармонічних функцій.

Список використаних джерел

1. Бомба А. Я. Обчислювальні технології на основі методів комплексного аналізу та сумарних зображень : монографія / А. Я. Бомба, О. М. Гладка, А. П. Кузьменко. — Рівне : ТЗОВ Ассоль, 2016. — 283 с.
2. Бомба А. Я. Синтез числових методів квазіконформних відображень, сумарних зображень та декомпозиції області для розв'язання нелінійних крайових задач у шаруватих середовищах / А. Я. Бомба, О. М. Гладка // Журнал обчислювальної та прикладної математики. — 2013. — № 1 (111). — С. 35—45.
3. Бомба А. Я. Синтез числових методів конформних відображень та сумарних зображень при моделюванні ідеальних полів для криволінійних областей / А. Я. Бомба, А. П. Кузьменко, О. М. Гладка // Вісник Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Серія: фіз.-мат. науки. — 2012. — № 2. — С. 87—94.
4. Гладка О. М. Про розв'язок крайової задачі для рівняння дивергентного типу у нескінченній багатошаровій смузі / О. М. Гладка, А. П. Кузьменко // Інтегральні перетворення та їх застосування до крайових задач : Зб. наук. праць. — К. : Ін-т математики НАН України, 1995. — Вип. 9. — С. 168—173.
5. Ляшко И. И. Численно-аналитическое решение краевых задач теории фильтрации / И. И. Ляшко, И. М. Великоиваненко. — К. : Наукова думка, 1973. — 264 с.
6. Положий Г. М. Численные решения двумерных и трехмерных краевых задач математической физики и функции дискретного аргумента / Г. М. Положий. — К. : Изд-во КГУ, 1962. — 161 с.
7. Bomba A. The syntheses of numerical methods of complex analysis and numerical-analytical representations for solving of a class of nonlinear boundary value problems in curvilinear domains / A. Bomba, O. Hladka. // Zeszyty Naukowe WSinf (Polska, Łódź). — 2014. — Vol. 13, Nr 1. — С. 120—131.
8. Hladka O. The complex analysis method of numerical identification of parameters of quasiideals processes in doubly-connected nonlinear-layered curvilinear domains / O. Hladka, A. Bomba // Journal of Mathematics and System Science (USA). — 2014. — Vol. 4, № 7 (Ser. No. 29). — P. 514—521.

SYNTHESIS OF METHODS OF CONFORMAL MAPPINGS AND SUMMARY REPRESENTATIONS AT THE MODELLING OF FILTRATION PROCESSES IN LEF-LAYERS

The method for modelling of the nonlinear quasiideal filtration processes in the curvilinear porous LEF-layers bounded by lines of flow and equipotential lines was developed. In the approach we put the idea of synthesis of numerical methods of conformal mappings and summary representations. We have developed the algorithm for solving the corresponding boundary value problems that automatically solves the problem of choice of units the computational grids, the construction of a dynamic grid, calculating the total filtration flow, and are the basis for the calculation of the velocity field and other characteristics.

Key words: nonlinear models, numerical method of conformal mappings, summary representations method, dynamic grid, LEF-layer.

Елена ГЛАДКАЯ, Ярослав БАБИЧ, Владимир ГОЧ
г. Ровно

СИНТЕЗ МЕТОДОВ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ И СУММАРНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В LEF-ПЛАСТАХ

Разработана методика моделирования нелинейных квазиидеальных фильтрационных процессов в криволинейных пористых LEF-пластах, ограниченных линиями тока и эквипотенциальными линиями. В основу подхода положена идея синтеза численных методов конформных отображений и суммарных представлений. Разработан алгоритм решения соответствующих краевых задач, который автоматически решает проблему выбора узлов расчетной сетки и построения динамической сетки, вычисления полного фильтрационного расхода, и является основой для расчета поля скорости и других характеристик.

Ключевые слова: нелинейные модели, численный метод конформных отображений, метод суммарных представлений, динамическая сетка, LEF-пласт.

Стаття надійшла до редколегії 18.02.2016

УДК 004.738.52

В'ячеслав ЗОСИМОВ, Дар'я ГОРИШНЯ

м. Миколаїв

zosimovvv@bk.ru, dasha_gorishnya@mail.ua

АЛЬТЕРНАТИВНІ ВИДИ ПОШУКУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ІНТЕРНЕТІ

У статті проведено аналіз видів пошуку інформації в Інтернеті, зокрема науково-технічної. Розглядаються та порівнюються найбільш оптимальні інформаційні системи та каталоги сайтів, до яких можна звертатися за пошуком. Окреслені основні критерії веб-сторінок, призначених для наукових цілей, досліджень, обміну інформацією та досвідом. Зазначено про актуальність описів наукових експериментів у вигляді блогів, що дозволяє, зафіксувавши хронологію, умови і деталі їх проведення, вирішувати проблеми авторських прав і відкритої експертизи наукових результатів. Зроблено акцент на перевагах Інтернет простору в науковій діяльності та можливості його ефективного використання.

Ключові слова: пошукові системи, Інтернет, каталог сайтів, публікації, форум, користувачі, блог.

Зі стрімким розвитком інноваційних комп'ютерних технологій та інформаційних ідей, Інтернет стає для нас високоспеціальним інструментом. Адже сьогодні Всесвітня павутина є невід'ємною частиною повсякденного життя людей в будь-якій сфері діяльності та в будь-якій країні нашої планети. Вільний потік інформації дозволяє людям самостійно мислити і розвивати власні ідеї.

Але варто звернути увагу й на те, що Інтернет переповнений великою кількістю «непотрібної інформації». Практика показує, що зараз ефективно і правильно використовувати пошукові системи вміють не більше 3% осіб. В основному люди занадто покладаються на їх, ні в якому разі недосконалі, можливості і в результаті на запит з 1–2 слів отримують абсолютно не потрібну для себе інформацію [1].

Що ж стосується наукового інформаційного простору, значна частина якого формується в Інтернет, то в ньому генеруються численні інформаційні ресурси, що розрізняються за найрізноманітнішими параметрами. Ці ресурси недостатньо структуровані і систематизовані. При створенні їх описів недостатня увага приділяється питанням інтероперабельності, слабо застосовуються угоди по стандартизації електронного подання інформаційних ресурсів, способи, що підтримують інтеграцію інформаційних ресурсів, підвищення якості пошуку. В результаті користувач не може отримати повну і достовірну інформацію про ресурси, що представляють для нього інтерес.

При вирішенні будь-яких завдань пошуку, відбору інформації з великих інформаційних масивів виникає необхідність уникнути суцільного перегляду і аналізу всієї наявної інформації. Набагато краще отримати компактно записані стандартизовані дані, які становлять інтерес в аспектах, що розглядаються в інформаційних об'єктах.

На сьогоднішній день пошукових машин існує декілька десятків. Найпопулярнішими для пошуку російською мовою є Яндекс і Google. Українську мову підтримують всі російськомовні системи. Крім того існує українська пошукова система МЕТА, але база її трохи обмежена. Для пошуку на іноземних мовах використовують Google (більше 30-ти мов), який має зручну настройку, де можна задати: «Шукати сторінки тільки такими мовами». Іноді для пошуку науково-технічної інформації потрібно буде використовувати декілька пошукових машин (так званий метапошук) задля перевірки достовірності знайденого матеріалу.

Крім названих загальновідомих систем слід відзначити численну кількість регіональних Інтернет-довідників, каталогів та пошукових систем, що мають в складі ресурсів, інформацію по науці і техніці.

Пошукові машини розрізняються не тільки підтримуваними мовами. Різниця в способах індексування дає різні результати при пошуку. Так, наприклад, по одному і тому ж запиту «Яндекс» видає результат – 160634 сторінок, Google – 56890 сторінок, Апорт – 6824, Рамблер – 320169 [2].

Пошукова система Яндекс в даний час індексує більше мільйона російських і зарубіжних російськомовних серверів. Вона має розгорнуту систему формування запиту, зокрема, допускається введення пошукового розпорядження на природній мові – в цьому випадку всі необхідні розширення здійснюються автоматично. Більш детальний запит може бути складений за допомогою режиму «Розширений пошук», в якому застосовується система багатоступеневого меню. Користувачеві надається можливість задати різні умови відповідності слів, що цікавлять його, та подання знайденої інформації. Користувач може задати умови розташування шуканих слів щодо один одного, а саме: слова повинні розташовуватися або поспіль, або в одному реченні, або не дуже далеко, або на одній сторінці. Шукані слова можуть бути де завгодно в тексті документу, або в його заголовку, або в тексті посилання. Можна задавати обмеження / уточнення по мові документу, його дату, формат представлення даних і ряд додаткових умов.

Каталог Яндекса містить більше 15 предметних рубрик, серед яких була рубрика «Наука і освіта». Користувач може обмежити область пошуку, використовуючи крім предметних рубрик рубрики «Регіони», «Довідки» і «Типи сайтів». У підрубриці «Наука» представлені наступні групи сайтів: гуманітарні науки, природні науки, технічні науки, конференції та семінари, наукова періодика, науково-популярні журнали, універсальне.

Аналіз інформації, що видається системою на кожному з рівнів каталогу, показує, що розділ «Наука» в Яндексі добре структурований, є поділ на гуманітарні, природничі та технічні науки. Рубрика «Природничі науки» містить в якості наступного рівня їх перелік. У більшості випадків на цьому рівні також існує можливість уточнити запит і вийти на велику кількість сайтів.

Пошукова система Rambler є першою російською професійною пошуковою системою, що діє з 1996 року.

Нова версія пошукової машини відрізняється значно збільшеною швидкістю пошуку; а також тим, що, завдяки новій архітектурі системи, оновлення пошукового індексу відбувається кілька разів

на день. Крім того, користувачам пошукової системи Rambler надано новий механізм асоціацій. Навбравши в пошуковому рядку потрібне слово, слід клікнути на вікно «знайти», після чого відкривається сторінка, в якій знайдені документи розташовані в порядку убудвання відповідності запиту. На цій же сторінці в самому низу є рядок «У нас також шукають». У ній наведено кілька слів і словосполучень, тематично (асоціативно) пов'язаних з вихідним запитом користувача. Для складання складних запитів користувач може використовувати режим «Детальний запит», який надає широкі можливості для складання пошукового розпорядження за допомогою пунктів меню.

У каталозі є рубрика «Наука і техніка», підрубриками якої названі «Наука», «Освіта», «Техніка», «Електроніка». Звернення до підрубрики «Наука» проводить відбір сайтів, віднесених до неї; на день аналізу підрубрика містила понад 500 сайтів. Віднесені до цієї рубрики сайти дуже різні не тільки по галузях науки, а й по самому науковому статусу.

Система Google представляє собою локалізований варіант глобальної пошукової системи. Режим «розширеного пошуку» надає користувачеві при складанні пошукового розпорядження форму, в якій можна задати умови пошуку, використовуючи різні типи метаданих (тема, автор, мову, дата, ідентифікатор повідомлення, вільні або задані послідовності слів і т.д.), що сприяє підвищенню точності пошуку. Google є кращою пошуковою системою для пошуку ілюстрацій.

Система «Апорт!», розроблена в другій половині 1990-х років, до теперішнього часу, можливо, дещо застаріла, однак зберігають цінність деякі характеристики, в числі яких підсистема видачі результатів: шукані слова показуються в контексті документу, що дозволяє відразу ж визначити ступінь відповідності джерела інтересу користувача. Система здійснює інформаційний пошук з урахуванням морфології. Каталог системи, особливо в його частині «Наука і освіта», на наш погляд, добре структурований, і пошук у ній може бути корисний науковцям і фахівцям. Проведений нами пошук по каталогу «Апорт» з використанням рубрики «Науково-технічна інформація» дав точніший результат у порівнянні з пошуком засобами системи «Яндекс».

Система Mail.Ru – пошукова система, що не індексує інформаційні ресурси в Інтернет самостійно, а купує результати індексування на стороні. Каталог системи містить рубрику «Наука і освіта», звернення до неї переводить користувача до наступного рівня, в якому є можливість виділити природні і громадські науки, проте в ньому відсутні технічні науки, і взагалі цей каталог значно програє в порівнянні з можливостями каталогу системи «Апорт!». При цьому лексичний пошук засобами Мейл забезпечує досить високі результати.

Якщо інформація потрібно виключно українською мовою, то існують українські каталоги. Наведемо приклади найпопулярніших:

<http://www.dmoz.org/World/Ukrainian/> – відкритий каталог сайтів (DMOZ)

<http://zakladka.org.ua/> – мабуть один з найкращих українських каталогів <http://white-catalog.in.ua/> – білий каталог українських сайтів <http://catalog.club.co.ua/> – каталог web-ресурсів <http://www.ukrkatalog.info/> – безкоштовний каталог сайтів з простою і швидкою реєстрацією.

Каталог «Закладка», що знаходиться за адресою <http://zakladka.org.ua/> – один з найкраще структурованих інтернет-каталогів. В каталогу є 5182 сайтів, що розташовані на 1037 сторінках. Розділ «Освіта, наука і техніка» містить понад 522 сайтів серед яких можна звернутися за пошуком потрібної науково-технічної інформації.

Український каталог сайтів – УкрКаталог, що знаходиться на за адресою <http://ukrkatalog.info/> є безкоштовним каталогом сайтів з прямими посиланнями, має просту і швидку реєстрацію. Містить близько 24 сторінок розділених за категоріями. Розділ «освіта, наука і техніка» має близько 20-ти посилань на сайти з публікаціями статей, новинами, дослідженнями та відкриттями в даній галузі. Каталог зручний у використанні і насичений інформацією.

Білий каталог – це каталог виключно українських сайтів, категорії розподілені в алфавітному порядку. Інтернет-каталог користується популярністю і щоденно поповнюється. Статистика каталогу на сьогодні: сайтів – 1554, категорій – 292, вихідних хітів – 165057

У даний час в мережі Інтернет є велика кількість сайтів (і порталів), що містять Web-сервіси для проведення фундаментальних наукових досліджень. Це перш за все, сайти наукових видавництв; сайти наукових бібліотек; сайти наукових товариств і організацій, що представляють інформацію про свою наукову діяльність; сайти (покажчики, каталоги, пошукові машини), що допомагають науковій

громадськості знайти необхідні інформаційні ресурси і Web-сервіси. Так на що потрібно звернути увагу, щоб швидко зайти сайт з потрібною науково-технічною інформацією?

Сайти, призначені для наукових цілей, характеризуються широким спектром різноманітності, проте визначити склад типового сайту можна. Він, скоріше за все, буде включати наступні основні розділи:

НОВИНИ та ОГОЛОШЕННЯ;

БАЗИ ДАНИХ (наприклад, база даних, що містить основні результати досліджень; бібліографічна або повнотекстова база даних по публікаціям і підручниками в даній області наукових досліджень);

ФОРУМ для організації і проведення тематичних електронних конференцій;

НОВІ ЕЛЕКТРОННІ ПУБЛІКАЦІЇ для розміщення електронних матеріалів за результатами нових досліджень (даний розділ може формуватися на основі вільного доступу);

ПОСИЛАННЯ на інформаційні ресурси та Web-сервіси по розглянутій науковій дисципліні.

Крім того, типовий сайт з фундаментальної наукової дисципліни може включати і додаткові розділи:

ПОШУК по тематиці (пошуковий запит і результати пошуку в вигляді посилань на ресурси можуть надходити по e-mail);

ПЕРЕДПЛАТА і РОЗСИЛКА ПОВІДОМЛЕНЬ (наприклад, під час вступу нових електронних публікацій);

ЕНЦИКЛОПЕДІЇ, ЕЛЕКТРОННІ ДОВІДНИКИ і СЛОВНИКИ по тематиці.

Відзначимо, що назви розділів і доступних на сайті сервісів цілком логічно розглядати як спеціальні метадані, що характеризують зміст і функціональні можливості пов'язаних з цим сайтом інформаційних ресурсів.

Структура даних наукової інформації також відрізняється різноманітністю: крім звичайних текстів, активно створюється і поширюється наукова інформація у вигляді графіки, ГІС, анімації, 3D-уявлень, аудіо, різних інтерактивних систем та ін.

У даний час в дослідну експлуатацію запущений бібліографічний каталог БІТ (Бібліографія з Інформаційних Технологій) наукових публікацій з індексами цитування, орієнтований на російськомовну наукову періодику. Передбачається, що на основі даного сервісу можна визначити найбільш авторитетні публікації по обчислювальним та інформаційним технологіям. Даний Web-сервіс знаходиться у вільному доступі за адресою <http://bit.csu.ac.ru>.

Останнім часом стрімко зростає популярність такого простого Web-сервісу, як ведення блогів, персональних нотаток, які публікуються у відкритому доступі. Оскільки замітки розташовуються в хронологічному порядку, блоги часто називають мережевими щоденниками. В основі блогу, як правило, лежить програмний механізм, що дозволяє автору легко додавати нові замітки, а читачам брати участь у їх обговоренні. Описи наукових експериментів у вигляді блогів дозволяє, зафіксувавши хронологію, умови і деталі їх проведення, вирішувати проблеми авторських прав і відкритої експертизи наукових результатів. Прикладом відкритих блогів, де можуть вести свої замітки всі бажаючі, є <http://www.blogger.ru>.

Простоту і швидкість отримання необхідної інформації через Всесвітню інформаційну систему Інтернет не можна порівняти ні з чим іншим. Сьогодні Інтернет – це глобальна мережа, яка змінила сприйняття джерел інформації, розширила можливості для доступу та обміну знаннями. Застосування можливостей Інтернету в науково-технічній діяльності дозволяє організувати ефективну модель розвитку, вдосконалення, обговорення тих чи інших наукових досліджень. А це у свою чергу забезпечує розвиток користувачів, вільне спілкування, обмін думками та досвідом, накопичення нового багажу умінь для продуктивної діяльності та удосконалення раніше набутих знань.

Отже, наведені в даній статті, приклади пошукових систем, Інтернет-каталогів, наукових веб-сторінок дають можливість говорити про переваги Всесвітньої мережі для наукової діяльності. А ефективне використання ресурсів є фундаментом для проведення досліджень та подальших наукових відкриттів.

Список використаних джерел

1. Режим доступу: <http://berezne.lib.rv.ua/kids/inter.html>.
2. Режим доступу: <http://lib.kherson.ua/ukr-link-help.htm>.
3. Режим доступу: <http://poschuk.blogspot.com/>.

4. Режим доступа: <http://bit.csu.ac.ru>.
5. Режим доступа: <http://ukrkatalog.info/>.
6. Режим доступа: <http://zakladka.org.ua/>.

Vyacheslav ZOSIMOV, Dar'ya GORISHNYA
Mykolayiv

ALTERNATIVE SEARCH TYPES OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION IN THE INTERNET

The article analyzes the types of search information online, including scientific and technical. Considered and compared the optimal information systems and directories sites for information search. The basic criteria for web pages designed for scientific purposes, research, information and experience exchange. Indicated description of the scientific experiments relevance in the form of blogging that allows fixing the chronology, the conditions and details of their implementation, to solve the problem of copyright and open examination of scientific results. Admitted the emphasis on Internet research activities and the possibility of its effective use.

Key words: Bots, Internet, directory of sites, publications, forums, Users, Blog.

Вячеслав ЗОСИМОВ, Дарья ГОРИШНЯЯ
г. Николаев

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ ПОИСКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕРНЕТЕ

В статье проведен анализ видов поиска информации в Интернете, в частности научно-технической. Рассматриваются и сравниваются наиболее оптимальные информационные системы и каталоги сайтов, к которым можно обращаться за поиском. Очерчены основные критерии веб-страниц, предназначенных для научных целей, исследований, обмена информацией и опытом. Отмечена актуальность описаний научных экспериментов в виде блогов, что позволяет, зафиксировав хронологию, условия и детали их проведения, решать проблемы авторских прав и открытой экспертизы научных результатов. Сделан акцент на преимуществах Интернет пространства в научной деятельности и возможности его эффективного использования.

Ключевые слова: поисковые системы, Интернет, каталог сайтов, публикации, форум, пользователи, блог.

Стаття надійшла до редколегії 23.02.2016

Игорь КОВАЛЕНКО

igor.kovalenko@nuos.edu.ua

Екатерина АНТИПОВА

rinaredka@gmail.com

Сергей БОРДУН

г. Николаев

ВЫБОР РЕШЕНИЙ НА МНОЖЕСТВЕ ЭКСПЕРТНЫХ СВИДЕТЕЛЬСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРАВИЛ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНФЛИКТОВ

В процессе проведения экспертизы между суждениями экспертов могут возникать конфликтные ситуации, когда оценки двух и более независимых экспертных групп не пересекаются. Цель работы – рассмотреть возможность применения правил перераспределения конфликтов для выбора решений в условиях наличия неопределенностей, которые порождаются противоречивыми экспертными оценками. В работе приведено содержание правила перераспределения конфликтов (PCR5), а также рассмотрен пример его практического применения. При использовании этого правила достигается наиболее точное и корректное перераспределение частичных конфликтных масс уверенности, однако значительно усложняются расчетные процедуры.

Ключевые слова: конфликтные свидетельства, комбинирование уверенностей, конъюнктивный консенсус, правила PCR.

При выборе альтернативных решений в условиях исследования слабоструктурированных и неструктурированных проблем широко применяются различные методы группового экспертного оценивания. При этом возникают задачи получения обобщенных экспертных оценок, которые могут быть положены в основу формирования рекомендаций для лица, принимающего решение (ЛПР). Однако, в процессе проведения экспертизы между суждениями экспертов могут возникать различные формы взаимодействия: они могут быть согласованными, совместимыми; могут произвольным образом объединяться и пересекаться; некоторые из оценок могут в значительной степени перекрываться и т.д. Особое место занимает ситуация, получившая название конфликтной, когда оценки двух и более независимых экспертных групп не пересекаются [5, 21]. Перечисленные факты несут в себе специфические неопределенности, которые невозможно промоделировать с использованием традиционных методов вероятностного вывода.

Для анализа таких неопределенностей в последние годы начинают широко применяться современные невероятностные методы, представленные теорией свидетельств (теория Демпстера-Шейфера) и ее модификация – теория правдоподобных и парадоксальных рассуждений (теория Дезера-Смарандаке) [2; 4; 7].

Базовым положением указанных теорий посвящен ряд работ [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7], в основе которых лежат процедуры построения правил комбинирования экспертных свидетельств (уверенностей).

При этом основной проблемой является обращение с конфликтами, под которыми понимаются ситуации, когда отдельные исходные фокальные элементы (выделенные подмножества или группы экспертных свидетельств) не пересекаются.

Главной причиной конфликтов между основными назначениями уверенностей является несогласованность отдельных групп экспертных свидетельств. К сожалению, ряд правил комбинирования уверенностей, основанных на конъюнктивном консенсусе, не учитывают степень пересечения исходных фокальных элементов [7, 179].

В работах [7, 57, 208; 8] даются сведения об отношении ряда методов комбинирования уверенностей к конфликтам. Так, например:

- правило комбинирования Демпстера вообще игнорирует комбинированные массы уверенностей для пустых пересечений исходных фокальных элементов, но использует эти массы уверенности в процессе нормирования результирующих масс уверенности для действенных фокальных элементов;

- свободное правило комбинирования Дезера-Смарандаке просто определяет комбинированные массы уверенности для всех возможных пересечений исходных фокальных элементов, не принимая во внимание природу этих пересечений;
- гибридное правило комбинирования Дезера-Смарандаке либо относит комбинированные конфликтные массы уверенности к различным видам незнания, либо перераспределяет их на действенные фокальные элементы.

Учет степени пересечения исходных фокальных элементов может быть осуществлен с помощью различных правил перераспределения конфликтов [3; 5; 7]: взвешенный оператор (ВО) [Weighted Operator (WO)], взвешенный усредненный оператор (ВУО) [Weighted Average Operator (WAO)], правила minC, PCR1, PCR2, PCR3, PCR4, PCR5 и др.

Цель работы – рассмотреть возможность применения правил перераспределения конфликтов для выбора решений в условиях наличия неопределенностей, которые порождаются противоречивыми экспертными свидетельствами (оценками).

Основная идея перечисленных правил заключается в перераспределении общей конфликтной массы уверенности между непустыми пересечениями исходных фокальных элементов. Каждое из правил включает выполнение следующей обобщенной последовательности процедур [7, 230]:

- расчет комбинированных масс уверенностей для непустых пересечений исходных фокальных элементов на основе конъюнктивного консенсуса;
- расчет комбинированных масс уверенности для непересекающихся фокальных элементов (частичные конфликты);
- пропорциональное перераспределение общей или частичных конфликтных масс на действенные фокальные элементы, являющиеся результатом непустых пересечений исходных фокальных элементов. Эта процедура выполняется специальным образом для каждого из правил PCR1-PCR5.

Наиболее мощным в плане точности результатов комбинирования уверенностей считается правило PCR5, поэтому приведем его содержание в соответствии с работой [7, 264–265].

Здесь предполагается, что имеется основа анализа, на которой выделены подмножества (фокальные элементы) X и Y . На основе двух групп свидетельств назначены основные массы уверенности этим подмножествам: $m_1(X)$, $m_2(X)$, $m_1(Y)$, $m_2(Y)$. Предполагается далее, что подмножества X и Y вовлечены в частичный конфликт, то есть $X \cap Y = \emptyset$. Конфликтная масса уверенности может быть рассчитана стандартным образом:

$$m(X \cap Y) = m_1(X) * m_2(Y) + m_2(X) * m_1(Y).$$

В основе правила PCR5 лежит перераспределение долей конфликтной массы уверенности $m(X \cap Y)$: $k_1 = m_1(X) * m_2(Y)$, $k_2 = m_2(X) * m_1(Y)$. Доля k_1 перераспределяется на подмножествах X и Y пропорционально значениям основных масс уверенности $m_1(X)$ и $m_2(Y)$, доля k_2 перераспределяется пропорционально значениям $m_2(X)$ и $m_1(Y)$.

Для случая двух групп свидетельств комбинированная масса уверенности по правилу PCR5 рассчитывается по выражению:

$$m_{PCR5}(X) = m(X) + \sum \left[\frac{m_1(X) * m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} + \frac{m_2(X) * m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right],$$

где $m(X)$ – комбинированная масса уверенности для подмножества X , рассчитанная на основе конъюнктивного консенсуса. Для иллюстрации практического применения правила PCR5 воспользуемся примером из работы [7, 265–267].

Пусть задана основа анализа $\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}$ и назначены следующие основные массы уверенности:

$$\begin{aligned} m_1(\omega_1) &= 0,4; & m_1(\omega_2) &= 0,4; & m_1(\omega_1 \cup \omega_2) &= 0,2; \\ m_2(\omega_1) &= 0,3; & m_2(\omega_2) &= 0,5; & m_2(\omega_1 \cup \omega_2) &= 0,2. \end{aligned}$$

Представим данные массы уверенности в виде следующих пересечений:

	ω_1	ω_2	$\omega_1 \cup \omega_2$
ω_1	ω_1	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap (\omega_1 \cup \omega_2)$
ω_2	$\omega_2 \cap \omega_1$	ω_2	$\omega_2 \cap (\omega_1 \cup \omega_2)$
$\omega_1 \cup \omega_2$	$(\omega_1 \cup \omega_2) \cap \omega_1$	$(\omega_1 \cup \omega_2) \cap \omega_2$	$(\omega_1 \cup \omega_2) \cap (\omega_1 \cup \omega_2)$

Проведя ряд преобразований:

$$\omega_1 \cap \omega_2 = \emptyset; \omega_2 \cap \omega_1 = \emptyset;$$

$\omega_1 \cap (\omega_1 \cup \omega_2) = \omega_1$; $\omega_2 \cap (\omega_1 \cup \omega_2) = \omega_2$, получим конечный результат пересечений фокальных элементов.

	ω_1	ω_2	$\omega_1 \cup \omega_2$
ω_1	ω_1	\emptyset	ω_1
ω_2	\emptyset	ω_2	ω_2
$\omega_1 \cup \omega_2$	ω_1	ω_2	$(\omega_1 \cup \omega_2) \cap (\omega_1 \cup \omega_2)$

Комбинируя стандартным образом основные массы уверенности для непустых пересечений исходных фокальных элементов, получим:

$$m(\omega_1) = m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1) + m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) + m_2(\omega_1) * m_1(\omega_1 \cup \omega_2) =$$

$$0,4 * 0,3 + 0,4 * 0,2 + 0,2 * 0,3 = 0,12 + 0,08 + 0,06 = 0,26;$$

$$m(\omega_2) = m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2) + m_1(\omega_2) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) + m_2(\omega_2) * m_1(\omega_1 \cup \omega_2) =$$

$$0,4 * 0,5 + 0,4 * 0,2 + 0,2 * 0,5 = 0,2 + 0,08 + 0,1 = 0,38;$$

$$m(\omega_1 \cup \omega_2) = m_1(\omega_1 \cup \omega_2) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) = 0,2 * 0,2 = 0,04.$$

В данном примере подмножества ω_1 и ω_2 вовлечены в конфликт, поэтому конфликтная масса уверенности рассчитывается следующим образом:

$$m(\omega_1 \cap \omega_2) = m_1(\omega_1) * m_2(\omega_2) + m_1(\omega_2) * m_2(\omega_1) = 0,4 * 0,5 + 0,4 * 0,3 = 0,32.$$

Для упрощения дальнейших расчетов вводятся следующие обозначения:

$$m'(\omega_1 \cap \omega_2) = m_1(\omega_1) * m_2(\omega_2) = 0,4 * 0,5 = 0,20;$$

$$m''(\omega_1 \cap \omega_2) = m_1(\omega_2) * m_2(\omega_1) = 0,4 * 0,3 = 0,12;$$

$$m'(\omega_1 \cap \omega_2) + m''(\omega_1 \cap \omega_2) = m(\omega_1 \cap \omega_2).$$

На этой основе можно перераспределить долю $m'(\omega_1 \cap \omega_2)$ конфликтной массы уверенности $m(\omega_1 \cap \omega_2)$. Согласно правилу PCR5 некоторая часть этой доли должна быть отдана подмножеству ω_1 (обозначим эту часть через α'). Другая часть этой доли должна быть отдана подмножеству ω_2 (обозначим эту часть через β'). Перераспределение доли конфликтной массы уверенности $m'(\omega_1 \cap \omega_2)$ на множества ω_1 и ω_2 должно быть произведено пропорционально основным массам уверенности $m_1(\omega_1)$ и $m_2(\omega_2)$. Исходя из этого, можно записать следующие соотношения:

$$\alpha' / m_1(\omega_1) = \beta' / m_2(\omega_2) = m'(\omega_1 \cap \omega_2) / (m_1(\omega_1) + m_2(\omega_2)).$$

Подставляя числовые значения, имеем:

$$\alpha' / 0,4 = \beta' / 0,5 = 0,20 / (0,4 + 0,5) \approx 0,222,$$

откуда $\alpha' = 0,0889$; $\beta' = 0,1111$.

Аналогическим образом перераспределим долю конфликтной массы уверенности $m''(\omega_1 \cap \omega_2)$. Обозначим через α'' часть этой доли, которая должна быть отдана подмножеству ω_1 , через β'' обозначим часть этой доли, которая должна быть отдана подмножеству ω_2 . Отсюда имеем следующие соотношения:

$$\alpha'' / m_2(\omega_1) = \beta'' / m_1(\omega_2) = m''(\omega_1 \cap \omega_2) / (m_1(\omega_2) + m_2(\omega_1)).$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\alpha'' / 0,3 = \beta'' / 0,4 = 0,12 / (0,4 + 0,3) \approx 0,1714,$$

отсюда $\alpha'' = 0,0514$; $\beta'' = 0,0686$.

Итоговые комбинированные массы уверенности для ω_1 и ω_2 , с учетом перераспределения между ними конфликтной массы уверенности, примут следующий вид:

$$m_{PCR5}(\omega_1) = m(\omega_1) + \alpha' + \alpha'' = 0,26 + 0,0889 + 0,0514 = 0,4003;$$

$$m_{PCR5}(\omega_2) = m(\omega_2) + \beta' + \beta'' = 0,38 + 0,1111 + 0,0686 = 0,5597;$$

$$m_{PCR5}(\omega_1 \cup \omega_2) = m(\omega_1 \cup \omega_2) = 0,4.$$

Изложенные рассуждения позволяют сделать вывод о том, что первоначальный уровень поддержки (уверенности) экспертов относительно значимости подмножеств ω_1 и ω_2 на полной основе анализа $\Omega(m(\omega_1) = 0,26$ и $m(\omega_2) = 0,38)$ в результате перераспределения конфликтов, не только сохранился, но стал еще более выраженным.

Следует отметить, что общим недостатком правила PCR5 является большой объем вычислений, особенно при большом числе групп свидетельств $m > 2$. Однако применение современных средств вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения делают такой недостаток не столь существенным.

Список использованной литературы

1. Beynon M. J. DS/AHP method; a mathematical analysis, including an understanding of uncertainty / M. J. Beynon // European Journal of Operational Research. — 2002. — vol. 140. — pp. 148—164.
2. Sentz K. Combination of evidence in Dempster-Shafer Theory [Virtual Resource] / Karl Sentz, Scott Ferson // Sandia National Laboratories. — 2002. — 96 p. — Access Mode: URL: prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2002/020835.pdf. — Title from Screen. — Date of Access: 29.02.2016.
3. Smarandache F. Proportional conflict redistribution rules for information fusion / Florentin Smarandache, Jean Dezert // American Research Press. — 2006. — Vol. 2. — PP. 61—103.
4. Smarandache F. Advances and applications of DSMT for information fusion / F. Smarandache, J. Dezert // Rehoboth: American Research Press. — 2006. — Vol. 1. — 461 p.
5. Smets Ph. Analyzing the combination of conflicting belief functions [Virtual Resource] / Philippe Smets // Universite' Libre de Bruxelles. — 2005. — 31 March. — 39 p. — Access Mode: URL: iridia.ulb.ac.be/~psmets/Combi_Confl.pdf. — Title from Screen. — Date of Access: 29.02.2016.
6. Zhang L. Advances in the Dempster-Shafer theory of evidence / Lianwen Zhang // John Wiley & Sons, Inc. — New York, 1994. — PP. 51—69.
7. Uzga-Rebrovs O. Nenoteiktiby parvaldisana / O. Uzga-Rebrovs. — Resekne: RA Izdevnieciba, 2010. — Vol. 3 — 560 pp.
8. Коваленко И. И. Экспертные технологии поддержки принятия решений : монография / И. И. Коваленко, А. В. Швед. — Николаев : Илион, 2013. — 216 с.

Igor KOVALENKO, Kateryna ANTIPOVA, Sergiy BORDUN
Mykolaiv

DECISION-MAKING BASED ON EXPERTS' EVIDENCE USING CONFLICT REDISTRIBUTION RULES

Conflicts may occur in the course of examination of experts' evidence when two or more independent sources of evidence are disjoint. The purpose of this work is to apply conflict redistribution rules for decision-making in conditions of uncertainty, generated by conflicting sources of evidence. The paper shows the body of proportional conflict redistribution rule (PCR5), and an example of its practical use. The idea of the rule is to

redistribute the partial conflicting mass proportionally on non-empty sets involved in the conflict. PCR5 is the most mathematically exact redistribution of conflicting mass to non-empty sets following the logic of the conjunctive rule. However, PCR5 consists of much more complicated calculation procedures.

Key words: conflicting evidence, combining beliefs, conjunctive consensus, PCR rules.

Ігор КОВАЛЕНКО, Катерина АНТИПОВА, Сергій БОРДУН
м. Миколаїв

ВИБІР РІШЕНЬ НА МНОЖИНІ ЕКСПЕРТНИХ СВІДОЦТВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПРАВИЛ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ КОНФЛІКТІВ

У процесі проведення експертизи між судженнями експертів можуть виникати конфліктні ситуації, коли оцінки двох і більше незалежних експертних груп не перетинаються. Мета роботи – розглянути можливість застосування правил перерозподілу конфліктів для вибору рішень в умовах наявності невизначеностей, які породжуються суперечливими експертними оцінками. У роботі наведено опис правила перерозподілу конфліктів (PCR5), а також розглянуто приклад його практичного застосування. Використання цього правила дозволяє отримати найбільш точний та коректний перерозподіл часткових конфліктних мас впевненості, однак значно ускладнює розрахункові процедури.

Ключові слова: конфліктні свідчення, комбінування переконань, кон'юнктивний консенсус, правила PCR.

Стаття надійшла до редколегії 04.03.2016

УДК 004.932.2:617.7–002

Віктор МЕЛЬНИК

mlnk47@mail.ru

Василь ЗІВЕНКО

vazivenko@mail.ru

Сергій ЛУКЬЯНЧИКОВ

Lsd57@ukr.net

м. Миколаїв

ГРАФІЧНА ОБРОБКА ФОТО-ЗОБРАЖЕННЯ РАЙДУЖНОЇ ОБОЛОНКИ ОКА

Дана робота є програмним забезпеченням для аналізу і обробки райдужної оболонки ока, реалізованим в середі програмування MS Visual Basic.

Результатом розробки є програмне забезпечення (ПЗ), яке дозволяє проводити різні операції над фото-зображенням та робити спеціальні підрахунки. ПЗ може зберігати усі результати в окремому інформаційному файлі для подальшого занесення у базу даних.

Ключові слова: аналіз фотозображення, комп'ютерна-іридодіагностика, іридоскоп, ідентифікація особи, фотокамера, програмування, обробка фотографічних знімків, райдужна оболонка ока.

Діагностика хвороб по райдужці ока має багату історію. Найдавніші зображення райдужки з указівкою зв'язків зон райдужки з органами людського тіла знайдені в печерах Малої Азії. Більше 3 тисяч років тому ескулапи Індії і Китаю особливе місце відводили діагностиці по змінах ока. Відомі описи райдужки, зроблені Гіппократом [1]. Сьогодні в Україні і за її межами іридодіагностикою займаються сотні учнів В.В.Кривенко. Групою авторів у складі В. В. Кривенко, Г. С. Лисовенко, Г. П. Потебні і Т. А. Сядро ще у 1991 році підготовлений до друку довідник по іридодіагностиці [3]. Ще наприкінці 80-х років були зроблені перші кроки у розробці українських комп'ютерних іридодіагностичних програм. У 1995–96 р. Т. А. Сядро виконувала роль експерта при розробці комп'ютерної іридодіагностичної програми ESID–2, а в 2000–2001 р., брала участь у розробці більш досконалої програми ESID–3 [4].

Разом з тим, аналіз світового досвіду показує, що можна використовувати для проведення іридодіагностики спеціальні інформаційно-довідкові або експертні системи [2]. За допомогою таких комп'ютерних іридодіагностичних систем високоякісний висновок може бути підготовлений медичним фахівцем середньої кваліфікації. А замість іридоскопа чи щілинної лампи можна використовувати навіть звичайну плівкову фотокамеру, фотографуючи райдужку ока в режимі макрозйомки.

Нарешті, з 2002 року, після появи цифрової фотокамери і комп'ютерної програми-фоторедактора GIDRA, стало можливим говорити про створення власного АРМ'у іридолога [5; 6]. Приведений приклад свідчить про те, що сучасний рівень розвитку інформаційних технологій зробив принципово можливим створення АРМ'у іридолога.

У Московському Державному центрі «Контакт» під науковим керівництвом Е. С. Вельховева розроблена система АІК–01, де зображення у комп'ютер потрапляють з застосуванням телевізійної відеокамери, після чого обробка зображень здійснюється за допомогою спеціальних програм (згодом була розроблена система АІК–02).

У 2001 році в Інтернеті з'явилася повідомлення про канадську комп'ютерну програму Bexel IRINA Version 2.0. Ця програма сертифікована в Кореї і, якщо вірити рекламній інформації, забезпечує 80 % вірогідність діагностики. Однак, при автоматичному аналізі кольорових зображень райдужки варто очікувати значного відсотка «браку» у вигляді невірних чи неточних висновків. Як наслідок, іридолог змушений буде уважно перевіряти всі автоматично зроблені висновки.

Діагностика за допомогою Internet з використанням можливостей віддаленого доступу до інформації в комп'ютерній іридодіагностиці – це перспективна задача. Найближчим часом можливе застосування в рамках локальних мереж.

Результатом розробки є комп'ютерна програма ShapeSelector, реалізованим в середовищі програмування MS Visual Basic, яка дозволяє проводити різні операції над фото-зображенням та робити спеціальні підрахунки.

Встановлено, що звичайна райдужна оболонка володіє майже двомастами різноманітними ознаками. Саме через це ідентифікація особи за її райдужною оболонкою все частіше використовується органами безпеки. Обробка зображення райдужної оболонки ока ґрунтується на візуалізації її особливих властивостей: борозенок, впадин, краплень, крапок та затемнених ділянок.

Методи швидкої оцінки стану організму людини по ознаках, які спостерігаються на райдужній оболонці ока зараз дуже актуальні. Популярність таких видів діагностики обумовлена наявністю істотних переваг:

- швидкість обстеження (10–20 хвилин);
- безболісність (що особливо важливо при обстеженні дітей);
- можливість виявлення захворювань на ранніх та доклінічних стадіях;
- безпека (організм пацієнта не піддається опроміненню або впливу електромагнітних полів);
- практично повна відсутність протипоказань.

Приведений перелік досить переконливий, аби рекомендувати використання методів аналізу райдужної оболонки ока не лише для профілактичних обстежень дорослого населення, але й для моніторингу стану здоров'я школярів.

В даний час в школах України методи діагностики райдужної оболонки ока застосовуються, але в обмежених масштабах. Пояснити це можна двома причинами. По-перше, для гарантовано високої якості діагностики фахівець повинен мати кваліфікацію лікаря-терапевта. Проте середні школи України можуть дозволити собі мати фахівців лише з середньою медичною освітою. По-друге, проведення такої діагностики зазвичай вимагає спеціального дорогого обладнання (іридоскоп або щілинна лампа), придбати яке не під силу більшості середніх шкіл України.

В той же час, аналіз світового досвіду показує, що вказані труднощі можна успішно здолати, якщо використовувати спеціальні інформаційно-довідкові або експертні системи. За допомогою таких комп'ютерних систем високоякісний висновок може бути підготовлений медичним фахівцем середньої кваліфікації, наявним майже в кожній середній школі України. А замість іридоскопа або щілинної лампи можна використовувати навіть звичайну фотокамеру, фотографуючи райдужну оболонку ока в режимі макрозйомки.

Для організації вводу/виводу графічної інформації та для реалізації графічних обчислень у даному ПЗ можна використовувати наступні функції для графічної підсистеми Visual Basic:

– QColor(color) As Long

Повертає значення кольору, заданого через вбудовані константи

color – значення системного кольору

– RGB(red, green, blue) As Long

Повертає значення кольору, заданого через значення каналів

red – червоний канал (від 0 до 255)

green – зелений канал (від 0 до 255)

blue – синій канал (від 0 до 255)

– object.Point(x, y) As Long

Повертає значення кольору пікселя з заданими координатами

x – горизонтальна координата, починаючи з лівого краю об'єкта object

y – вертикальна координата, починаючи з верхнього краю об'єкта object

– object.Line [Step] (x1, y1) [Step] - (x2, y2), [color], [B][F]

Зображує на екрані лінію або прямокутник з заданими параметрами.

(x 1, y 1) – координати початку лінії

(x 2, y 2) – координати кінця лінії

color – колір лінії

Необов'язковий параметр Step, робить координати відносними

Необов'язковий параметр B замість лінії зображує прямокутник з діагоналлю (x 1, y 1) – (x 2, y 2)

Необов'язковий параметр F у режимі креслення прямокутника робить його заповненим

– object.Circle [Step] (x, y), radius, [color, start, end, aspect]

Креслить круг або еліпс з заданими параметрами

(x, y) – координати центра

radius – значення радіуса

color – колір фігури

start, end – значення початкового та кінцевого кутів дуги

aspect – степінь відношення горизонтального радіусу до вертикального

Логіка роботи виділення типу «овал» та «кільце»

Даний тип виділення складається з двох кіл: зовнішнього та внутрішнього.

Задіяними пікселями будуть ті, координати яких знаходяться між ними. Піксель має входити в зовнішнє коло, але не входити у внутрішнє.

Функція кола, центр якого розташований у будь-якій точці (x 0, y 0), має вигляд:

$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$, де R – радіус кола.

Будь яка точка (x, y), яка задовольняє дане рівняння, лежить на колі радіуса R. Якщо функція приймає значення більше ніж R^2 , то точка лежить за межами кола, а якщо менше ніж R^2 , то в середині кола.

Логіка роботи виділення типу “сектор”

Даний тип виділення складається з двох кіл (зовнішнього та внутрішнього) та з 2 прямих, які і формують сектор.

Задіяними пікселями будуть ті пікселі, координати яких знаходяться між двома колами та над прямими.

Функція прямої, яка проходить через точку з координатами (x₁, y₁) та має кутовий коефіцієнт k, має вигляд:

$y = k * (x - x_1) + y_1$

Якщо значення цієї функції для координат пікселя, який перевіряється, більше, ніж значення цієї функції для граничної прямої, то піксель знаходиться над нею, а якщо менше, то під нею.

Логіка роботи виділення типу “залишок від сектору” відмінна від роботи виділення типу “сектор” тільки тим, що пікселі мають знаходитись під прямими.

Програма надає фахівцю усі необхідні інструменти на усіх етапах роботи.

Інструменти для виділення райдужної оболонки ока:

– виділення типу «овал»;

- виділення типу «кільце»;
- виділення типу «сектор»;
- виділення типу «залишок від сектору».

Програма також для кожного типу виділення має додаткові параметри:

- зміна зовнішнього горизонтального діаметру виділення;
- зміна зовнішнього вертикального діаметра виділення;
- зміна внутрішнього горизонтального діаметра виділення;
- зміна внутрішнього вертикального діаметра виділення;
- зміна координат центра зовнішньої частини;
- зміна координат центра внутрішньої частини;
- режим пропорційності розмірів.

Тестова версія програми також має можливість для типів «сектор» та «залишок від сектора» встановлювати величини кутів.

Додатково існує інструмент для заміру ділянок зображення.

Після обрання необхідного типу виділення, задання необхідних параметрів програмне забезпечення дозволяє скопіювати обраний фрагмент в окреме вікно для подальшого редагування.

В режимі обробки фрагменту зображення програмне забезпечення дозволяє:

- відображати пікселі обраного кольору;
- відображати пікселі, близькі за рівнем яскравості;
- встановлювати рівень схожості пікселів за яскравістю;
- рахувати кількість схожих пікселів;
- рахувати та відображати середній колір зображення.

Для збереження результатів проведених обчислень у текстовому файлі необхідно у формі редагування фрагменту натиснути кнопку «Зберегти результати».

Усі результати проведених розрахунків для кожного типу виділення заносяться у файл data.txt, який знаходиться у програмній директорії. Програмну директорію можна змінювати в налаштуваннях програми. Кожному рядку у текстовому файлі відповідає окремий тип виділення. В текстовому рядку через пробіл в строго визначеній послідовності записуються результати обчислень.

Список використаних джерел

1. Вельховер Е. С. Клиническая иридология / Е. С. Вельховер. — М. : Орбита, 1992. — 431 с.
2. Продеус А. Н. Экспертные системы в медицине: учебное пособие / А. Н. Продеус, Захрабова Е. Н. — К. : ТОО ВЕК+, 1998. — 326 с.
3. Кривенко В. В. Иридодиагностика: справочник / В. В. Кривенко, Г. С. Лисовенко, Г. П. Потення, Т. А. Сядро. — К. : Украинская Советская Энциклопедия имени М. П. Бажана, 1991. — 140 с.
4. Продеус А. Н. Особенности разработки программы ESID-3 для компьютерной иридодиагностики / А. Н. Продеус, Т. А. Сядро // Электроника и связь. — 2000. — № 9.
5. Продеус А. Н. АРМ школьного врача-иридолога / А. Н. Продеус, Т. А. Сядро, Ю. В. Шукевич // Труды международной дистанционной научно-практической конференции «Автоматизированное рабочее место врача». — Днепропетровск, 2002 г.
6. Продеус А. Н. Компьютерная иридодиагностика в контексте валеологизации школьного образования / А. Н. Продеус, Т. А. Сядро, Ю. В. Шукевич // Труды международного конгресса «Единый мир – здоровый человек». — Ялта, 2004 г.

Viktor MELNIK, Vasil ZIVENKO, Sergey LUKYANCHIKOV
Mykolaiv

GRAPHICS PROCESSING PHOTOGRAPHIC IMAGE IRIS

This work is a software for analysis and processing of the eye iris. It was developed in MS Visual Basic programming environment.

The result of this development is the software, which allows to execute different operations with photographs and make specific calculations. This software can save all the results in the single information file for its future use in the databases.

The developed software is ready for use by the specialists of the diagnostic of the eye iris.

Key words: analysis pictures, computer-iridology, irydoskop, identification, camera, programming, processing of photographic images, iris.

ГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ФОТО-ИЗОБРАЖЕНИЯ РАДУЖНОЙ ОБОЛОЧКИ ГЛАЗА

Данная работа является программным обеспечением для анализа и обработки радужной оболочки глаза, реализованным в среде программирования MS Visual Basic.

Результатом разработки является программное обеспечение (ПО), которое позволяет проводить различные операции над фото-изображением и делать специальные подсчеты. ПО может хранить все результаты в отдельном информационном файле для дальнейшего занесения в базу данных.

Ключевые слова: анализ фотоизображения, компьютерная-иридодиагностика, иридоскоп, идентификация личности, фотокамера, программирование, обработка фотографических снимков, радужная оболочка глаза.

Стаття надійшла до редколегії 01.03.2016

УДК 514.8

Всеволод МИХАЙЛЕНКО

г. Киев

Сергей УСТЕНКО

г. Николаев

ustenko.s.a@gmail.com

РОЛЬ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОМЕТРИИ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТУРБОМАШИН

Определяется роль прикладной геометрии в решении проблемы, связанной с повышением эффективности турбомашин, широко применяемых в транспортной энергетике, различных отраслях промышленности. Установление этапов решения задачи оптимизации геометрических параметров лопаточных аппаратов турбомашин (построение геометрических моделей, формирование целевой функции, оптимизация параметров), базирующаяся на газодинамическом расчете пространственного течения вязкого рабочего вещества.

Ключевые слова: прикладная геометрия, эффективные показатели, турбомашин, лопаточный аппарат, геометрические параметры.

Эффективность турбомашин (турбин и лопаточных компрессоров осевого, радиального, осерадиального и диагонального конструктивного оформления) в значительной мере обусловливается геометрическим совершенством лопаточных аппаратов их проточных частей. Поэтому представляется вполне целесообразным использовать достижения прикладной геометрии и компьютерной графики, особенно в части моделирования и визуализации плоских и пространственных обводов, при создании высокоэффективных лопаточных аппаратов турбомашин.

Отметим, что несмотря на успехи, достигнутые в последние годы в газотурбостроении в деле повышения КПД компрессоров и турбин газотурбинных двигателей, тем не менее существуют резервы дальнейшего повышения эффективных показателей газовых турбомашин, применяемых в транспортной и стационарной энергетике. Данное утверждение базируется на возможности использования успехов прикладной геометрии в плане моделирования кривых линий и поверхностей, которые могут применяться при формировании проточных частей компрессоров и турбин, а также вычислительной гидродинамики, более известной в литературе по ее аббревиатуре CFD, происходящей от английского выражения «computational fluid dynamics». Применительно к турбонасосам целесообразнее вместо термина гидродинамика использовать термин газодинамика, поскольку рабочее вещество в газотурбинных двигателях является сжимаемым, что существенно усложняет расчет распределения параметров потока вдоль тракта двигателя.

Появление CFD-программ, численно реализующих решение системы дифференциальных уравнений в частных производных, предложенных Навье-Стоксом для расчета трехмерного вязкого нестационарного течения рабочего вещества в любой области, в том числе в решетках турбомашин, значительно расширило возможности исследователей турбин и компрессоров и позволило ставить и решать задачи оптимизации геометрических параметров не только решеток профилей лопаток, но и их венцов. Разумеется, этому способствовали быстроразвивающиеся возможности вычислительной техники, что позволило проводить расчеты течения даже на персональных компьютерах.

Одним из таких CFD-продуктов является программный комплекс FlowVision российских разработчиков, обладающий рядом преимуществ по сравнению с аналогичными западными программами. Используя этот программный комплекс можно с достаточной для практики точностью рассчитывать параметры течения рабочего вещества в лопаточных аппаратах, определять потери энергии, обусловленные вязкостными эффектами, анализировать влияние геометрических параметров профилей лопаток на эффективность энергетических преобразований, происходящих в проточных частях турбомашин.

Объединение усилий прикладной геометрии и вычислительной газодинамики при создании турбин и компрессоров, несомненно, приведет к положительным результатам, поскольку позволит перейти к проектированию лопаточных аппаратов их проточных частей на базе оптимизации режимных и геометрических параметров.

Вопросам проектирования, исследования и совершенствования проточных частей лопаточных турбомашин посвящено достаточное количество публикаций как отечественных, так и зарубежных авторов [1–3 и др.]. Вместе с тем следует отметить, что основные работы по компрессорам и турбинам, в том числе и по их лопаточным аппаратам, выполняются специализированными научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями и результаты многих из этих работ является закрытыми. В литературе можно найти относительно несложные методики построения профилей плоских сечений лопаток и формирования на их основе поверхностей проточных частей, взаимодействующих с движущимся рабочим веществом – воздухом в компрессорах и продуктами сгорания жидкого или газообразного топлива в турбинах. Анализ литературных источников показал, что исследователи и проектанты турбомашин имеют определенные успехи в деле достижения достаточно высоких значений их эффективных показателей. Поэтому дальнейшие шаги в этом направлении требуют проведения широкого, более тщательного комплекса исследований, связанных с разработкой новых методов геометрического моделирования лопаточных аппаратов и профилей лопаток, применения современных достижений вычислительной газодинамики к изучению влияния различных факторов на эффективность профилей, межлопаточных каналов, решеток и ступеней, формируемых на их основе.

Целью настоящей статьи является определение роли прикладной геометрии в решении важной научно-технической и экономической проблемы, связанной с повышением эффективности турбомашин, широко применяемых в транспортной энергетике, различных отраслях промышленности; установление этапов решения задачи оптимизации геометрических параметров лопаточных аппаратов турбомашин (построение геометрических моделей, формирование целевой функции, оптимизация параметров), базирующаяся на газодинамическом расчете пространственного течения вязкого рабочего вещества. В некотором смысле процесс создания высокоэффективных проточных частей турбомашин можно считать итеративным, когда на каждом итерационном шаге осуществляется целенаправленное изменение значений геометрических параметров профилей лопаток и аэродинамических поверхностей, ограничивающих течение рабочего вещества. Направление движения в многомерном пространстве этих параметров обуславливается выбранным методом решения задачи оптимизации.

Развитие газотурбинных установок требует решения задач, связанных с дальнейшим повышением экономичности их турбин и компрессоров. Пути повышения эффективных показателей предложены в работе [4], где отмечено, что одним из основных резервов их повышения является проектирование проточных частей лопаточных машин с оптимальными значениями режимных и геометрических параметров.

Задача оптимизации параметров лопаточных аппаратов турбомашин разбивается на два этапа. На первом этапе поиск оптимальных геометрических и режимных параметров осуществляется с использованием упрощенной одномерной модели течения рабочего вещества в проточной части турбома-

шины. При этом используются экспериментальные данные по потерям энергии в неподвижных и вращающихся лопаточных венцах.

На втором этапе для нахождения оптимальных параметров применяется пространственная модель течения вязкого рабочего вещества, для чего создается трехмерная геометрическая модель проточной части турбомашин. В качестве целевой функции используются либо коэффициент потерь энергии, если рассматривается отдельная решетка профилей, либо КПД, если рассматривается ступень в целом. Поскольку расчет трехмерного течения требует больших затрат времени работы компьютера, то создать единый вычислительный процесс при решении оптимизационной задачи не представляется возможным. Поэтому реальная поверхность, описываемая целевой функцией в многомерном пространстве оптимизируемых параметров, заменяется полиномиальной моделью. Для минимизации затрат на определение коэффициентов этой модели можно воспользоваться трехуровневыми планами проведения, в данном случае численного, эксперимента, предложенными в работе [10]. Варьирование оптимизируемых параметров на трех уровнях, обозначаемых -1 , 0 и $+1$, позволяет в полиномиальной модели, кроме линейных, удерживать квадратичные и смешанные эффекты. Замена реальной гиперповерхности, описываемой целевой функцией, полиномиальной моделью второй степени вполне оправдана, поскольку зависимости коэффициентов потерь в решетках или КПД ступеней имеют polynomial характер. Расчеты показали, что полиномиальные модели адекватны изучаемым явлениям.

В свете изложенного решение задачи оптимизации параметров турбомашин на втором этапе может быть представлено в виде следующей последовательности действий:

- 1) определение геометрических параметров, подлежащих оптимизации, и разработка на их основе в соответствии с планом проведения численного эксперимента геометрических моделей областей для расчета в них трехмерного вязкого течения с помощью программного комплекса FlowVision. Для решетки профилей расчетная область представляет собой профиль лопатки, помещенный в пространство, ограниченное поверхностями, проходящими со стороны спинки и корытца профиля посередине межлопаточного канала. На входе и выходе из решетки добавляются участки течения, ограниченные плоскостями, наклоненными к фронту решетки под углами, определяемыми углами входа и выхода потока, соответственно. Протяженность этих областей принимается кратной шагу исследуемой решетки. По высоте расчетная область ограничена внешним и внутренним меридиональными обводами проточной части. Каждый из обводов наклонен под углом γ к горизонтальной плоскости;

- 2) поскольку программный комплекс FlowVision не имеет встроенного графического редактора, то подготовка всех вариантов расчетных областей решеток профилей осуществляется в среде автоматизированного проектирования SolidWorks. Информация по геометрии профилей и границ расчетных областей подготавливается специально разработанными программами, реализующими методы моделирования кривых по заданному закону изменения их кривизны (линейному, квадратичному, кубическому) применительно к построению обводов профилей лопаток турбомашин [8, 9]. Закон изменения кривизны вдоль дуги обвода определяется заданными условиями моделирования профиля лопатки турбомашин;

- 3) выполнение газодинамических расчетов пространственного течения рабочего вещества, расчет коэффициентов потерь энергии решетки профилей или КПД ступени с учетом изменения параметров потока по высоте лопатки, получение аналитической зависимости целевой функции на основе аппроксимации гиперповерхности полиномиальной моделью второго порядка;

- 4) нахождение экстремума целевой функции и сочетания параметров, соответствующих минимуму потерь или максимуму КПД. Для решения этой части задачи используется генетический алгоритм.

На рис. 1 (слева), показана расчетная область для определения потерь в осевой решетке профилей. В центре рисунка виден профиль лопатки, построенной по трем сечениям: корневому, среднему и периферийному. Три плоскости на этом рисунке демонстрируют тот факт, что в меридиональном сечении канал имеет некоторый угол раскрытия проточной части.

На рис. 1 (справа) показан вид в плане расчетной области. Сопловая лопатка первой ступени турбины имеет угол входа близкий к 90° и постоянный угол выхода потока. Цифрами в порядке возрастания обозначены (снизу-вверх) корневое, среднее и периферийное сечения лопатки, по которым формировались поверхности спинки и корытца, а также входной и выходной кромок. Методика по-

строения расчетной области решетки для проведения расчетов пространственного течения во FlowVision приведена в работе [7].

Для относительно длинных лопаток количество контрольных сечений увеличивают до 7–9, что приводит к усложнению построения геометрической модели рабочей части лопатки, поскольку профили лопаток следует разместить таким образом, чтобы поверхности спинки, корытца, входной и выходной кромок были плавными. Волнистость этих поверхностей недопустима. При этом из прочностных соображений профили по высоте лопатки размещают с некоторым навалом в сторону спинки, чем достигается разгрузка газодинамических нагрузок, обусловленных перепадом давлений на спинке и корытце лопатки, действием центробежной силы. Для этого предварительно определяются площади плоских фигур, ограниченных профилями лопатки, их моменты площади и инерции, координаты центров тяжести.

Как указывалось выше, полученная информация по геометрии лопатки используется в системе автоматизированного проектирования SolidWorks для получения твердотельной модели расчетной области, импортируемой затем программным комплексом FlowVision.

Газодинамический расчет вязкого пространственного течения рабочего вещества выполняется для модели полностью сжимаемой жидкости. Начальные значения температуры и давления принимаются из проектировочного расчета турбомшины и задаются во входном и выходном сечениях. Кроме этих, для рассматриваемого выше примера используются следующие граничные условия: «стенка» на лопатке и поверхностях, ограничивающих течение сверху и снизу, и «периодические» – для боковых поверхностей. На рис. 2 приведен пример разбивки расчетной области на ячейки. Для увеличения точности расчета количество ячеек можно увеличивать, ограничивающим фактором является объем оперативной памяти компьютера, измеряемой многими гигабайтами.

Для качественной оценки результатов расчета на рис. 3 приведена картина течения, полученная визуализацией векторов скорости течения методом вспрышек. На экране компьютера можно видеть частички, летящие с рассчитанной скоростью и оставляющие след соответствующей длины. Результаты, приведенные на рис. 3, полностью соответствуют характеру течения рабочей среды в канале проточной части турбины. Видно, что на спинке лопатки скорость заметно выше, нежели на корытце.

Программный комплекс FlowVision позволяет получать и количественные результаты в виде эпюр распределения скоростей, давлений, температур. После соответствующей обработки можно определить эффективные показатели решетки профилей или ступени в целом.

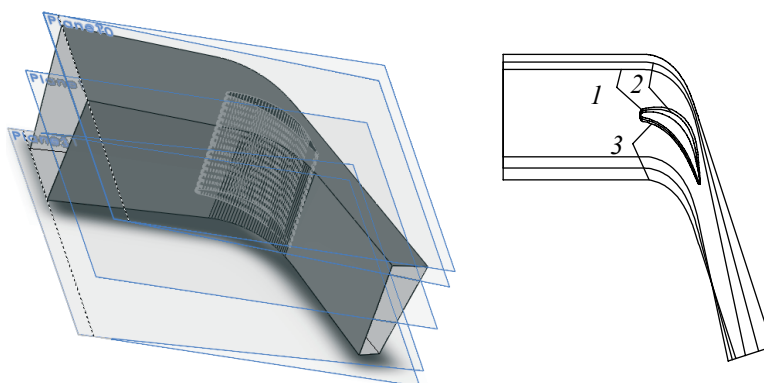


Рис. 1. Расчетная область

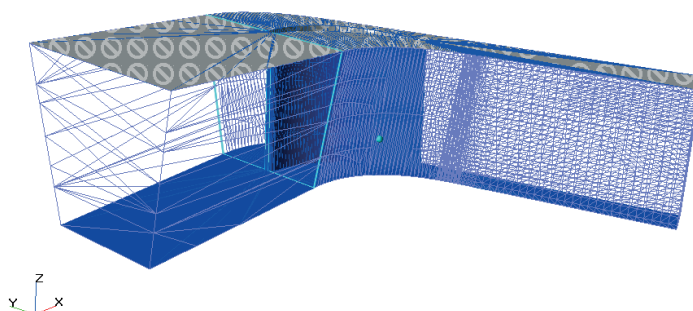


Рис. 2. Разбивка расчетной области на ячейки

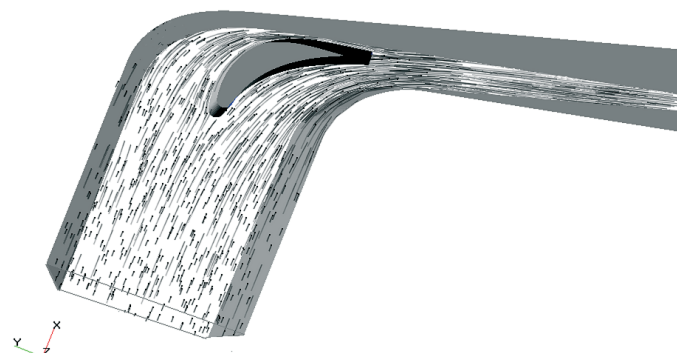


Рис. 3. Течение рабочего вещества

В работах [5, 6] приведены некоторые результаты совершенствования геометрии лопаточных аппаратов турбомашин на базе газодинамического расчета пространственного течения рабочего вещества.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что успехи, достигнутые в прикладной геометрии в сфере моделирования плоских и пространственных кривых, генерации на их основе разнообразных поверхностей для различных технических объектов, применимы и при создании лопаточных аппаратов проточных частей турбомашин. Более того, роль геометрического моделирования трудно переоценить, если речь идет о создании современных высокоэффективных турбин и компрессоров промышленных и транспортных газотурбинных двигателей. Объединение усилий специалистов в прикладной геометрии и вычислительной газодинамики будет способствовать дальнейшему повышению эффективных показателей турбомашин различного целевого назначения.

Список использованных источников

1. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, С. В. Ершов [и др.]. — Х. : НТУ ХПИ, 2002. — 356 с.
2. Епифанова В. И. Компрессорные и расширительные турбомашин радиального типа / В. И. Епифанова. — М. : Изд-во МГТУ, 1998. — 624 с.
3. Кампти Н. Аэродинамика компрессоров : [пер. с англ.] / Н. Кампти. — М. : Мир, 2000. — 688 с.
4. Михайленко В. Є. Шляхи підвищення ефективних показників осьових і радіальних турбомашин / В. Є. Михайленко, С. А. Устенко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К. : КНУБА, 2009. — Вип. 81. — С. 3—10.
5. Box G. E. P. Some new three level designs for study of quantitative variables / G. E. P. Box, D. W. Behnken // Technometrics. — 1960. — Vol. 2, No 4. — P. 455—475.
6. Устенко С. А. Побудова обводів спинки та коритця профілів лопаток осьових турбін [Електронний ресурс] / С. А. Устенко // Вісник Національного університету кораблебудування. — Миколаїв : НУК, 2010. — № 2. — С. 84—88. — Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua/content/10usalot>.
7. Устенко С. А. Удосконалення профілів лопаток осьових компресорів та побудова на їх основі геометричних моделей / С. А. Устенко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К. : КНУБА, 2010. — Вип. 85. — С. 221—226.
8. Устенко С. А. Побудова геометричної моделі плоского перерізу лопатки для газодинамічних розрахунків в системі FLOW VISION / С. А. Устенко // Праці Харківського державного університету харчування та торгівлі «Геометричне та комп'ютерне моделювання». — Х. : ХДУХТ, 2009. — Вип. 25. — С. 153—158.
9. Устенко С. А. Застосування геометричної моделі каналу решітки при обчисленні втрат енергії / С. А. Устенко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К. : КНУБА, 2010. — Вип. 83. — С. 103—110.
10. Устенко С. А. Аналітичне подання залежності швидкісного коефіцієнта лопаткового апарату турбомашини від геометричних параметрів, що оптимізуються / С. А. Устенко // Вестник Херсонского национального технического университета. Вып. 3 (39). — Херсон : ХНТУ, 2010. — С. 482—486.

Vsevolod MIKHAILENKO

Kyiv

Serhiy USTENKO

Mykolaiv

THE ROLE OF APPLIED GEOMETRY TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF PERFORMANCE OF TURBOMACHINERY

The role of applied geometry in solving problems related to improving the efficiency of turbomachinery, widely used in transportation energy, a variety of industries. Establish steps for solving the problem of optimization of the geometric parameters of turbomachinery blade devices (construction of geometrical models, the formation of the objective function, the optimization parameters), based on a gas-dynamic calculation of viscous working substance.

Key words: Applied geometry, effective indicators, turbomachine, blading, geometric parameters.

Всеволод МИХАЙЛЕНКО

м. Київ

Сергій УСТЕНКО

м. Миколаїв

РОЛЬ ПРИКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРІЇ В ПІДВИЩЕННІ ЕФЕКТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ ТУРБОМАШИН

Визначається роль прикладної геометрії у вирішенні проблеми, пов'язаної з підвищенням ефективності турбомашин, широко застосовуваних у транспортній енергетиці, різних галузях промисловості. Встановлення етапів вирішення задачі оптимізації геометричних параметрів лопаткових апаратів турбомашин (побудова геометричних моделей, формування цільової функції, оптимізація параметрів), що базується на газодинамічному розрахунку просторової течії в'язкої робочої речовини.

Ключові слова: прикладна геометрія, ефективні показники, турбомашини, лопатковий апарат, геометричні параметри.

Стаття надійшла до редколегії 07.03.2016

МУЛЬТИМЕДІЙНІ НОТАТКИ ДЛЯ ПЛАТФОРМИ ANDROID: АНАЛІЗ ТА ПРАКТИКА РЕАЛІЗАЦІЇ

У статті виконано аналіз найпопулярніших менеджерів мультимедійних нотатків для платформи Android. Авторами надано функціонал та запропоновано опис розробленого програмного продукту «Sinote» – менеджера мультимедійних нотаток. Перевагою останнього є рівень захисту даних у контексті створених програмним продуктом нотаток. Пропонований програмний продукт «Sinote» створений за допомогою інтегрованого середовища розробки Android Studio.

Ключові слова: Java, Android Studio, RSA, база даних, нотатки.

У наш час смартфони та планшетні комп'ютери – незамінні помічники будь-якої сучасної людини у багатьох галузях діяльності. За прогнозами [1] вже до 2019 року дроти та кабелі для персональних і периферійних пристроїв у багатьох сферах просто зникнуть. Саме смартфони можна називати першопрохідцями на шляху до ринку гаджетів-імплантів, адже вони зараз сприяють новітнім розробкам у мікроелектроніці та біоінженерії. У сучасному світі щоденно зростає кількість смартфонів під управлінням мобільної операційної системи Android, яка займає провідні позиції на світовому ринку інформаційних технологій.

Смартфони – гаджети, які роблять величезну конкуренцію паперу, а в майбутньому здатні й геть його замінити [2], що можливо розглядати як вагомий внесок у екологічне збереження навколишнього середовища у світі. Для зручності користувачів та невідомої еволюції технологій смартфони перекладають на себе все більше функцій різних звичайних повсякденних речей, зокрема, можливістю вбудови у себе функцій фотоапаратів, калькуляторів, конвертерів, ліхтариків, величезних комп'ютерів, звичайного паперу [1].

Розробка специфічних додатків, якої б частини людського життя вони не стосувались, є, в будь-якому разі, корисним починанням. Враховуючи всі аспекти сучасного світу – не тільки руху за збереження екосистеми, а й збереження персональних даних кожного користувача смартфонів та планшетних комп'ютерів, актуальність створення менеджера управління мультимедійними нотатками є вагомою.

Існує значна кількість додатків – менеджерів роботи з різними нотатками. Особливості функціонування найбільш розповсюджених менеджерів по роботі з мультимедійними нотатками можна зустріти у роботах таких авторів, як І. Муравйов, Ю. Паккард, І. Суботін [13; 11; 12] та ін. В джерелах [5; 6; 7; 8; 13; 11; 12] зроблено акцент на загальні функції менеджерів мультимедійних нотатків Google Keep, Evernote та Any.Do та приділено увагу рівню захисту даних. Можна зазначити, що у більшості робіт робиться спроба узагальнити та порівняти існуючі менеджери мультимедійних нотатків.

Особливості та можливості інтегрованих середовищ та технологій для розробки додатків для смартфонів та планшетних комп'ютерів можна зустріти у багатьох сучасних джерелах. Серед найбільш відомих у галузі програмування під Android виділимо [3; 5; 6]. Авторами Л. Шерінгемом, Д. Ісоном, Л. Мароном [14] та іншими надаються відомості зі світу еволюції інструментів розробки під платформу Android.

Вивчення публікацій в галузі технологій для розробки додатків для смартфонів та аналіз найпопулярніших менеджерів мультимедійних додатків показав, що зазначені програмні засоби справляються з поставленими для них задачами, але не задовольняють рівня безпеки даних сучасного світу.

У зв'язку з цим виникла потреба створення конкурентоспроможного заміниника розглянутим системам: локального менеджера нотаток із функцією захисту особистих даних.

Метою даної статті є опис розробленого програмного продукту менеджера мультимедійних нотатків, з урахуванням окреслених недоліків у досліджуваних конкурентоспроможних програмних продуктах, з обробки та збереження даних, у тому числі мультимедійних.

Щоденно зростає шалений попит на додатки до «розумних» гаджетів. Найчастіше для програмної реалізації зазначеної вище течії розвитку інформаційних технологій використовують операційну систему Android. Остання переросла із маленького стартапу до платформи, якою щоденно користується більше мільярда користувачів по всьому світу [5]. Існує декілька середовищ розробки додатків для операційної системи Android. Офіційна та найзручніша Android Studio.

Існує велика кількість додатків, спрямованих на збереження та обробку нотатків на платформі Android: Evernote, Any.Do, Google Keep. Всі з аналізованих менеджерів дають можливість управляти текстовими, фото, аудіо нотатками, але кожен з них має свої особливості та недоліки.

Google Keep – найбільший серед менеджерів управління нотатками, створений розробниками корпорації Google. За своєю архітектурою Google Keep – синхронізаційний блокнот, з доступом до нотаток з усіх синхронізованих пристроїв та хмарних сервісів. Реалізовані наступні базові функції для обробки мультимедійних нотатків [7]:

- встановлення нагадувань;
- можливість зміни кольору нотатків;
- прикріплення зображень до нотатків;
- жорстка прив'язка до облікового запису Google.

Синхронізація, з одного боку, значна перевага, а з іншого – величезна загроза для витоку інформації.

Отже, функціональний менеджер нотаток Google Keep, в якому зручно організована мультиплатформова взаємодія між нотатками, прив'язаними до аканту Google. Нотатки синхронізуються між гаджетами користувача, передаючись у зашифрованому вигляді по Інтернет. Для доступу до нотаток достатньо отримати доступ до одного з синхронізованих і авторизованих гаджетів, що в свою чергу повністю руйнує будь-які засоби безпеки.

Evernote – еталон менеджерів додатків. Випереджає всіх конкурентів у продуктивності та практичності. Перевагами даного менеджера додатків нами виділено:

- фото нотатки;
- аудіо нотатки;
- підтримка нотаток з рукописним вводом;
- прикріплення координат.

До недоліків можна віднести:

- синхронізацію;
- досить велику ціну – 360 грн / рік;
- збереження змісту нотаток у незашифрованому вигляді.

Таким чином, Evernote – веб-сервіс та набір програмного забезпечення для обробки та зберігання нотатків [3]. Лише за відсутністю Інтернет-з'єднання є вигодою, що створені/існуючі нотатки нікуди не синхронізуються. Існує можливість встановлення паролю на додаток, але з певними навичками та текстовим редактором можна легко отримати доступ до збережених нотаток.

Any.Do – головною перевагою є вишуканий інтерфейс, але ваговим недоліком – суттєві обмеження безкоштовної версії. Завойовує серця вишуканим інтерфейсом, та відштовхує обмеженістю безкоштовної версії.

Крім зазначеного з переваг виділимо [8]:

- планувальник завдань;
- коментування нотаток;
- попередження.

До недоліків належать:

- відсутність шифрування зберіганих файлів;
- велика ціна.

З проведеного аналізу можна зробити висновки, що розглянуті менеджери проектувались під конкретні прошарки можливих користувачів, яких найчастіше повністю задовольняє рівень безпеки доступу та збереження їх даних.

Перед нами постало завдання, виходячи з переваг проаналізованих програмних продуктів, створити конкурентоспроможний програмний продукт з урахуванням недоліків проаналізованих програмних систем.

Пропонований програмний продукт «Sinote» є автономним менеджером мультимедійних нотаток для операційної системи Android, написаним на мові програмування Java у інтегрованому середовищі розробки Android Studio. Призначенням програмного продукту «Sinote» є зберігання та обробка мультимедійних нотаток користувача з можливістю захисту даних.

Програмний продукт має наступний функціонал:

- перешкоджання несанкціонованого доступу до інформації внесеної користувачем;
- шифрування та дешифрування інформації користувача;
- додавання мультимедійних нотаток;
- мультисесійність для кращої стійкості перед несанкціонованим доступом.

У «Sinote» передбачена реєстрація нових користувачів з різними розподіленими місцями збереження інформації. Мультисесійність досягається системою доступу по токenu, без необхідності збереження паролів на пристрої користувачів. Додаток генерує унікальні ключі для кожного користувача, що додає стійкості перед несанкціонованим доступом. Вся інформація внесена певним користувачем шифрується, та доступ до неї уможливорюється тільки при знанні паролю доступу до програмного продукту конкретного користувача менеджера мультимедійних додатків.

Практичність програмної системи забезпечується завдяки дружньому та ергономічному інтерфейсу, зрозумілому користувачеві з першого погляду.

Надійність та стійке функціонування програмної системи реалізується завдяки сукупності таких організаційно-технічних заходів:

1. Відсутність можливості отримання доступу до інформації за допомогою зміни або перегляду файлів програмного продукту;
2. Ускладнене розшифрування інформації за допомогою сторонніх методів.

Масштабування програмної системи може відбутися у разі виробничої необхідності кваліфікованим персоналом.

Джерелом даних є база даних. В ній зберігається зашифрована інформація мультимедійних нотаток всіх зареєстрованих користувачів.

Система побудована з використанням вільного інтегрованого середовища розробки для платформи Android – Android Studio.

Проектування архітектури взаємодії програмних модулів додатку базується на аналізі існуючих менеджерів мультимедійних нотаток та поставлених завдань реалізації удосконаленого варіанту існуючих програмних продуктів. Дерево функцій розробленого програмного продукту зображено на рисунку 1.



Рис. 1. Дерево функцій програмного продукту

Менеджер мультимедійних нотатків «Sinote» побудований за схемою взаємодії сценаріїв діалогів, представленою на рисунку 2.

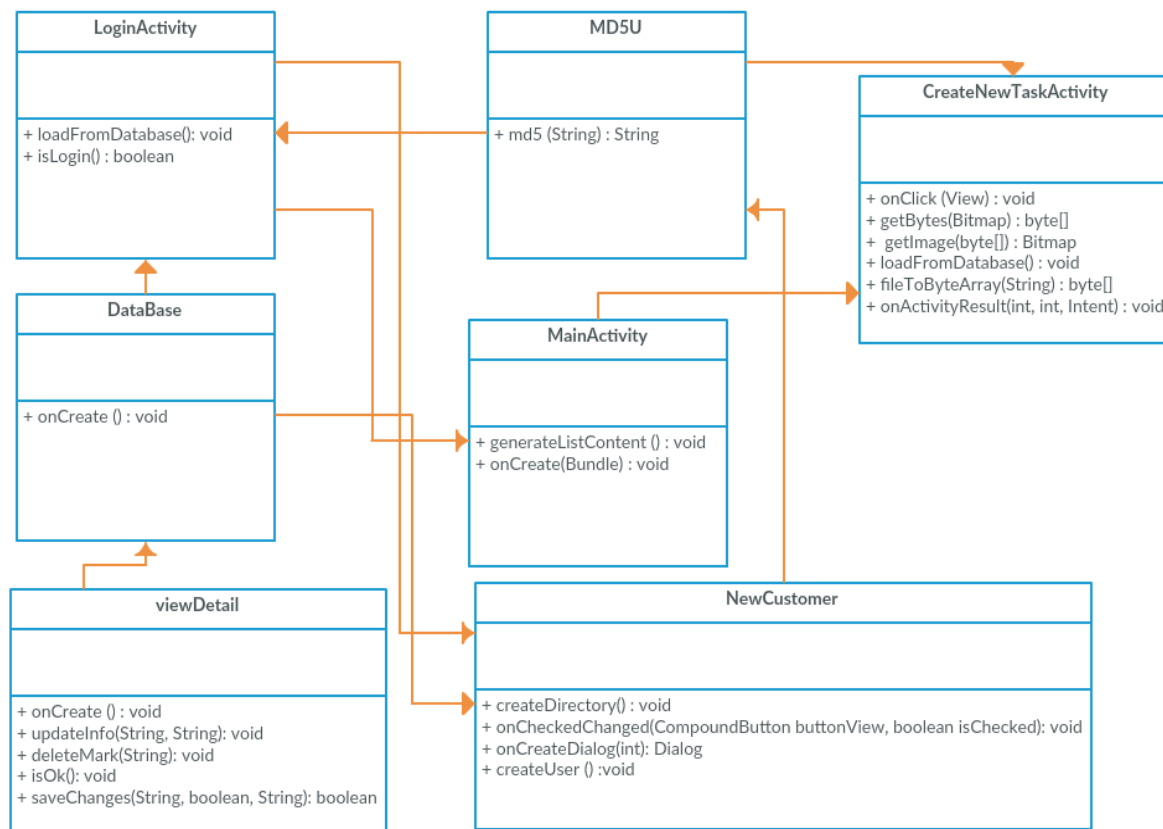


Рис. 2. Діаграма класів програмного продукту

Для збереження даних нотаток використовується реляційна система управління базами даних SQLite.

Для початкової ініціалізації бази даних, використовується власний клас, який розширює можливості стандартного SQLiteOpenHelper. В класі DataBase реалізовано функцію ініціалізації бази даних (див. рисунок 3).

Взаємодія «Sinote» з базою даних відбувається за рахунок розширення стандартних можливостей SQLiteOpenHelper.

```

@Override
public void onCreate(SQLiteDatabase db) {
    db.execSQL("create table MainDataTable(id integer primary key autoincrement, HashKey text, NoteText text, PhotoData blob, SoundNote blob, ValueKey text);");
}
    
```

Рис. 3. Процедура створення бази даних

Архітектура побудови сховища даних реалізована наступним чином (див. рисунок 4):

Sinote			
	id	integer	
	HashKey	text	
	NoteText	text	
	PhotoData	blob	
	SoundNote	blob	
	ValueKey	text	

Рис. 4. Схема архітектури побудови таблиці зберігання

Функціональне призначення атрибутів сутностей бази даних представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Атрибути сутностей

Атрибут	Ключ	Означення
Id	Int	Ключ для унікальності запису
HashKey	Text	Унікальний зашифрований токен користувача
NoteText	Text	Текст нотатка
PhotoData	Text	Фото/відео додаток
SoundNote	Blob	Аудіо дані
ValueKey	Text	Криптографічна сіль

Під час аналізу існуючих менеджерів нотаток виявлено, що більшість з них не дозволяє абсолютно локальної анонімною автентифікації. У пропонованому програмному продукті «Sinote» розроблена система автентифікації без явного збереження паролю на пристрої користувача. Ім'ям користувача виступає зашифрований ключ, згенерований на етапі реєстрації.

При здійсненні автентифікації програмний продукт генерує зашифрований ключ, який є як ключем доступу до програмного продукту, так і ключем відображення інформації, до якої має доступ певний користувач. Програмну реалізацію зазначених дій подано на рисунку 5.

```
boolean isLogin() {
    String ConcatPassword = "";
    ConcatPassword = Md5Util.md5(first.getText().toString() +
second.getText().toString() + thirt.getText().toString() + fourth.getText().toString());
    sPref = getSharedPreferences("users", MODE_PRIVATE);
    SharedPreferences.Editor ed = sPref.edit();
    String PasswordFromPreferences = sPref.getString(USER_CREATE, "");
    Toast.makeText(this, ConcatPassword.equals(PasswordFromPreferences) ?
"Вітаннячка!" : "Введіть валідний пароль", Toast.LENGTH_LONG).show();
    if (ConcatPassword.equals(PasswordFromPreferences)) {
        return true;
    } else {
        return false;
    }
}
```

Рис. 5. Програмна реалізація створення нового облікового запису

Завдяки відсутності збереженої локальної копії паролю та шифрування самих токенів доступу і всієї інформації досягається високий рівень захисту даних згенерованих програмним продуктом.

Для шифрування даних у «Sinote» використовується криптографічний алгоритм RSA [9]. Безпека алгоритму RSA побудована на принципі складності факторизації цілих чисел. Алгоритм використовує два ключі – відкритий (public) і секретний (private). Разом відкритий і відповідний йому секретний ключі утворюють пари ключів (keupair). Відкритий ключ не потрібно зберігати в таємниці, він використовується для шифрування даних. Якщо повідомлення було зашифровано відкритим ключем, то розшифрувати його можна тільки відповідним секретним ключем.

Таким чином, у статті було проаналізовано системи існуючих менеджерів мультимедійних нотатків Google Keep, Evernote та Any.Do, до загальних функцій яких віднесено: створення текстових нотаток; прикріплення фото/відео; хмарна синхронізація між пристроями. До суттєвого недоліку існуючих менеджерів мультимедійних нотатків нами віднесено відсутність стійкого захисту інформації, що зберігається, особливо звертаючи увагу на присутність хмарної синхронізації проаналізованих менеджерів мультимедійних нотатків.

З урахуванням виявлених під час аналізу недоліків, розроблено програмний продукт «Sinote», спрямований на зберігання та обробку мультимедійних нотатків на платформі Android. Програмний продукт написаний на мові програмування Java. Пропонований менеджер мультимедійних нотатків забезпечує високий рівень захисту даних, достатній рівень зручності користування, дозволяє обробляти текстові, фото, аудіо, відео та синтезовані нотатки. Головною перевагою, на нашу думку, є рівень захисту даних у контексті створених програмним продуктом нотаток.

Подальші дослідження у зазначеному напрямку пов'язуємо з аналізом та можливостями програмної реалізації рівнів кібербезпеки менеджерів мультимедійних нотатків, що є актуальними у зв'язку з ростом рівня кіберзлочинності у світі.

Список використаних джерел

1. Kurzweil Accelerating Intelligence [Електронний ресурс] // Офіційне Інтернет-представництво технічного директора Google. — Режим доступу: <http://www.kurzweilai.net/> (дата звернення: 10.08.2015).
2. Знеліснення [Електронний ресурс] // Вікіпедія. — Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Знеліснення> (дата звернення: 10.08.2015).
3. Evernote [Електронний ресурс] // Онлайн-сервіс та ряд додатків для різних платформ, призначених для збереження, синхронізації та пошуку приміток. — Режим доступу: <https://evernote.com/> (дата звернення: 3.09.2015).
4. Statista [Електронний ресурс] // Statistics and facts about Android. — Режим доступу: <http://www.statista.com/topics/876/android/> (дата звернення: 3.09.2015).
5. Developers [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Android Studio. — Режим доступу: <http://developer.android.com/sdk/index.html> (дата звернення: 22.08.2015).
6. Eclipse [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Eclipse. — Режим доступу: <https://eclipse.org/> (дата звернення: 22.08.2015).
7. Keep [Електронний ресурс] // Офіційний сайт додатку Google Keep. — Режим доступу: <https://www.google.com/keep/> (дата звернення 10.08.2015).
8. ANY.DO [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Any.do. — Режим доступу: <https://www.any.do/> (дата звернення 10.08.2015).
9. RSA 21st century enlightenment [Електронний ресурс] // Офіційний сайт RSA. — Режим доступу: <https://www.theresa.org/> (дата звернення 10.10.2015).
10. OpenSSL Cryptography and SSL/TLS Toolkit [Електронний ресурс] // Офіційний сайт SSL. — Режим доступу: <https://www.openssl.org/docs/faq.html> (дата звернення 15.10.2015).
11. Топ 5 додатків [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Алло. — Режим доступу: <http://blog.allo.ua/top-5-prilozhenij-dlya-vedeniya-zametok-na-andorid/> (дата звернення 19.02.2016).
12. Народный ТОП Android приложений: обустраиваем смартфон [Електронний ресурс] // Офіційний сайт www.mobile-review.com. — Режим доступу: <http://android.mobile-review.com/market/20724/> (дата звернення 19.02.2016).
13. Путеводитель по менеджерам заметок для Android [Електронний ресурс] // Позитроніка. — Режим доступу: <http://www.ixbt.com/soft/android-notes.shtml> (дата звернення 19.02.2016).
14. Android Developers Blog [Електронний ресурс] // Офіційний блог Андроїд девелоперів. — Режим доступу: <http://android-developers.blogspot.com/> (дата звернення 19.02.2016).

Hanna POHROMSKA, Olexander KHRYSTODOROV
Mykolaiv

THE MULTIMEDIA NOTES FOR PLATFORM OF ANDROID: ANALYSIS AND THE PRACTICE IMPLEMENTATION

The article analyzed the most popular multimedia management platform notes for Android. The authors provided the functional description and proposed developed software «Sinote» – media manager notes. The latter is the level of data protection in the context created by the software notes. The proposed software «Sinote» created by the integrated development environment Android Studio.

Key words: Java, Android Studio, RSA, database, notes.

Анна ПОГРОМСКАЯ, Александр ХРИСТОДОРОВ
г. Николаев

МУЛЬТИМЕДИЙНЫЕ ЗАМЕТКИ ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ ANDROID: АНАЛИЗ И ПРАКТИКА РЕАЛИЗАЦИИ

В статье проанализированы самые популярные менеджеры мультимедийных заметок для платформы Android. Авторами предоставлен функционал и предложено описание разработанного программного продукта «Sinote» – менеджера мультимедийных заметок. Преимуществом последнего является уровень защиты данных в контексте созданных программным продуктом заметок. Предлагаемый программный продукт «Sinote» создан с помощью интегрированной среды разработки Android Studio.

Ключевые слова: Java, Android Studio, RSA, база данных, заметки.

Стаття надійшла до редколегії 25.02.2016

ПРО ВЛАСТИВІСТЬ СИМЕТРІЇ В ЗАДАЧІ РОЗМІЩЕННЯ ОДНОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ

На прикладі задачі розміщення одногабаритних об'єктів у фіксовані позиції аналізується властивість симетрії, яка має місце в комбінаторній оптимізації. З цією метою вводяться системи комбінаторних функцій, якими задаються вхідні дані. Одна з цих систем описує базову задачу (задану за умовою). Інша – упорядковану задачу, яка утворюється з базової та є найпростішим розв'язним випадком, для якого нескладно визначати глобальні мінімум та максимум. Для цих систем виділено симетричні перестановки та комбінаторні функції, які описуються законами евклідової геометрії. Доведено, що значення цільової функції при знаходженні мінімуму утворює послідовність, для якої послідовність розв'язків, що утворюються при знаходженні максимуму, є симетричною.

Ключові слова: комбінаторна оптимізація, цільова функція, перестановка, комбінаторна функція, симетрія комбінаторних множин, розміщення одногабаритних об'єктів.

У статті розглядається властивість симетрії, яка має місце в комбінаторній оптимізації. Доведено, що для задачі розміщення одногабаритних об'єктів у фіксовані позиції значення цільової функції при знаходженні мінімуму утворює послідовність, для якої послідовність розв'язків, що утворюються при знаходженні максимуму, змінюються симетрично.

У задачі розміщення одногабаритних об'єктів можна спостерігати явище, коли для послідовності значень цільової функції, які змінюються від максимуму до мінімуму, існує симетрична послідовність розв'язків, значення яких змінюються від мінімуму до максимуму. Така властивість пов'язана з тим, що множині комбінаторних конфігурацій, які є аргументом цільової функції, характерна симетрія.

Задача розміщення об'єктів виникає в різних галузях: в конструкторському проектуванні обчислювальної апаратури, оптимальному розкрої, моделюванні деяких хімічних та фізичних процесів тощо [1; 2; 3; 4; 5]. Задачі цього класу розділяються за габаритами об'єктів, за способом задання координат на поверхні для їхнього розміщення, а також за структурою вхідних даних. Кожна із таких задач вимагає спеціальних підходів для свого розв'язання. У [5; 6] розміщення різногабаритних модулів зводиться до одногабаритних. Для цього на k -й ітерації проводиться компоновка елементів в одногабаритні модулі з наступним їхнім розміщенням ітераційним алгоритмом в динамічно перебудовані позиції на поверхні плати до тих пір, поки не буде розміщено найменший за габаритами модуль. З цієї схеми видно, що найпростішою задачею з розміщення об'єктів є розміщення одногабаритних модулів у фіксованих позиціях. На цій задачі нескладно досліджувати властивість симетрії, яка має місце в комбінаторній оптимізації.

У літературі розглядаються симетрії розбиття n -елементної множини на підмножини [7]. Ця комбінаторна конфігурація є аргументом цільової функції в різноманітних задачах розбиття, зокрема в задачах класифікації та кластеризації. Для них вводяться класи еквівалентності, однією з умов яких виступає симетрія. У [8] ґрунтовно досліджують групи симетрії на перестановках та визначають їхній порядок. В комбінаторній оптимізації ця властивість проявляється завдяки симетрії комбінаторних множин, які є аргументом цільової функції [9; 10]. Закономірність зміни значень цільової функції в залежності від симетрії комбінаторних множин в літературі не розглядається.

Метою дослідження є виявлення закономірності зміни значень цільової функції в залежності від симетрії множини перестановок в задачі розміщення одногабаритних об'єктів у фіксовані позиції. Описаний підхід такого аналізу можна використовувати для задач комбінаторної оптимізації різних класів.

Математична постановка задачі розміщення об'єктів в рамках теорії комбінаторної оптимізації. Наведемо загальну постановку задачі комбінаторної оптимізації [11]. Задачі цього класу, як правило, задаються однією або кількома множинами, наприклад A та B , елементи яких мають будь-яку

природу. Назвемо ці множини *базовими*. Кожну з цих множин подамо у вигляді графа, вершинами якого є її елементи, а кожному ребру поставлено у відповідність число $c_{ls} \in R$, яке називають вагою ребра (R – множина дійсних чисел); $l \in \{1, \dots, n\}$, $s \in \{1, \dots, \tilde{n}\}$, n – кількість елементів множини A , \tilde{n} – кількість елементів множини B . Покладемо, що $n = \tilde{n}$. Між елементами цих множин існують зв'язки, числове значення яких назвемо вагами. Величини c_{ls} назвемо *вхідними* даними та задамо їх матрицями. Ці величини визначають значення цільової функції.

Із елементів однієї або кількох із заданих множин, наприклад $a_l \in A$, $l \in \{1, \dots, n\}$, утворюється комбінаторна множина W – сукупність комбінаторних конфігурацій певного типу (перестановки, вибірки різних типів, розбиття тощо). На елементах w комбінаторної множини W вводиться цільова функція $F(w)$. Необхідно знайти елемент w^* множини W , для якого $F(w)$ набуває оптимального значення при виконанні заданих обмежень.

Змоделюємо вхідні дані в задачі комбінаторної оптимізації скінченними послідовностями. Подамо елементи h наддіагоналей симетричної комбінаторної матриці $Q(w^k)$ комбінаторною функцією $\beta(f(j), w^k)|_1^m = (\beta_1(f(1), w^k), \dots, \beta_m(f(m), w^k))$, а елементи h наддіагоналей симетричної матриці C – функцією натурального аргументу $\varphi(j)|_1^m = (\varphi(1), \dots, \varphi(m))$, де $m = \frac{n(n-1)}{2}$ – кількість елементів h наддіагоналей матриць C та $Q(w^k)$, $h = \overline{1, n-1}$. Верхній індекс k ($k \in \{1, \dots, q\}$) – порядковий номер w^k в W , q – їхня кількість. Якщо матриці $Q(w^j)$ та C – несиметричні, то $\beta(f(j), w^k)|_1^m$ та $\varphi(j)|_1^m$ містять усі їхні елементи, а $m = n^2$ (або $m = n \tilde{n}$). Функція цілі $F(w^k)$ набуває вигляду

$$F(w^k) = \sum_{j=1}^m \beta_j(f(j), w^k) \varphi(j) \quad (1)$$

Уведемо системи комбінаторних функцій H та H' , де $\beta(f(j), w^k)|_1^m \in H$ – комбінаторна функція, аргументом якої є перестановка $w^k \in W$, утворена з елементів базової множини $A_n = \{a_1, \dots, a_n\}$, $\beta(f(j), w^i)|_1^m \in H'$ – комбінаторна функція, аргументом якої є перестановка $w^i \in W'$, утворена з елементів базової множини $\tilde{A}_m = \{\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_m\}$. Якщо $\beta(f(j), w^1)|_1^m = \beta(f(j), w^1)|_1^m$, де w^1, w^1 – перші перестановки в W , W' і $\beta(f(j), w^1)|_1^m \in H$, $\beta(f(j), w^1)|_1^m \in H'$, то $H \subset H'$. Задачу комбінаторної оптимізації, вхідні дані в якій задано функціями $\beta(f(j), w^k)|_1^m$ та $\varphi(j)|_1^m$, назвемо базовою (або задачею системи H). Задачу, вхідні дані в якій задано функціями $\tilde{\beta}(f(j), w^i)|_1^m$ (або $\tilde{\beta}(f(j), w^t)|_1^m$), де $\tilde{\beta}(f(j), w^i) \geq \tilde{\beta}(f(j+1), w^i)$ (або $\tilde{\beta}(f(j), w^t) \leq \tilde{\beta}(f(j+1), w^t)$), та $\tilde{\varphi}(j)|_1^m$ (або $\tilde{\varphi}(j)|_1^m$), де $\tilde{\varphi}(j) \leq \tilde{\varphi}(j+1)$ (або $\tilde{\varphi}(j) \geq \tilde{\varphi}(j+1)$), утворених із $\beta(f(j), w^k)|_1^m$ та $\varphi(j)|_1^m$, назвемо впорядкованою (або задачею системи H').

Задача розміщення одногобаритних об'єктів формулюється таким чином. Множину одногобаритних об'єктів необхідно розмістити в задані установочні позиції так, щоб змодельована за заданими критеріями цільова функція набувала оптимального значення, а віддалі між об'єктами дорівнювала певній величині. Аргументом цільової функції в ній є перестановка. Для спрощення її розв'язання об'єкти подамо геометричними точками, а оцінку результату проводимо за виразом (1). Ця задача задається двома множинами A та B . Елементом $a_l \in A$, $l \in \{1, \dots, n\}$, відповідають об'єкти, які необхідно розмістити в заданій області. Елементом $b_t \in B$, $t \in \{1, \dots, \tilde{n}\}$, відповідають установоч-

ні позиції для розміщення об'єктів, де n – кількість елементів множини A , \tilde{n} – кількість елементів множини B , $n \leq \tilde{n}$. Нижче розглянемо варіант задачі для $n = \tilde{n}$.

Оскільки в задачі розміщення одногабаритних об'єктів аргументом цільової функції є перестановка, розглянемо цю комбінаторну конфігурацію [8; 11]. Нехай задано скінченну базову множину $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, яка складається з n елементів будь-якої природи. Перенумеруємо їх від 1 до n і вважатимемо, що елементами A виступають саме ці числа. Назвемо перестановкою $w = (w_1, \dots, w_n)$ будь-яке розміщення чисел $1, 2, \dots, n$ у деякому порядку. Їхню множину позначимо W . Число різних перестановок з n символів дорівнює добутку $1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n$, який позначається $n!$. Якщо в заданій перестановці поміняти місцями будь-які елементи (не обов'язково розміщені поряд), а всі інші залишимо на місці, то одержимо нову перестановку. Операцію, яка змінює порядок елементів у перестановці, називають підстановкою. Підстановка розкладається на цикли. Цикли довжиною два називають транспозиціями, тобто транспозиції – це найпростіші підстановки та означають переміщення. В подальшому користуємося цим терміном. Назвемо його рекурентним комбінаторним оператором транспозиції та позначимо його як $\alpha(w_s, w_l)$. Від будь-якої перестановки з n елементів можна перейти до будь-якої іншої з тих же символів за допомогою як однієї так і кількох транспозицій.

Розглянемо симетрію, що характерна для множини перестановок. Із усіх видів симетрії урахуємо ту, яка описується законами евклідової геометрії. Симетричний будь-який предмет, який збігається сам із собою при русі без деформацій, тобто, симетрія зберігає відстань між точками предмета незмінними. Існує єдиний спосіб перемістити симетричну послідовність так, щоб вона збіглася з початковою. Це – її поворот на 180° . Уведемо означення.

Означення 1. Інверсією перестановки $w^k = (1, 2, \dots, n-1, n)$ назвемо перестановку $\tilde{w}^k = (n, n-1, \dots, 2, 1)$, тобто $w^k \in W$ та $\tilde{w}^k \in W$ симетричні одна відносно другої.

Отже, для будь-якої перестановки у множині W існує їй симетрична перестановка. Попарно симетричних перестановок у W міститься $\frac{n!}{2}$.

У природі існує скінченне число комбінаторних множин, кожна з яких упорядкована по-своєму. Згенеруємо множину перестановок W рекурентно-періодичним методом з урахуванням властивості періодичності як описано в [11]. Для цього необхідно сформулювати три правила, за якими утворюються:

- а) інтервал нульового рангу,
- б) обмежувальна комбінаторна конфігурація (перша в інтервалі нульового рангу),
- в) інтервал σ -го рангу.

Проаналізувавши побудовану за цією схемою множину W , можна побачити, що обмежувальні перестановки p -го інтервалу n -го рангу для n парного утворюються точно так, як і r -го інтервалу n -го рангу, тобто по відношенню до середнього інтервалу $n/2$ у множині W має місце осьова симетрія; $p \in \{n/2+1, \dots, n\}$, $r \in \{1, \dots, n/2\}$.

Розглянемо, яким чином симетрія множини перестановок впливає на зміну значень цільової функції в задачі розміщення одногабаритних об'єктів. Комбінаторні функції, аргументом яких є перестановка, також утворюються рекурентним комбінаторним оператором транспозиції. Для будь-якої комбінаторної функції із системи H' знайдеться їй інверсна, тобто симетрична. Можна довести, що жодна комбінаторна функція із системи H не має своєї інверсії (симетричної) в H [12]. Оскільки $\beta(f(j), w^{k+1})|_1^m \in H'$ попарно симетричні, нижче для них розглянемо закономірність зміни значень цільової функції від симетрії.

Дві транспозиції $\alpha(w_l^k, w_t^k)$ та $\alpha(w_r^k, w_s^k)$ назвемо незалежними, якщо всі елементи в них мають різні значення. Відповідно, дві транспозиції функції $\beta(f(j), w^k)|_1^m$ – незалежні, якщо значення цієї функції в них – різні.

Означення 2. Дефіцитом функції $\beta(f(j), w^{k+1})|_1^m$ відносно транспозиції назвемо величину $\varepsilon(w^k) = |\beta_t(f(t), w^k) - \beta_s(f(s), w^k)|$, які операцією транспозиції $\alpha(w_r^k, w_l^k)$ помінялися місцями в $\beta(f(j), w^{k+1})|_1^m$.

Дефіцитом функції $\varphi(j)|_1^m$ відносно транспозиції назвемо величину $\varepsilon' = |\varphi(t) - \varphi(s)|$, $\varphi(t), \varphi(s)$ якої перемножуються на значення $\beta_j(f(t), w^k), \beta_s(f(s), w^k)$ функції $\beta(f(j), w^k)|_1^m$.

Для упорядкованої задачі розглянемо, як змінюється в залежності від транспозиції значень $\beta_j(f(j), w^k)$ цільова функція (1), якщо $\beta(f(j), w^1)|_1^m = (1, \dots, m)$ та $\varphi(j)|_1^m = (1, \dots, m)$.

Теорема. Якщо у функції $\beta(f(j), w^1)|_1^m = (1, \dots, m)$ провести транспозицію двох значень $\beta_j(f(j), w^1), \beta_s(f(s), w^1)$, то $F(w^k)$ для одержаної перестановки $w^k \in W'$ дорівнює

$$F(w^k) = F(w^1) - (\varepsilon(w^1))^2. \quad (2)$$

Доведення. Спочатку наведемо таку лему.

Лема. Якщо функція $\beta(f(j), w^k)|_1^m$ утворена операцією транспозиції $\alpha(w_r^k, w_l^k)$ із функції $\beta(f(j), w^1)|_1^m = (1, \dots, m)$ або із $\beta(f(j), \tilde{w}^k)|_1^m = (m, \dots, 1)$, то дефіцит транспозиції цих функцій дорівнює одному і тому ж числу $\varepsilon(w^1) = \varepsilon'$, (або $\varepsilon(\tilde{w}^k) = \varepsilon'$).

Доведення очевидне.

Запишемо $F(w^1) = 1 + \dots + d^2 + \dots + e^2 + \dots + m^2$, а $F(w^k) = 1 + \dots + d e + \dots + e d + \dots + m^2$. Із цих виразів видно, що в $F(w^k)$ по відношенню до $F(w^1)$ змінилися два значення, для яких справедлива нерівність

$$d^2 + e^2 > d e + e d. \quad (3)$$

Згідно з лемою 1, $\varepsilon(w^1) = \varepsilon' = |e - d|$, $e > d$. Запишемо $e = d + \varepsilon(w^1)$, $d = e - \varepsilon(w^1)$. Підставимо у праву частину виразу (3) значення d та e : $d(d + \varepsilon(w^1)) + e(e - \varepsilon(w^1)) = d^2 + e^2 - \varepsilon(w^1)(e - d) = d^2 + e^2 - (\varepsilon(w^1))^2$. В результаті нерівність (3) набуде вигляду $d^2 + e^2 > d^2 + e^2 - (\varepsilon(w^1))^2$.

З цього випливає, що величина функції $F(w^k)$ по відношенню до значення $F(w^1)$ зменшується на $(\varepsilon(w^1))^2$, що і доводить теорему.

Наслідок 1. Якщо $\beta(f(j), w^1)|_1^m = (1, \dots, m)$ та $\varphi(j)|_1^m = (1, \dots, m)$, то будь-яка транспозиція $\alpha(w_r^1, w_s^1)$ переводить $n-2$ пари значень $\beta_j(f(j), w^1)$ в інверсне, а значення цільової функції $F(w^k)$ зменшується по відношенню до $F(w^1)$, тобто

$$F(w^k) = F(w^1) - \sum_{j=1}^{n-2} \varepsilon_j(w^k) \varepsilon_j', \quad w^1 = (1, \dots, n) \in W.$$

Наслідок 2. Якщо $\beta(f(j), \tilde{w}^k)|_1^m = (m, \dots, 1)$ та $\varphi(j)|_1^m = (1, \dots, m)$, то будь-яка транспозиція $\alpha(\tilde{w}_r^k, \tilde{w}_s^k)$ переводить $n-2$ пари значень $\beta_j(f(j), \tilde{w}^k)$ функції $\beta(f(j), \tilde{w}^k)|_1^m$ в прямий порядок, а значення цільової функції $F(w^i)$ по відношенню до $F(\tilde{w}^k)$ збільшується, тобто $F(w^i) = F(\tilde{w}^k) + \sum_{j=1}^{n-2} \varepsilon_j(w^k) \varepsilon_j', \quad \tilde{w}^k = (n, \dots, 1) \in W \quad i, k \in \{1, \dots, n!\}.$

Наслідок 3. Якщо $\beta(f(j), w^1)|_1^m = (1, \dots, m)$, а $\varphi(j)|_1^m = (1, \dots, m)$, то цільова функція $F_{\max}(w^1) = F_{\min}(\tilde{w}^k) + \sum_{l=1}^{\varsigma} \varepsilon_l(\tilde{w}^k) \varepsilon'_l$, де $\varsigma = \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor$, а

$$\varepsilon_l(\tilde{w}^k) = \begin{cases} \{1, 3, 5, \dots, n-1\}, & \text{якщо } m \in Z, \\ \{2, 4, 6, \dots, n\}, & \text{якщо } m \in Z_1, \end{cases}$$

$$Z \in \{2, 4, \dots, 2j\}, Z_1 \in \{1, 3, \dots, 2j-1\}.$$

Наслідок 4. Якщо $\beta_j(f(j), w^1) \in R$, $\varphi(j) \in R$, а цільова функція для $w^t \in W'$ набуває найбільшого значення, то найменше її значення для перестановки $w^k \in W'$ дорівнює $F_{\min}(w^k) = F_{\max}(w^t) - \sum_{l=1}^{\varsigma} \varepsilon_l(w^t) \varepsilon'_l$.

Якщо $\beta_j(f(j), w^1) \in R$, $\varphi(j) \in R$, а цільова функція для $w^k \in W'$ набуває найменшого значення, то найбільше її значення для перестановки $w^t \in \Omega'$ дорівнює $F_{\max}(w^t) = F_{\min}(w^k) + \sum_{l=1}^{\varsigma} \varepsilon_l(w^k) \varepsilon'_l$, R – множина дійсних чисел.

Послідовність розв'язків для упорядкованої задачі розміщення одногабаритних модулів при знаходженні глобального мінімуму має вигляд: $(F_{\max}(w^t), F(w^*), \dots, F(w^{**}), F_{\min}(w^k))$, $F(w^*) \geq F(w^{**})$. З теореми та наслідків випливає, що для цієї послідовності існує симетрична: $F_{\min}(w^k), F(w^{**}), \dots, F(w^*), F_{\max}(w^t)$, яка утворена однією і тією ж кількістю транспозицій однакових значень комбінаторної функції. Ця властивість характерна і для базової задачі.

Отже, аналіз зміни значень цільової функції в залежності від транспозиції перестановок (комбінаторних функцій) показує, що послідовність розв'язків для задачі розміщення одногабаритних об'єктів від меншого до більшого значень, отриманих за виразом (1), має свою симетрію, отриману за тим же виразом. Ця властивість в комбінаторній оптимізації пов'язана із симетрією комбінаторних множин (аргументу цільової функції). Отримані результати можна використовувати для аналізу зміни значень цільової функції в залежності від симетрії комбінаторних конфігурацій в задачах комбінаторної оптимізації різних класів.

Список використаних джерел

1. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств / В. А. Селютин. — М. : Сов. радио, 1977. — 384 с.
2. Сергиенко И. В. Модели и методы решения на ЭВМ комбинаторных задач оптимизации / И. В. Сергиенко, М. Ф. Каспишкая. — К. : Наук. думка, 1981. — 281 с.
3. Стоян Ю. Г. Размещение источников физических полей / Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин. — К. : Наук. думка, 1981. — 184 с.
4. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность : [пер. с англ.] / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. — М. : Мир, 1985. — 510 с.
5. Гуляницкий Л. Ф. О размещении разногабаритных элементов на печатных платах / Л. Ф. Гуляницкий, Н. К. Тимофеева // УСИМ. — 1982. — № 3. — С. 50—53.
6. Тимофеева Н. К. Зависимость целевой функции от нескольких переменных в задаче размещения объектов и ее решение методом структурно-алфавитного поиска / Н. К. Тимофеева // Кибернетика и системный анализ. — 2013. — № 2. — С. 106—114.
7. Колмогоров А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. — М. : Наука, 1981. — 543 с.
8. Фрид Э. Элементарное введение в абстрактную алгебру : [пер. с венгерского] / Э. Фрид. — М. : Мир, 1979. — 230 с.
9. Тимофеева Н. К. О гамильтоновом цикле и задаче коммивояжера / Н. К. Тимофеева / Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова АН Украины. — К., 1990. — 29 с. — Рус. — Деп. в ВИНТИ 14.11.90, № 5742-B9010.
10. Тимофієва Н. К. Про симетрії комбінаторних множин та біологічних форм / Н. К. Тимофієва // System Analysis and Information Technologies, Proceedings of 16-th International Conference SAIT 2014 (May 26-30, 2014). — Kyiv, Ukraine. Institute for Applied System Analysis of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 2014. — P. 160—161.

11. Тимофієва Н. К. Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації: автореф. дис... д-ра. техн. наук: 01.05.02 / Н. К. Тимофієва, — К., 2007. — 32 с.
12. Тимофеева Н. К. Матрицы в задачах комбинаторной оптимизации / Н. К. Тимофеева // Проблемы управления и информатики. — 1996. — № 3. — С. 104—113.

Nadine TIMOFEEVA
Kyiv

ABOUT SYMMETRY PROPERTY IN PROBLEM OF PLACEMENT OF ONE DIMENSIONAL OBJECTS

For example of the problem of placement of one dimensional objects in a fixed position analyzes the property of symmetry, that occurs in combinatorial optimization. To this end, the systems of combinatorial functions are entered, which are set the input data. One of these systems describes the basic problem (given by). Other – ordered problem, which is formed from the base and is the simplest solvable case, which is easy to determine the global minimum and maximum. For these systems highlighted symmetric permutation and combinatorial functions, which are described by the laws of Euclidean geometry. It is proved that the value of objective function in finding the minimum forms sequence for which sequence of solutions formed by finding the maximum is symmetric.

Key words: the combinatorial optimization, the objective function, the permutation, the combinatorial function, the symmetry of combinatorial sets, placement of one dimension objects.

Надежда ТИМОФЕЕВА
г. Киев

О СВОЙСТВЕ СИММЕТРИИ В ЗАДАЧЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ОДНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

На примере задачи размещения одногабаритных объектов в фиксированные позиции анализируется свойство симметрии, которое имеет место в комбинаторной оптимизации. С этой целью вводятся системы комбинаторных функций, которыми задаются входные данные. Одна из этих систем описывает базовую задачу (заданную по условию). Другая – упорядоченную задачу, которая образуется из базовой и является самым простым разрешимым случаем, для которого несложно определять глобальные минимум и максимум. Для этих систем выделены симметричные перестановки и комбинаторные функции, которые описываются законами евклидовой геометрии. Доказано, что значение целевой функции при нахождении минимума образует последовательность, для которой последовательность решений, образующихся при нахождении максимума, является симметричной.

Ключевые слова: комбинаторная оптимизация, целевая функция, перестановка, комбинаторная функция, симметрия комбинаторных множеств, размещение одногабаритных объектов.

Стаття надійшла до редколегії 01.03.2016

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОСПРЯЖЕНИХ РОТОРІВ ПОВІТРОДУВОК ТИПУ РУТС

У роботі розглянуті питання геометричного моделювання та візуалізації профілів головок і западин трилопатевих роторів повітродувки типу Рутс. На базі запропонованого методу геометричного моделювання взаємоспряжених роторів розроблені відповідні програми, написані об'єктно-орієнтованою мовою Borland Pascal with Objects 7.0 для проведення розрахунків і мовою AutoLisp для формування в середовищі проектування AutoCAD просторового зображення змодельованих роторів.

Ключові слова: моделювання геометричне, візуалізація, ротори взаємоспряжені, повітродувка типу Рутс.

Повітродувки типу Рутс широко застосовуються в різних галузях промисловості та сільському господарстві, де є потреба в повітрі або газі невеликого тиску. Ці повітродувки є безклапанними нагнітальними машинами об'ємного типу, в яких два ідентичних симетричних ротори з лопатнями обертаються в протилежних напрямках всередині корпусу, що складається з двох півциліндрів. Стиснення відбувається зворотним потоком газу з області нагнітання в той момент, коли лопать ротора з'єднує відсічену порцію газу з областю нагнітання.

Основними перевагами повітродувки типу Рутс є простота їх конструкції (мала кількість деталей і мала швидкість обертання роторів роблять такі повітродувки дуже довговічними), компактність, ефективність роботи в широкому діапазоні обертів роторів.

Але у дволопатевої повітродувки є суттєвий недолік – це вібрація під час роботи. З метою поліпшення вібраційних характеристик повітродувки доцільно замість дволопатевої роторів застосовувати трилопатеві ротори, що згладжує нерівномірність подачі повітря і пульсацію тиску.

Принцип роботи повітродувки схематично відображений на рис. 1, на якому темним кольором показано переміщення зон підвищеного тиску.

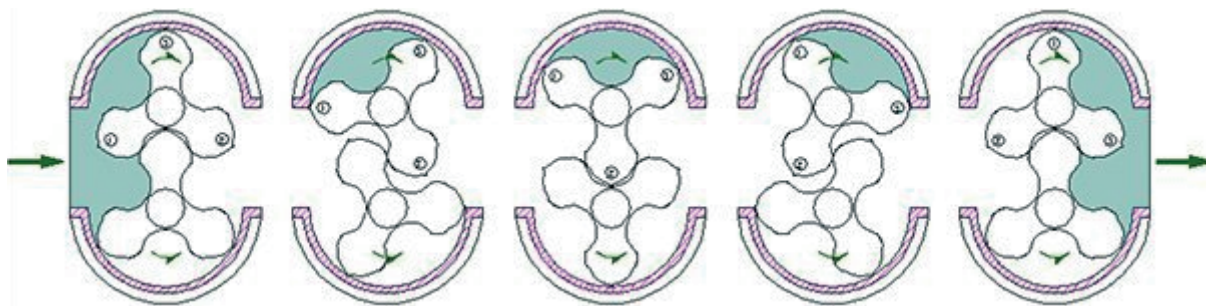


Рис. 1. Принцип роботи повітродувки

З розгляду цього рисунку можна зробити висновок, що одним з основних питань, які необхідно розв'язувати при розробці проектів повітродувки, є питання геометричного моделювання взаємоспряжених роторів, які мають обертатися навколо своїх осей без заклинювання і прослизання.

Публікації, присвячені геометричному моделюванню робочих органів повітродувки типу Рутс у сучасній літературі майже відсутні. Це пояснюється тим, що вважалося, що усі питання, пов'язані з проектуванням повітродувки, вирішені. Але це відносилось до повітродувки з дволопатевою роторами. Боротьба з вібраційними явищами примусила проектантів цих газодинамічних машин перейти до конструкцій з трьома лопатями. Однією з класичних публікацій, присвячених питанням проектування роторних нагнітачів, є монографія А. М. Каца [2], яка була оприлюднена в середині минулого століття. Більш сучасні результати з дослідження об'ємних роторних компресорів, у тому числі і повітродувки, наведені в роботі [3]. Теоретичні питання, присвячені моделюванню робочих органів

роторних компресорів, розглянуті в роботі В.В. Ямінського [4]. Із останніх робіт, присвячених повітродувкам, можна зазначити статтю [1].

Метою цієї статті є подальший розвиток питань, пов'язаних з геометричним моделюванням та візуалізацією на ПЕОМ трилопатевих роторів повітродувок типу Рутс, що дозволить поліпшити якість проектів і надійність роботи цих газодинамічних машин. Збільшення кількості лопатей суттєво ускладнює геометрію роторів повітродувок, що відповідно, вимагає розробки методу їх геометричного моделювання.

Розвиток комп'ютерної техніки, програмного забезпечення надає користувачеві широкі можливості щодо візуалізації результатів геометричного моделювання, що піднімає на якісно новий рівень розв'язання геометричних задач. Графічне подання отриманих результатів краще будь-яких інших допоміжних засобів робить очевидними складні внутрішні закономірності, які відбуваються у виробі, що виникають у робочій зоні повітродувки.

Вище відмічалось, що при розробці проектів повітродувок особливу увагу треба приділяти геометричному моделюванню взаємоспряжених роторів і, в першу чергу, лопатям, які при обертанні навколо своїх осей мають рухатися без заклинювання і прослизання.

Моделювання робочих органів повітродувок здійснюється в два етапи. Спочатку виконується так зване теоретичне моделювання, коли лопаті будуються без урахування зазорів в проточній частині, тобто розв'язується чисто теоретична задача. Потім профілі лопатей коригуються на задану величину зазору як між взаємоспряженими роторами, так і між роторами та корпусом повітродувки.

За аналогією з роботою [2] уведемо поняття початкового кола роторів, під яким розуміють зв'язані з роторами уявні кола, що котяться один по одному без прослизання. Частини роторів, що знаходяться зовні початкового кола називаються головками, усередині – западинами.

Моделювання роторів повітродувок починають із визначення співвідношень між їх основними геометричними параметрами (рис. 2), до яких відносяться радіус початкового кола ротора R , зовнішній радіус ротора R_m , радіус головки r , кількість лопатей ротора z . Кути α і α_r потрібні для моделювання профілю ротора і обчислюються наступним чином:

$$\alpha = \frac{\pi}{2z}; \quad \alpha_r = \pi - \arccos\left(\frac{R_m - R \cos \alpha}{r} - 1\right).$$

Профіль головки ротора можна описувати довільною кривою, але обов'язково потрібно, щоб ця крива проходила через точки A , B і C та була симетричною відносно лінії O_1O_2 . Форма западини визначається як обвідна лінія профілю головки. На практиці найчастіше використовуються ротори, профілі головок яких подаються дугами кіл.

За вихідні дані до геометричного моделювання приймаються параметри R , z і m . Під параметром m розуміється відношення радіуса початкового кола до зовнішнього радіуса ротора, тобто $m = R/R_m$.

Значення радіуса головки обчислюється за таким співвідношенням

$$r = R_m - \frac{R_m^2 - R^2}{2(R_m - R \cos \alpha)}.$$

Визначення геометрії обводів профілів здійснюється з використанням деякого параметра ξ , який дозволяє встановлювати взаємний зв'язок між координатами x , y довільної точки профілю в перерізі, що розглядається:

$$x = r \cos \xi + R_m - r; \quad y = r \sin \xi,$$

в якому параметр ξ змінюється від $-\alpha_r$ до α_r .

Для профілювання роторів вибираємо системи координат, жорстко зв'язані з ними: ліву систему координат $x_1O_1y_1$, де через O_1 проходить вісь обертання першого ротора та праву систему координат

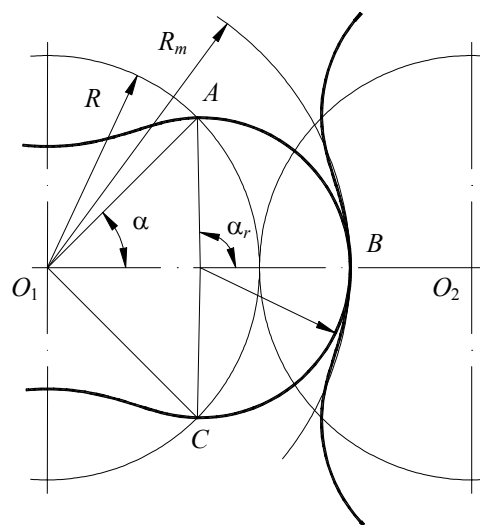


Рис. 2. Співвідношення

$x_2O_2y_2$ – для другого ротора (рис. 3). Обидві системи координат є ортогональними. Застосування правих і лівих систем координат обумовлено обертанням роторів в різні сторони.

При розрахунках координат точок профілів необхідно переходити від локальної системи координат до системи $x_1O_1y_1$ або $x_2O_2y_2$ в залежності від номера ротора, що розглядається.

Основні підходи до геометричного моделювання взаємоспряжених роторів роторних компресорів подані в роботі [4].

Розглянемо моделювання обвідної лінії профілю. Нехай крива, що описує профіль, задана в параметричному вигляді:

$$x = f_x(\xi); \quad y = f_y(\xi),$$

де ξ – деяка криволінійна координата.

Оскільки ротор повітродувки обертається навколо своєї осі, то для знаходження координат точок кривої при довільному куті повороту ротора, доцільно ввести деякий параметр φ , що приводить до такого параметричного рівняння:

$$x = F_x(\xi, \varphi); \quad y = F_y(\xi, \varphi).$$

Рівняння обвідної знаходиться виключенням з рівняння кривої обводу параметра φ . Зв'язок між параметрами φ і ξ визначається за умови, що

$$\frac{\partial(F_x, F_y)}{\partial(\xi, \varphi)} = 0.$$

Використовуючи формули переходу від першого ротора до другого, одержимо рівняння сім'ї миттєвих положень профілю першого ротора в системі координат, зв'язаній з другим ротором:

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{пр}_2} &= 2R \cos \varphi - f_x(\xi) \cos[2\varphi + \gamma] + f_y(\xi) \sin[2\varphi + \gamma]; \\ y_{\text{пр}_2} &= -2R \sin \varphi + f_x(\xi) \sin[2\varphi + \gamma] + f_y(\xi) \cos[2\varphi + \gamma]. \end{aligned} \right\}$$

Профіль лопаті ротора формується з z однакових частин (рис. 4), які в свою чергу складаються з двох ділянок: головки 1 та западини 2.

Рівняння кривої, що описує головку профілю, задається, а кривої, що подає западину, знаходиться як рівняння обвідної лінії для спряжених роторів. Потрібно знайти рівняння обвідної лінії та параметри, які характеризують криву, що подає головку ротора.

Моделювання профілю виконується в такій послідовності. Спочатку визначається крива головки ротора та знаходяться початкове ξ_1 і кінцеве ξ_2 значення параметра. Потім знаходиться рівняння обвідної лінії. Значення початкового та кінцевого параметрів для неї дорівнює відповідним параметрам кривої, що подає головку профілю ротора.

У загальному випадку, стосовно повітродувки типу Рутс, рівняння обвідної для довільної кривої, заданої в параметричному вигляді, має вигляд:

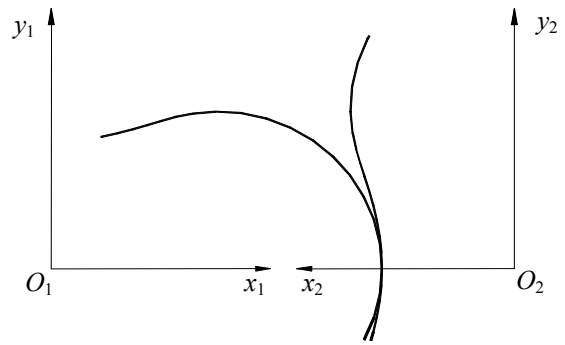


Рис. 3. Системи координат

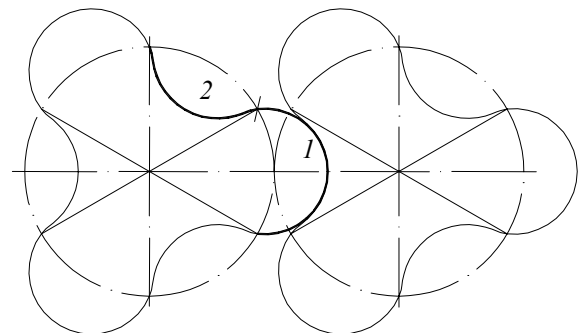


Рис. 4. Формування ротора

$$x_{об} = [2R - Cx(\xi) + Sy(\xi)] \cos \chi + [Sx(\xi) + Cy(\xi)] \sin \chi;$$

$$y_{об} = [Sx(\xi) + Cy(\xi)] \cos \chi - [2R - Cx(\xi) + Sy(\xi)] \sin \chi,$$

$$\text{де } S = \frac{b_0 x'(\xi) - a_0 y'(\xi)}{c_0}; \quad C = \frac{a_0 x'(\xi) + b_0 y'(\xi)}{c_0}; \quad a_0 = \frac{x(\xi)x'(\xi) + y(\xi)y'(\xi)}{R}; \quad b_0 = \sqrt{c_0^2 - a_0^2};$$

$$c_0 = x'^2(\xi) + y'^2(\xi); \quad \chi = \arcsin S = \arccos C.$$

За запропонованим методом геометричного моделювання роторів повітродувки типу Рутс розроблені програми розрахунку та візуалізації геометричних моделей роторів. Програму розрахунків геометрії лопатей написано мовою програмування Borland Pascal with Objects 7.0. Результатом роботи цієї програми є формування пакетних або *script*-файлів, які містять, крім числової інформації по геометрії профілів, також і відповідні команди середовища проектування AutoCAD.

Візуалізація отриманих результатів з геометричного моделювання взаємоспряжених роторів повітродувки типу Рутс виконувалася в середовищі автоматизованого проектування AutoCAD. Це середовище дозволяє користувачу створювати та редагувати власні меню, програмувати діалогові вікна, а за допомогою команд мови програмування AutoLisp розробляти нові команди або створювати додатки до AutoCAD.

Завантажений в середовище проектування AutoCAD попередньо підготовлений *script*-файл дозволяє відтворити взаємоспряжені ротори повітродувки. Користувач має можливість розглядати результати геометричного моделювання в динаміці, а також бачити взаємоспряжені ротори при довільному куті повороту.

На рис. 5 показані результати візуалізації трилопатевого ротора повітродувки типу Рутс. Ці графічні результати підтверджують працездатність запропонованих підходів до геометричного моделювання взаємоспряжених роторів повітродувки типу Рутс. Розроблені програмні продукти можна пропонувати у практику створення нових повітродувки та модернізації існуючих.

Розроблено метод і програму розрахунків і візуалізації результатів геометричного моделювання взаємоспряжених роторів повітродувки типу Рутс з теоретичними профілями головок і западин, які можуть бути рекомендовані в практику виготовлення відповідних виробів. Подальшим розвитком досліджень цим напрямом слід вважати удосконалення методу моделювання профілів лопатей з урахуванням зазорів в проточній частині повітродувки.

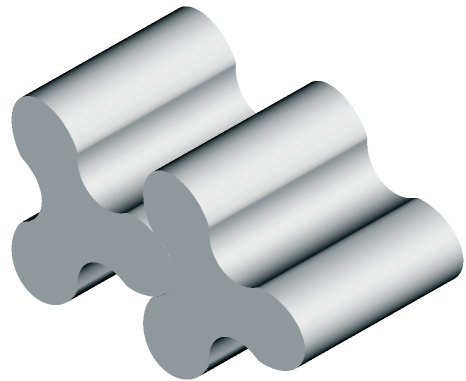


Рис. 5. Результати візуалізації

Список використаних джерел

1. Белов Г. О. Модель воздуходувки Рутса / Г. О. Белов, М. А. Ермилов, А. Н. Крючков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2012. — № 3 (34). — С. 177—182.
2. Кац А. М. Расчет, конструкция и испытания воздуходувок типа Рутс / А. М. Кац. — М.: Машгиз, 1946. — 160 с.
3. Хисамеев И. Г. Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры: Теория, расчет и проектирование / И. Г. Хисамеев, В. А. Максимов. — Казань: ФЭН, 2000. — 638 с.
4. Яминский В. В. Роторные компрессоры. Вопросы профилирования, теории и расчета / В. В. Яминский. — М.: Машгиз, 1960. — 222 с.

Irina USTENKO
Mykolaiv

MODELLING MUTUALLY CONJUGATE ROTORS OF ROOTS BLOWERS

The paper discusses the questions of geometric modelling and visualization of the profiles heads and troughs three-blade rotors Roots blowers. On the basis of the proposed method of geometric modelling mutu-

ally conjugate rotors developed programs written object-oriented language Borland Pascal with Objects 7.0 for calculations and language AutoLisp to form in AutoCAD the spatial images simulated rotors.

Key words: geometric modelling, visualization, rotors are mutually conjugate, Roots-type blower.

Ирина УСТЕНКО

г. Николаев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСOPЯЖЕННЫХ РОТОРОВ ВОЗДУХОДУВOK ТИПА РУТС

В работе рассмотрены вопросы геометрического моделирования и визуализации профилей головок и впадин трехлопастных роторов воздуходувок типа Рутс. На базе предложенного метода геометрического моделирования взаимосопряженных роторов разработаны программы, написанные объектно-ориентированным языком Borland Pascal with Objects 7.0 для проведения расчетов и языком AutoLisp для формирования в среде проектирования AutoCAD пространственного изображения смоделированных роторов.

Ключевые слова: моделирование геометрическое, визуализация, роторы взаимосопряженные, воздуходувка типа Рутс.

Стаття надійшла до редколегії 06.03.2016

УДК 004.413

Сергій УСТЕНКО, Владислав ПРАДЕДОВ

м. Миколаїв

ustenko.s.a@gmail.com, sandapter@gmail.com

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБЛІКУ ТА АНАЛІЗУ ПОТОЧНОЇ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ

Робота присвячена розробці програмного забезпечення у вигляді сервіс-орієнтованого програмного додатку «Електронний журнал» для автоматизації обліку та аналізу поточної успішності студентів. Об'єктами обліку будуть відвідування занять, оцінки з дисциплін за певними видами контролю (з відміткою дати отримання) та показники готовності студентів до здачі сесії. До електронного журналу матиме доступ тільки викладач і його можна буде заповнити тільки під час проведення занять, що спонукає викладача відмічати присутніх і виставляти оцінки своєчасно, оскільки в іншому випадку заняття буде вважатись пропущеним і йому не буде зараховане навчальне навантаження.

Ключові слова: розробка програмного забезпечення, автоматизація обліку та аналізу, поточна успішність студентів, сервіс-орієнтований додаток, служба, клієнт.

Одним з основних завдань навчальної діяльності вищих навчальних закладів є поточний контроль успішності студентів, періодичність якого може змінюватися в залежності від розв'язуваних управлінських задач. Аналіз результатів поточного контролю дозволяє керівництву навчального закладу здійснювати оперативне управління процесом навчання студентів, процесом протікання сесійного контролю, а також підвищити мотивацію студентів і, як наслідок, якість освіти. Для розв'язання таких задач доцільне введення електронного обліку успішності студентів за допомогою електронного журналу.

У більшості випадків проведення аналізу результатів поточного контролю успішності вимагає значних тимчасових витрат, пов'язаних з необхідністю ретельної організації процесів збору і обробки великого обсягу оперативної інформації. В роботі [6] розглянуто процес розробки онтології підсистеми оперативного контролю поточної успішності студентів.

При аналізі існуючих рішень були розглянуті наступні поширені реалізації електронного журналу:

- програмний модуль «ПС-Журнал успішності-Web» (www.politek-soft.kiev.ua/index.php?do=newdevelopments&product=ps-gradebook-web);
- web-сервіс «Електронний журнал» автоматизованої системи управління навчальним закладом (mkr.org.ua/portalinfos/index/1/21);
- Free Dean's Office (Електронний деканат) – модуль для середовища дистанційного навчання Moodle (www.deansoffice.ru).

Існують і інші реалізації електронних журналів, які є закритими і вимагають авторизації, наприклад електронний журнал комп'ютерної академії «Шаг» (new.logbook.itstep.org/login). Описи згаданих систем, як і інші джерела, не містять інформації про моделювання предметної області електронного журналу.

У даній роботі пропонується розробити сервіс-орієнтований програмний продукт, який дозволить автоматизувати задачу обліку поточної успішності студентів, оперативного контролю поточної успішності студентів і дозволить викладачеві працювати з електронним журналом в режимі реального часу.

Кожен семестр складається розклад і вноситься в базу даних електронного журналу. Крім того, в базі даних повинна бути актуальною інформація про студентів.

Користувачами програмного продукту «Електронний журнал» будуть викладачі, які є відповідальними за здійснення контролю знань студентів. Дані користувачі матимуть доступ до відвідуваності та зможуть редагувати й виставляти оцінки студентам.

Загальна схема розроблювального програмного продукту наведена на рис. 1. Він буде складатись зі служби, що буде реалізована у вигляді консольного додатку, та клієнта – WinForms-додаток. Служба буде мати дві кінцеві точки (endpoint) для підключення клієнта (MEX та epLogin). Між службою і клієнтом буде встановлено дуплексний режим підключення.

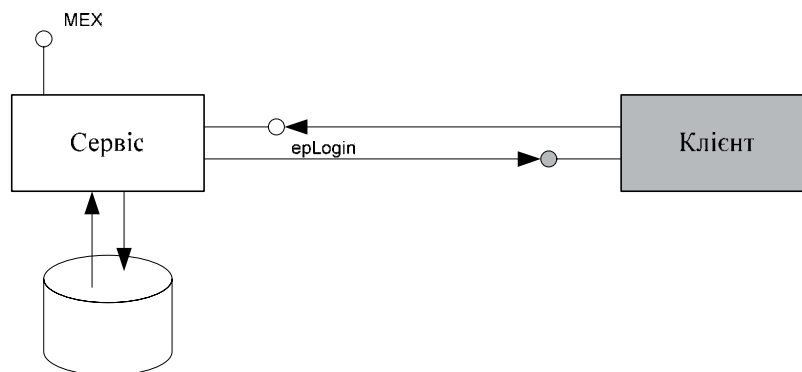


Рис. 1. Архітектура програмного продукту

Крім того, служба буде підключатись до СУБД SQL Server з використанням технології ADO.NET. Клієнт (викладач) матиме наступні можливості:

- підключатись до служби, якщо у нього у розкладі є заняття;
- завершувати роботу зі службою;
- отримувати інформацію про студента;
- відмічати присутність студента на занятті;
- виставляти оцінки студентів.

Служба, завдяки дуплексному режиму підключення, буде періодично поновлювати інформацію у клієнта, зокрема сповіщати його, що почалося або закінчилося заняття.

Таким чином, в результаті аналізу вимог до програмного продукту виявлені наступні сутності:

- розклад занять;
- заняття;

- дисципліна;
- викладач;
- студенти;
- оцінки.

Між даними сутностями існують зв'язки, які можна розділити на дві групи: «один до багатьох» або «багато до одного» (викладач і розклад занять, дисципліна і розклад занять, розклад занять і заняття) та «багато до багатьох» (заняття і студенти, студенти і оцінки). Названі сутності та зв'язки між ними показані на рис. 2.

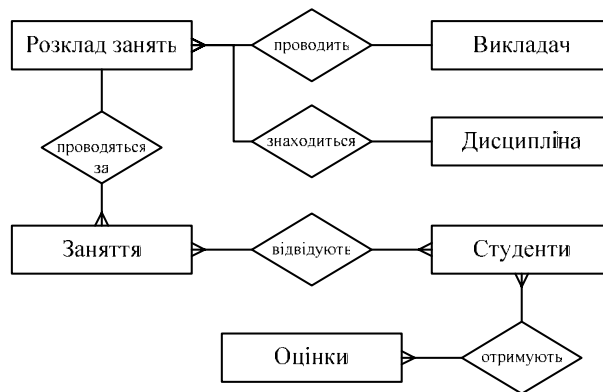


Рис. 2. Концептуальна модель даних

Виходячи із правил перетворення концептуальної моделі в логічну, включаючи перетворення зв'язків багато до багатьох, остання буде мати такий вигляд, як наведено на рис. 3.

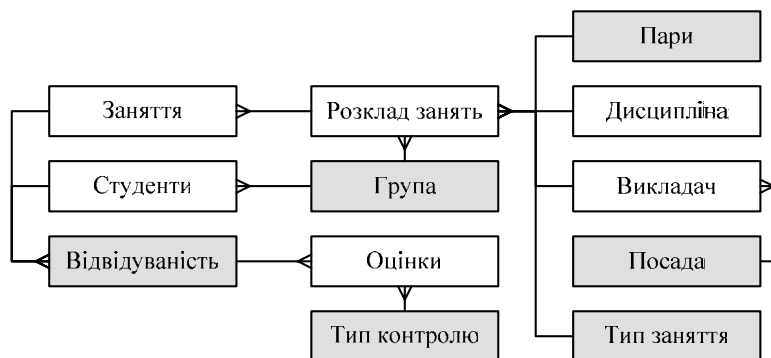


Рис. 3. Логічна модель даних

Якщо порівняти концептуальну модель даних та логічну, то можна побачити, що з'явилося 6 таблиць, що не відповідають сутностям концептуальної моделі, з яких 5 це довідники (пари, група, посада, тип заняття, тип контролю), а шоста – зв'язувальна таблиця «Відвідуваність», за допомогою якої були замінені два зв'язки «багато до багатьох».

Оскільки вище були виконані роботи зі створення логічної моделі бази даних, то можна очікувати, що отримані відношення будуть знаходитись у 2-й і 3-й нормальній формі [8].

Інтерфейс користувача програмного продукту має велике значення. Він повинен бути зручним в роботі користувачу програмного додатку, повинен відображати таку кількість інформації, яку користувач без проблем може сприйняти [1, 5, 10].

При проектуванні інтерфейсу необхідно враховувати ряд особливостей, з якими може зіткнутися користувач програмного забезпечення, такі як розподільча здатність монітору, розмір шрифту тощо. Інтерфейс не повинен містити дуже велику кількість графічних зображень, оскільки це сильно впливає на ресурси додатку.

Інтерфейс користувача для служби буде дуже простий, оскільки служба буде реалізована у вигляді консольного додатку. В процесі роботи служби на консоль буде виводитись інформація про основні події, що відбуватимуться в службі:

- спроба клієнта авторизуватися та її результат;
- запит інформації про студента;
- відмічання присутності студента на занятті;
- виставляння оцінки студентові;
- завершення роботи клієнта.

Клієнт буде мати графічний інтерфейс користувача. Схематично він буде мати вигляд, як на рис. 4. Схема містить 6 основних елементів:

- 1) панель авторизації;
- 2) панель інформації про заняття;

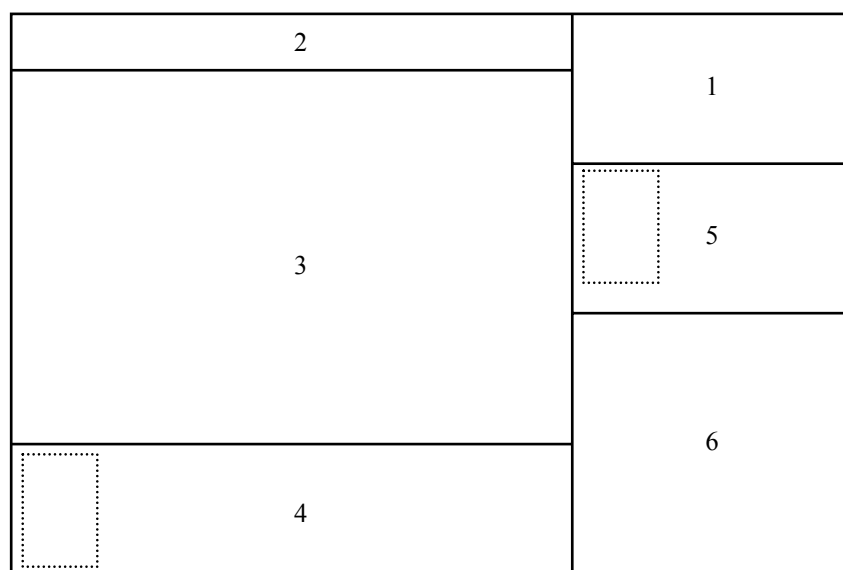


Рис. 4. Схема інтерфейсу користувача клієнта

- 3) список студентів з відміткою при присутності на занятті;
- 4) інформація про викладача;
- 5) інформація про студента вибраного на панелі 3;
- 6) інформація про відмітки отримані студентом на даному занятті.

Інтерфейс користувача буде мати резиновий характер, тобто при зміні розмірів вікна будуть зберігатися основні співвідношення, а саме:

- 1 і 5 елемент будуть залишатися незмінними;
- у 6 елементу незмінною буде тільки ширина;
- у 2 та 4 незмінною буде висота;
- 3 елемент буде займати весь простір, що залишиться.

Для розробки служби потрібно було спочатку розробити інтерфейс взаємодії з клієнтом. На основі вимог до «Електронного журналу», сформульованих вище, було розроблені такі контракти (з урахуванням того, що потрібно забезпечити дуплексний режим):

```
[ServiceContract(CallbackContract=typeof(IJournalCallback))]
interface IJournal
{
    [OperationContract]
    bool IsLogin(string login, string password);
    [OperationContract(IsOneWay = true)]
    void Exit();
    [OperationContract(IsOneWay = true)]
    void SetPresent(int idstudent, bool present);
}
```

```

[OperationContract]
StudentInfo GetStudent(int idstudent);
[OperationContract(IsOneWay = true)]
void SetMark(int idstudent, int idforwhat, int mark);
}

interface IJournalCallback
{
[OperationContract(IsOneWay=true)]
void Schedule(byte[] sched, PairInfo info);
}

```

Як було вже сказано раніше, служба має дві кінцеві точки для підключення клієнта: MEX – стандартний контракт IMetadataExchange для автоматичного налагодження клієнта та epLogin – створений IJournal.

Розроблено клас служби для роботи з клієнтом Journal, що наслідує інтерфейс IJournal та реалізовує його методи, а також створено клас JournalSender, за допомогою якого реалізується дуплексний режим передачі даних, а саме викликається функція оберненого виклику реалізована на клієнті.

У клієнта розроблено клас Server, в якому реалізовано функцію оберненого виклику Schedule, а також обробники події для графічного інтерфейсу користувача.

Всі інші класи, завдяки MEX-точці, автоматично додані до клієнтського проекту програмного продукту. Виклик потрібних методів інтерфейсу IJournal здійснюється за допомогою посередника класу JournalClient, створеного автоматично.

На основі вище наведеного розроблено програмне забезпечення сервіс-орієнтованого додатку «Електронний журнал» об'єктно-орієнтованою мовою програмування C# і складається з двох частин: служби та клієнта.

Служба створена з використанням платформи WCF, завантажується на одному з комп'ютерів локальної мережі факультету або кафедри і має вигляд консольного додатку. На рис. 5 наведено знімок вікна консолі служби при роботі двох викладачів з електронним журналом.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Служба журналу запущена (для завершення нажміть Enter)...
Підключення до MS SQL Server...
Спроба авторизації...
Авторизовано xela...
Журнал для 6 запущено...
Видано інформацію про студента 70 (6)...
У журналі відмічено студента 70 (6)...
Видано інформацію про студента 70 (6)...
Видано інформацію про студента 70 (6)...
Видано інформацію про студента 73 (6)...
У журналі відмічено студента 73 (6)...
Видано інформацію про студента 73 (6)...
Видано інформацію про студента 73 (6)...
Видано інформацію про студента 70 (6)...
У журналі відмічено студента 70 (6)...
Видано інформацію про студента 70 (6)...
Видано інформацію про студента 70 (6)...
У журналі відмічено студента 70 (6)...
Видано інформацію про студента 70 (6)...
Видано інформацію про студента 70 (6)...
Видано інформацію про студента 71 (6)...
Видано інформацію про студента 72 (6)...
Видано інформацію про студента 73 (6)...
Підключення до MS SQL Server...
Спроба авторизації...
Авторизовано valery...
Журнал для 1 запущено...
Видано інформацію про студента 87 (1)...
Видано інформацію про студента 81 (1)...
У журналі відмічено студента 81 (1)...
Видано інформацію про студента 81 (1)...
Видано інформацію про студента 68 (6)...
Видано інформацію про студента 68 (6)...

```

Рис. 5. Робота служби

При розробці клієнтського додатку потрібно спочатку додати посилання на службу для цього потрібно вибрати пункт меню Project => Add Service References..., а вікні, що з'явиться, ввести адресу MEX-точки.

Після цього в проєкті з'являться всі необхідні для роботи класи, в тому числі і посередник JournalClient.

JournalClient host = new JournalClient(Server.site);

Далі потрібно реалізувати функцію оберненого виклику Schedule та реалізувати роботу з інтерфейсом користувача.

На рис. 6 наведено знімок вікна клієнта при роботі з електронним журналом.

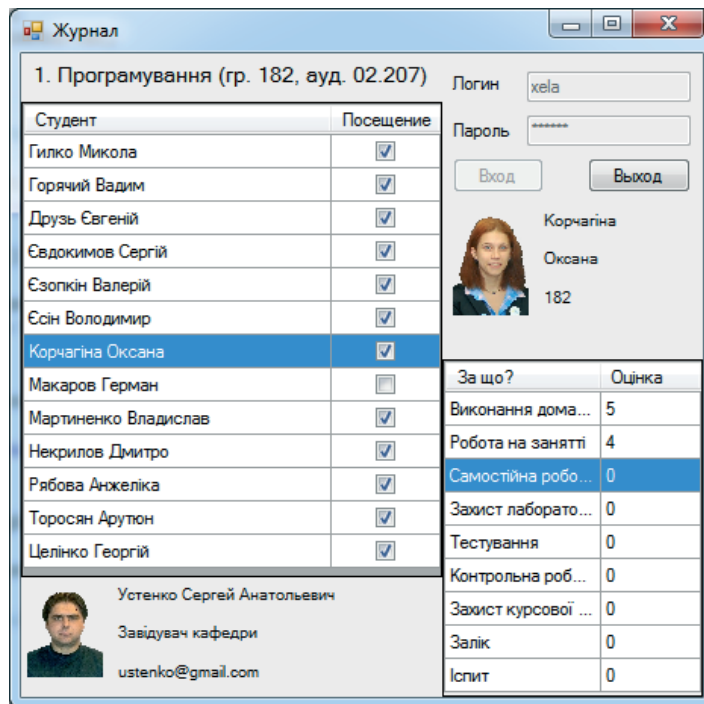


Рис. 6. Робота клієнта

Розроблене програмне забезпечення у вигляді сервіс-орієнтованого додатку Електронний журнал призначене для автоматизації обліку відвідування занять та успішності студентів, що дозволяє викладачеві під час проведення занять відмітити присутніх і виставити їм оцінки. Надалі розроблений програмний продукт планується інтегрувати до запланованої до реалізації системи управління університетом, в якій буде використовуватись спільна база даних.

Список використаних джерел

1. Акчурин Э. А. Человеко-машинное взаимодействие / Э. А. Акчурин. — М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2008. — 96 с.
2. Бокс Д. Основы платформы .NET, Том 1. Общезыковая исполняющая среда / Д. Бокс, К. Селлз. — М. : Издательский дом Вильямс, 2003. — 288 с.
3. Бошечин Б. Основы ADO.NET / Б. Бошечин. — М. : Издательский дом Вильямс, 2003. — 448 с.
4. Вилдермьюс Ш. Практическое использование ADO.NET. Доступ к данным в Internet / Ш. Вилдермьюс. — М. : Издательский дом Вильямс, 2003. — 288 с.
5. Гульяев А. К. Проектирование пользовательского интерфейса / А. К. Гульяев, В. А. Машин. — СПб.: КОРОНА принт, 2000. — 352 с.
6. Керносов М. А. Разработка онтологии подсистемы оперативного контроля текущей успеваемости студентов / М. А. Керносов, О. С. Федоренко // Проблемы інформаційних технологій. — Херсон : ХНТУ, 2014. — № 15. — С. 177—185.
7. Лёве Дж. Создание служб Windows Communication Foundation / Дж. Лёве. — СПб. : Питер, 2008. — 592 с.
8. Мирошниченко Г. А. Реляционные базы данных: практические приемы оптимальных решений / Г. А. Мирошниченко. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 400 с.
9. Робисон У. C# / У. Робисон. — М. : ДМК Пресс, 2005. — 352 с.
10. Торрес Р. Дж. Практическое руководство по проектированию и разработке пользовательского интерфейса / Р. Дж. Торрес. — М. : Издательский дом Вильямс, 2002. — 400 с.
11. Троелсен Э. C# и платформа .NET. Библиотека программиста / Э. Троелсен. — СПб. : Питер, 2006. — 796 с.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR THE AUTOMATION OF THE ACCOUNT OF CURRENT PROGRESS OF STUDENTS

The work is dedicated to the development of software as a service-oriented application software «Electronic Journal» to automate the current progress of students. The objects of the account will be attendance, evaluation of disciplines on certain types of control (with a mark of receipt date) and indicators of readiness of students to pass the session. The e-journal will have access only to the teacher and can be filled only during class, the teacher encourages those present to celebrate and stand assessment in a timely manner, otherwise the sessions will be considered as missing and will not be counted workload.

Key words: software development, automation of accounting and analysis, the current progress of students, service-oriented applications, the service, the client.

Сергей УСТЕНКО, Владислав ПРАДЕДОВ
г. Николаев

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ УЧЕТА ТЕКУЩЕЙ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ

Работа посвящена разработке программного обеспечения в виде сервис-ориентированного программного приложения «Электронный журнал» для автоматизации учета текущей успеваемости студентов. Объектами учета будут посещения занятий, оценки по дисциплинам по определенным видам контроля (с отметкой даты получения) и показатели готовности студентов к сдаче сессии. К электронному журналу будет иметь доступ только преподаватель и его можно будет заполнить только во время проведения занятий, что будет побуждать преподавателя отмечать присутствующих и выставять оценки своевременно, поскольку в противном случае занятие будет считаться пропущенным и ему не будет засчитано учебную нагрузку.

Ключевые слова: разработка программного обеспечения, автоматизация учета и анализа, текущая успеваемость студентов, сервис-ориентированное приложение, служба, клиент.

Стаття надійшла до редколегії 07.03.2016

УДК 514.8

Сергій УСТЕНКО, Олександр СИНЯВІН
м. Миколаїв
ustenko.s.a@gmail.com, alexander-sinyavin@yandex.ua

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОСКОЇ КРИВОЇ ІЗ ПАРАБОЛІЧНОЮ КРИВИНОЮ ПРИ ЗАДАНОМУ ЇЇ ВІДХИЛЕНІ ВІД ЛІНІЙНОГО РОЗПОДІЛУ

Робота присвячена розробці нового підходу до побудови плоскої кривої лінії із параболічною кривиною, для якої задається відхилення кривини від лінійного розподілу кривини. Така задача виникає у випадках коли потрібно впливати на характер розподілу кривини ділянки плоскої кривої лінії, не змінюючи при цьому значення кривини в її граничних точках. Дослідження графіку параболічного розподілу кривини з урахуванням його відхилення від лінійного розподілу дозволило визначити залежності для обчислення невідомих коефіцієнтів параболічного та лінійного розподілів кривини. Запропонований підхід реалізовано у вигляді програмного додатку об'єктно-орієнтованою мовою програмування Object Pascal.

Ключові слова: плоска крива, кривина, розподіл кривини, геометричне моделювання, параболічний розподіл, лінійний розподіл, відхилення.

Дослідження з геометричного моделювання плоских кривих відбуваються в таких галузях: архітектурно-будівельній, раціональному розміщенні об'єктів, металообробці, сільгоспмашинобудуванні, пожежній техніці та технологіях, літакобудуванні, створенні турбін і компресорів тощо.

Існують різні підходи до геометричного моделювання плоских кривих ліній. Один з них, оснований на понятті інтегральної моделі кривої і запропонований в роботі [4], отримав подальший розвиток у роботах вчених та їх учнів Миколаївського осередку Української асоціації з прикладної геометрії, які займаються, зокрема, питаннями геометричного моделювання кривих ліній і поверхонь стосовно лопаткових апаратів турбін і компресорів газотурбінних двигунів. Ці об'єкти мають особливості, обумовлені специфічними умовами роботи, і тому потребують розробки спеціальних підходів до утворення плоских перерізів і на їх основі поверхонь, які обмежують течію робочої речовини, тому в такому випадку важливими характеристиками, що подаються до обводів, є неперервність кривини і скруту (для просторових обводів).

В узагальненому вигляді питання геометричного моделювання просторових і плоских криволінійних обводів висвітлене в роботі [8]. Плоским криволінійним обводам, а також питанням їх моделювання із застосуванням графіків розподілу кривини присвячені також публікації [1–4, 6, 7].

Деякі підходи до формування інтегральних кривих за заданим законом розподілу кривини подані в роботі [1], де пропонується комп'ютерний спосіб моделювання плоских обводів на основі колових сплайнів.

В роботах вчених Миколаївської наукової школи та їх учнів розглядається підхід до геометричного моделювання плоских кривих ліній із застосуванням заданого розподілу кривини [2, 3, 6, 7], при цьому в якості граничних умов для побудови використовуються такі (або їх комбінація): координати початкової, проміжної та кінцевої точок криволінійного обводу, кути нахилу дотичних до плоскої кривої лінії в цих точках або в деяких з них, кривина в заданих точках.

Розподіл кривини задається в загальному вигляді, наприклад в роботі [2] розглядається лінійний, в [3] – параболічний, а в [7] – кубічний. В жодній з розглянутих робіт не пропонується дослідити ділянки плоских кривих ліній при зміні характеру розподілу кривини.

Метою роботи є розробка нового підходу до побудови плоскої кривої лінії із параболічною кривою, для якої задається відхилення кривини від лінійного розподілу кривини. Така задача виникає у випадках коли потрібно впливати на характер розподілу кривини ділянки плоскої кривої лінії, не змінюючи при цьому значення кривини в її граничних точках.

Розглянемо ділянку плоскої кривої лінії, показану на рис. 1 [5], де: S – довжина дуги ділянки; ds – диференціал дуги; $\varphi(0)$ – кут нахилу дотичної в початковій точці; $\varphi(S)$ – кут нахилу дотичної в кінцевій точці кривої.

Цій кривій відповідає деякий графік розподілу її кривини $K(s)$, побудований в залежності від довжини дуги обводу (рис. 2).

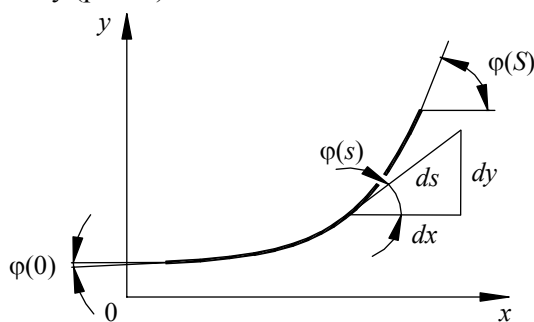


Рис. 1. Ділянка плоскої кривої

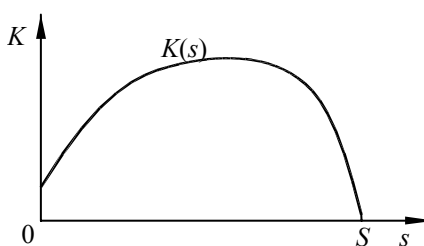


Рис. 2. Графік розподілу кривини

Якщо графік розподілу кривини відомий, то побудувати криву, що йому відповідає, можна без особливих проблем. Дійсно, диференціал дуги ds за відомим значенням кута нахилу дотичної до осі x дорівнює:

$$ds = d\varphi / K(s).$$

Інтегруванням з цього виразу можна знайти кут нахилу дотичної до кривої в довільній її точці:

$$\varphi(s) = \varphi(0) + \int_0^s K(s) ds.$$

Розглянемо випадок [2], коли кривина кривої вздовж дуги обводу s змінюється за лінійним законом (рис. 3).

Оскільки кривина кривої лінійно змінюється від K_1 до K_2 , то запишемо зміну кривини у вигляді рівняння прямої у загальному вигляді:

$$As + BK_1(s) + C = 0,$$

де $A = \frac{K_2 - K_1}{S}$, $B = -1$, $C = K_1$, $K_1(s)$ – залежність кривини від довжини дуги.

Для лінійного закону зміни кривини вздовж кривої обводу формула для обчислення кута нахилу дотичної матиме такий вигляд:

$$\varphi_1(s) = \varphi_1(0) + s \left(\frac{As}{2} + C \right).$$

Розглянемо ділянку плоскої кривої [3], яка генерується за умови, що задано графік параболічного розподілу кривини кривої (рис. 4).

Опишемо криву, показану на рисунку, параболою другого степеня:

$$K_2(s) = as^2 + bs + c,$$

де $K_2(s)$ – параболічна залежність кривини від довжини дуги, $c = K_1$, а інші коефіцієнти знаходяться в залежності $aS + b = \frac{K_2 - K_1}{S}$.

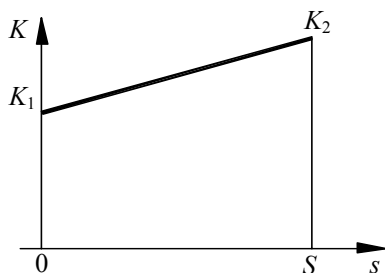


Рис. 3. Графік лінійної залежності кривини від довжини дуги

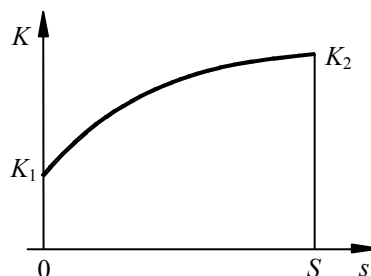


Рис. 4. Графік параболічного розподілу кривини

Кут нахилу дотичної до кривої буде обчислюватись за такою формулою:

$$\varphi_2(s) = \varphi_2(0) + s \left(s \left(\frac{as}{3} + \frac{b}{2} \right) + c \right).$$

Для визначення всіх коефіцієнтів параболічного розподілу кривини розглянемо його відхилення від лінійного розподілу (рис. 5).

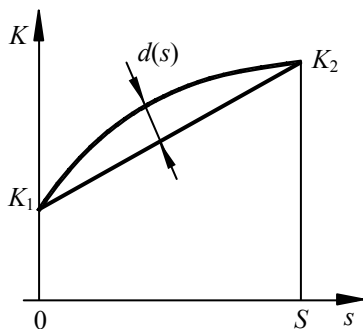


Рис. 5. Відхилення параболічного розподілу кривини від лінійного

Відстань між параболою та прямою лінією в залежності від довжини дуги (з аналітичної геометрії) буде визначатися наступним чином:

$$d(s) = \frac{|As + BK_2(s) + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (1)$$

Відхилення параболічного розподілу кривини від лінійного будемо задавати максимальною відстанню. Для її знаходження знайдемо першу похідну виразу (1):

$$d'(s) = \pm \frac{A + B(2as + b)}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

і прирівняємо її до нуля:

$$A + B(2as + b) = 0.$$

Виразимо значення довжини дуги при якому похідна дорівнює 0 і позначимо параметр s_{\max} :

$$s_{\max} = -\frac{\frac{A}{B} + b}{2a}. \quad (2)$$

Підставимо вираз (2) до (1) і після перетворень знайдемо максимальне відхилення параболічного розподілу кривини від лінійного:

$$d_{\max} = \frac{aS^2}{4}.$$

Звідси невідомий коефіцієнт a параболічного розподілу кривини буде дорівнювати:

$$a = \frac{4d_{\max}}{S^2}.$$

Тоді

$$b = \frac{K_2 - K_1 - 4d_{\max}}{S}.$$

Таким чином, отримано вирази для отримання невідомих коефіцієнтів параболічного розподілу кривини з урахуванням його відхилення від лінійного розподілу.

На рис. 6 показані розподіли кривини для різних значень максимальних відхилень параболічного розподілу кривини від лінійного розподілу. При цьому на рис. 6, а показані розподіли кривини при $d_{\max} = -0,3; -0,4; -0,5$, а на рис. 6, б – при $d_{\max} = 0,3; 0,4; 0,5$. На рисунках порядок перерахування кривини відповідає порядку наведеному в описах до рисунків.

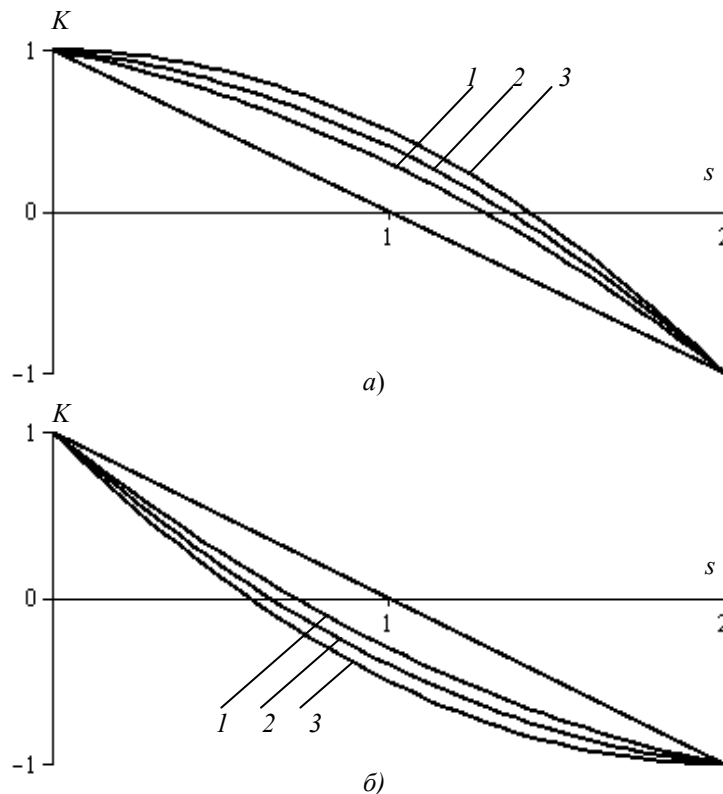


Рис. 6. Розподіли кривини в залежності від максимального відхилення параболічного розподілу кривини від лінійного

Знайдемо рівняння кривої, яка утворюється на базі заданого розподілу кривини. З рис. 1 випливає, що

$$dx = ds \cos \varphi(s); \quad dy = ds \sin \varphi(s).$$

Інтегруванням цих виразів отримаємо параметричне рівняння кривої, в якому за параметр прийнято довжину дуги:

$$x(s) = x(0) + \int_0^s \cos \varphi(s) ds; \quad y(s) = y(0) + \int_0^s \sin \varphi(s) ds,$$

де $x(0), y(0)$ – координати початкової точки кривої.

Ці рівняння є рівняннями клотоїди, а інтеграли обчислюються числовим методом, наприклад, методом Сімпсона.

Параметричне рівняння ділянки криволінійного обводу, отриманого за допомогою лінійного закону зміни кривини, матиме такий вигляд:

$$x_1(s) = x_1(0) + \int_0^s \cos \left(\varphi_1(0) + s \left(\frac{As}{2} + C \right) \right) ds;$$

$$y_1(s) = y_1(0) + \int_0^s \sin \left(\varphi_1(0) + s \left(\frac{As}{2} + C \right) \right) ds,$$

а за допомогою параболічного розподілу кривини – такий:

$$x_2(s) = x_2(0) + \int_0^s \cos \left(\varphi_2(0) + s \left(s \left(\frac{as}{3} + \frac{b}{2} \right) + c \right) \right) ds;$$

$$y_2(s) = y_2(0) + \int_0^s \sin \left(\varphi_2(0) + s \left(s \left(\frac{as}{3} + \frac{b}{2} \right) + c \right) \right) ds.$$

Для аналітичного подання обводу застосуємо параболічний розподіл кривини із заданим відхиленням від лінійного розподілу d_{\max} , невідомими початковим K_1 і кінцевим K_2 значенням кривини та довжиною дуги кривої S .

Запишемо параметричні рівняння кривої і підставимо до них координати початкової і кінцевої точок, довжину дуги та вирази для визначення коефіцієнтів параболічного розподілу кривини. Після перетворень будемо мати наступну систему, яка складається з двох рівнянь:

$$x_1 = x_0 + \int_0^S \cos \left(\varphi_0 + s \left\{ \frac{s}{S} \left[2d_{\max} \left(\frac{2s}{3S} - 1 \right) + \frac{K_2 - K_1}{2} \right] + K_1 \right\} \right) ds;$$

$$y_1 = y_0 + \int_0^S \sin \left(\varphi_0 + s \left\{ \frac{s}{S} \left[2d_{\max} \left(\frac{2s}{3S} - 1 \right) + \frac{K_2 - K_1}{2} \right] + K_1 \right\} \right) ds.$$

У цій системі рівнянь три невідомі величини. Для її числового розв'язання запишемо рівняння визначення кута нахилу дотичної до кривої в кінцевій точці і підставимо в нього вирази для визначення коефіцієнтів параболічного розподілу. Після ряду перетворень отримаємо формулу для визначення кривини в кінцевій точці кривої:

$$K_2 = 2 \left(\frac{\Delta \varphi}{S} + \frac{2}{3} d_{\max} \right) - K_1.$$

Дану формулу підставимо до системи параметричних рівнянь кривої, отриману раніше, і після перетворень будемо мати:

$$x_1 = x_0 + \int_0^S \cos \left(\varphi_0 + \frac{s^2}{S} \left[\frac{\Delta\varphi}{S} - K_1 - \frac{4}{3} d_{\max} \left(1 - \frac{s}{S} \right) \right] + K_1 s \right) ds ;$$

$$y_1 = y_0 + \int_0^S \sin \left(\varphi_0 + \frac{s^2}{S} \left[\frac{\Delta\varphi}{S} - K_1 - \frac{4}{3} d_{\max} \left(1 - \frac{s}{S} \right) \right] + K_1 s \right) ds .$$

Отриману систему рівнянь можна розв'язати тільки числовим методом, наприклад, методом Ньютона. Але для цього потрібно визначити похідні рівнянь по невідомим параметрах S і K_1 :

$$\frac{\partial f_1}{\partial K_1} = -\frac{1}{S} \int_0^S s(S-s) \sin \Phi(s) ds ;$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial K_1} = \frac{1}{S} \int_0^S s(S-s) \cos \Phi(s) ds ;$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial S} = \frac{1}{S} \int_0^S \left[\cos \Phi(s) - \left(S \frac{\partial \Phi}{\partial S} + s \frac{\partial \Phi}{\partial s} \right) \sin \Phi(s) \right] ds ;$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial S} = \frac{1}{S} \int_0^S \left[\sin \Phi(s) + \left(S \frac{\partial \Phi}{\partial S} + s \frac{\partial \Phi}{\partial s} \right) \cos \Phi(s) \right] ds ,$$

де

$$\Phi(s) = \varphi_0 + \frac{s^2}{S} \left[\frac{\Delta\varphi}{S} - K_1 - \frac{4}{3} d_{\max} \left(1 - \frac{s}{S} \right) \right] + K_1 s ;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial S} = \frac{s^2}{S^2} \left[-\frac{2\Delta\varphi}{S} + K_1 + \frac{4}{3} d_{\max} \left(1 - \frac{2s}{S} \right) \right]$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial s} = \frac{2s}{S} \left[\frac{\Delta\varphi}{S} - K_1 - 2d_{\max} \left(\frac{2}{3} + \frac{s}{S} \right) \right] + K_1 .$$

Для практичної реалізації запропонованої методики побудови криволінійного обводу заданої кривини, розроблено програмне забезпечення мовою об'єктно-орієнтованого програмування Object Pascal в середовищі візуального проектування Delphi.

На рис. 7 показані криві лінії, які моделювалися при змінному значенні максимального відхилення параболічного розподілу кривини від лінійного розподілу.

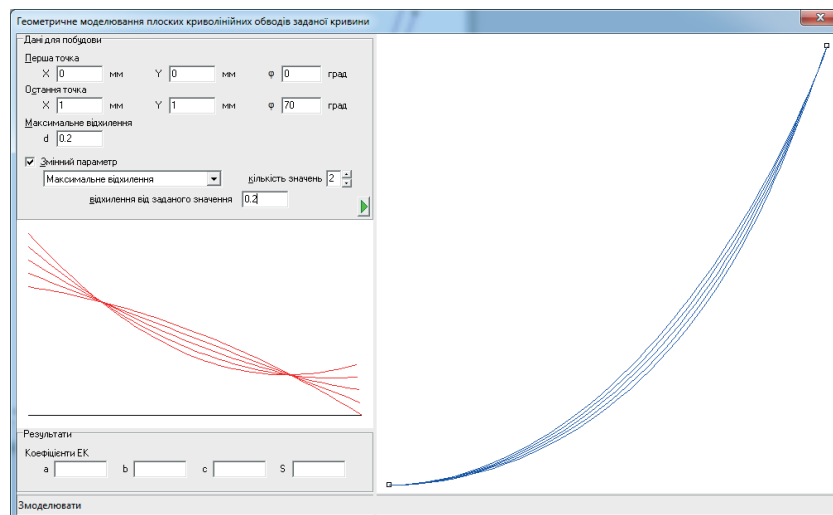


Рис. 7. Криві отримані для різних значень максимального відхилення параболічного розподілу кривини від лінійного розподілу

У результаті геометричного моделювання плоскої кривої із параболічною кривиною при заданому її відхиленні від лінійного розподілу отримано систему параметричних інтегральних рівнянь, що описує дану криву і забезпечує її проходження через дві точки з заданими в них кутами нахилу дотичних. Подальші дослідження будуть спрямовані в напрямі знаходження оптимального значення максимального відхилення параболічного розподілу кривини від лінійного відхилення.

Список використаних джерел

1. Бадаєв С. Ю. Криволінійний обвід за заданим законом кривини на основі колового сплайну / С. Ю. Бадаєв // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К. : КНУБА, 2002. — Вип. 71. — С. 172—177.
2. Борисенко В. Д. Геометричне моделювання плоских кривих із застосуванням лінійного елемента кривини / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, В. Є. Спіцин // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К. : КНУБА, 2006. — Вип. 76. — С. 43—49.
3. Борисенко В. Д. Геометричне моделювання плоских криволінійних обводів за заданим параболічним законом розподілу їх кривини / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, В. С. Комар // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип. 4 Прикладна геометрія та інженерна графіка. — Мелітополь : ТДАТУ, 2007. — Том 35. — С. 26—31.
4. Михайленко В. Є. Дискретне моделювання на базі інтегральної моделі кривої / В. Є. Михайленко, В. Г. Лі // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К. : КНУБА, 1999. — Вип. 66. — С. 3—8.
5. Устенко С. А. Геометрична теорія моделювання криволінійних форм лопаткових апаратів турбомашин з оптимізацією їх параметрів: дис. ... доктора техн. наук: 05.01.01 / Устенко Сергій Анатолійович. — К. : 2013. — 349 с.
6. Устенко С. А. Геометричне моделювання плоских кривих з заданою кривиною в граничних точках / С. А. Устенко // Вестник Херсонського національного технічного університету. Вип. 3(50). — Херсон : ХНТУ, 2014. — С. 619—623.
7. Устенко С. А. Дослідження кривих ліній, заданих кубічним розподілом кривини / С. А. Устенко, С. В. Діданов, О. Ю. Агарков // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. — Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТ, 2014. — № 2 (50). — С. 164—172.
8. Фокс А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт. — М. : Мир, 1982. — 304 с.

Serhiy USTENKO, Oleksandr SYNIIVIN
Mykolaiv

GEOMETRIC MODELLING PLANE CURVES WITH A PARABOLIC CURVATURE UNDER SET ITS DEVIATION FROM THE LINEAR DISTRIBUTION

The work is dedicated to the development of a new approach to the construction of a plane curve line with a parabolic curvature for which curvature is defined by the deviation from the linear distribution of curvature. This problem arises in cases when it is necessary to influence the curvature distribution of the character portion of the flat curve, without changing the value of the curvature in its limit points. Analysis graphics of the parabolic curvature distribution because of its deviation from the linear distribution possible to determine the dependence for calculating the unknown coefficients of the linear parabolic and the curvature distributions. This approach is implemented as a software application on the object-oriented programming language Object Pascal.

Key words: plane curve, curvature, curvature distribution, geometric modelling, parabolic distribution, linear distribution, the deviation.

Сергей УСТЕНКО, Александр СИНЯВИН
г. Николаев

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОЙ КРИВОЙ С ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ КРИВИЗНОЙ ПРИ ЗАДАННОМ ЕЕ ОТКЛОНЕНИИ ОТ ЛИНЕЙНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Работа посвящена разработке нового подхода к построению плоской кривой линии с параболической кривизной, для которой задается отклонение кривизны от линейного распределения кривизны. Такая задача возникает в случаях, когда нужно воздействовать на характер распределения кривизны участка плоской кривой линии, не меняя при этом значение кривизны в ее предельных точках. Исследование графика параболического распределения кривизны с учетом его отклонения от линейного распределения позволило определить зависимости для вычисления неизвестных коэффициентов параболического и линейного распределений кривизны. Предложенный подход реализован в виде программного приложения на объектно-ориентированном языке программирования Object Pascal.

Ключевые слова: плоская кривая, кривизна, распределение кривизны, геометрическое моделирование, параболическое распределение, линейное распределение, отклонение.

Стаття надійшла до редколегії 06.03.2016

ПОБУДОВА ДИСКРЕТНО-ІНТЕРПОЛЯЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ, СИСТЕМ ТА СЕРЕДОВИЩ

Наведена побудова дискретно-інтерполяційних геометричних моделей складних об'єктів, систем та середовищ на основі нетрадиційного дискретно-інтерполяційного підходу.

Ключові слова: інтерполяція, однопараметрична множина, вузол інтерполяції, дискретні функції, багатовимірні інтерполяція, дискретно-інтерполяційна матриця.

Проектування різноманітних, складних за формою технічних об'єктів у теперішній час доволі не проста задача у зв'язку з тим, що сучасні технології неперервно розвиваються та ускладнюються. А це, в свою чергу, впливає на зростання рівня вимог щодо раціональності та якості кінцевого результату проектування й подальшого виготовлення. У переважній більшості випадків інженерного проектування йдеться про моделювання досить складних криволінійних технічних форм у вигляді певних поверхонь. Необхідно зазначити, що часто такі складні технічні форми практично не піддаються аналітичному опису, і, відповідно, не можливо отримати аналітичні континуальні моделі таких поверхонь. Тому пошук і створення математичних моделей таких об'єктів є досить актуальною задачею.

Моделювання прогнозованого стану багатопараметричних систем та середовищ, наприклад, екологічних, енергетичних, кліматичних, гідрологічних, геоморфологічних, геологічних систем, також є надзвичайно складною задачею. Такі системи або середовища мають доволі складну структуру, велику кількість різноякісних параметрів. Пошук та створення математичних моделей таких систем є ще більш складною задачею. В умовах сучасної глобальної кризової ситуації деструктивного впливу людини на навколишнє середовище дослідження, пов'язані з розвитком методів моделювання складних багатопараметричних процесів, систем та середовищ, прогнозуванням стану таких систем набувають особливого значення. Зрозуміло, їх моделювання, прогнозування, контроль стану різних компонентів можна віднести до багатопараметричних і стохастичних процесів. Цілком очевидно, що моделювання систем та середовищ, які не піддаються аналітичному опису, за допомогою континуальних моделей неможливе. Більш того, параметри таких систем є суттєво неоднорідними й часто залежать від зовнішніх факторів, які інколи просто неможливо передбачити.

Досить важливим є той фактор, що певні параметри чи компоненти багатопараметричних систем та середовищ вимірюються в певний час та в певному місці, тобто така інформація носить яскраво виражений дискретний характер. Тому питання розробки раціональних алгоритмів побудови геометричних моделей сучасних технічних об'єктів у вигляді складних криволінійних поверхонь, математичних моделей багатопараметричних систем та середовищ, алгоритмів прогнозування їх стану та стану окремих компонентів є дуже актуальними.

У літературі досить рідко зустрічаються окремі випадки розглядання питань геометричного моделювання багатопараметричних систем і середовищ, а також побудови їх математичних моделей. Особливо це стосується таких багатопараметричних систем і середовищ, як, наприклад, екологічні системи, які відрізняються великою кількістю різноманітних і різноякісних параметрів, і для яких аналіз та прогнозування стану, як вже зазначалося, є вкрай важливими практичними задачами. Зазначимо, що алгоритми та методи геометричного моделювання складних багатопараметричних систем з побудовою їх математичних моделей у літературних джерелах практично відсутні, звідки й випливають наступні цілі дослідження.

Метою даного дослідження є вивчення складних багатопараметричних об'єктів, процесів та середовищ, розробка алгоритмів побудови, методів та дискретних математичних моделей щодо моделювання складних багатопараметричних систем.

У багатьох задачах геометричного моделювання об'єктів, процесів та систем виникає необхідність побудови деякої однопараметричної множини. Таким об'єктом може бути певна поверхня, як геометрична модель складної просторової криволінійної технічної форми, що застосовуються у техніці, будівництві, архітектурі. Також це може бути деяка гіперповерхня, як n -вимірний модель певного середовища, що задана аналітично чи дискретно.

Цілком логічним є припущення, що математична модель таких поверхонь може й повинна бути дискретною. Дискретний спосіб представлення геометричної інформації про об'єкт, що моделюється, є найбільш універсальним та добре відомим фактом. Будемо вважати дискретний підхід більш загальним, тому що від континуальної моделі практично завжди можна перейти до дискретної. У межах даного дослідження розглядається випадок переходу до такої моделі, а саме до дискретно-інтерполяційної геометричної моделі.

Дана робота розглядає підхід, який є, по-перше, нетрадиційним, щодо моделювання складних технічних криволінійних об'єктів на основі дискретно-інтерполяційного підходу, по-друге, дає можливість отримати геометричні моделі таких об'єктів та алгоритми їх побудови. Саме розробка нетрадиційних та оптимальних методів геометричного моделювання складних поверхонь, як моделей складних технічних об'єктів та форм, і робить дану роботу актуальною.

Геометричні моделі зазначених об'єктів будуються як деякі однопараметричні множини, для чого використовуються певні інтерполяційні схеми, а саме інтерполяційні поліноми Лагранжа, які дають можливість отримати дискретні геометричні моделі різних криволінійних поверхонь із врахуванням наперед заданих умов щодо форми. Доцільність такого підходу та використання поліномів Лагранжа описані у попередніх роботах автора [1, 2, 3].

Вибір інтерполяційних поліномів Лагранжа є раціональним, і це обумовлено відносною простотою у використанні, необов'язковою, і це дуже важливо, рівномірністю розташуванням вузлів інтерполяції, можливістю представлення по кожній змінній своєї кількості вузлів інтерполяції.

Підкреслимо, що нетрадиційність підходу, який розглядається, полягає у тому, що під вузлами інтерполяції розуміються не точки, а більш складні об'єкти, наприклад, лінії, поверхні, матриці, тензори, або ж, навіть, певні процеси, системи та середовища, що представлені у вигляді деяких функціоналів, як сукупності їх властивостей та параметрів. Схему розташування саме таких вузлів ми й розуміємо під схемою інтерполяції.

Однопараметричні множини, як деяка сукупність, навіть, різноякісних і різноструктурних параметрів, отримані таким чином, саме й є дискретними математичними моделями таких процесів, систем та середовищ. Елементом таких множин є деяка дискретна функція або функціонал, що у загальному випадку може бути представлена, як дискретний чисельний масив, розмірність якого може варіюватись. Тоді інтерполювання функцій, що можуть бути задані неявно чи параметрично, зводиться до розміщення у вузлах інтерполяції рівнянь, якщо можливий аналітичний спосіб завдання, чи дискретних масивів та отримання деякого функціонала з вектором певних параметрів.

Інтерполювання зазначених вище об'єктів зводиться до розміщення у вузлах інтерполяції певних базових функцій – дискретних масивів. Це дає можливість отримати деякий функціонал $\Phi(\mathbf{p}_{i,j})$, з вектором параметрів, що включає в себе інтерполяційний параметр, координатні змінні, параметри, що характеризують форму та положення об'єктів, певні параметричні характеристики процесів тощо.

Отримані таким чином однопараметричні множини є дискретними математичними моделями деяких багатопараметричних об'єктів і навіть процесів, а функціонал $\Phi(\mathbf{p}_{i,j})$ є елементом таких множин. Для створення геометричних моделей та розробки алгоритмів їх побудови у нашому випадку використовувалися прямі та криві лінії. Саме ці лінії й виступали у ролі базових вузлових функцій.

Наприклад, проектування автомобільних шляхів та тунелів є достатньо складною інженерною задачею, що залежить від багатьох умов та параметрів, таких, як рельєф місцевості, кліматичні умови, якості будівельних матеріалів. Можна стверджувати, що йдеться про моделювання певних технічних об'єктів за наперед заданими умовами. Все це накладає особливі вимоги до проектування таких об'єктів. Також зазначимо, що розробка таких геометричних моделей та алгоритмів їх побудови розглянуті у літературі вкрай недостатньо.

Деякі види вузлових функцій приведені на рисунку 1. Вони фактично являють собою певні пласкі перерізи криволінійних поверхонь технічних форм, таких, як автомобільні шляхи та тунелі. Перші

три лінії є профілем (прямого, опуклого, угнутого) автомобільного полотна, а для моделювання тунелів використовуються лінії замкнутого контуру.

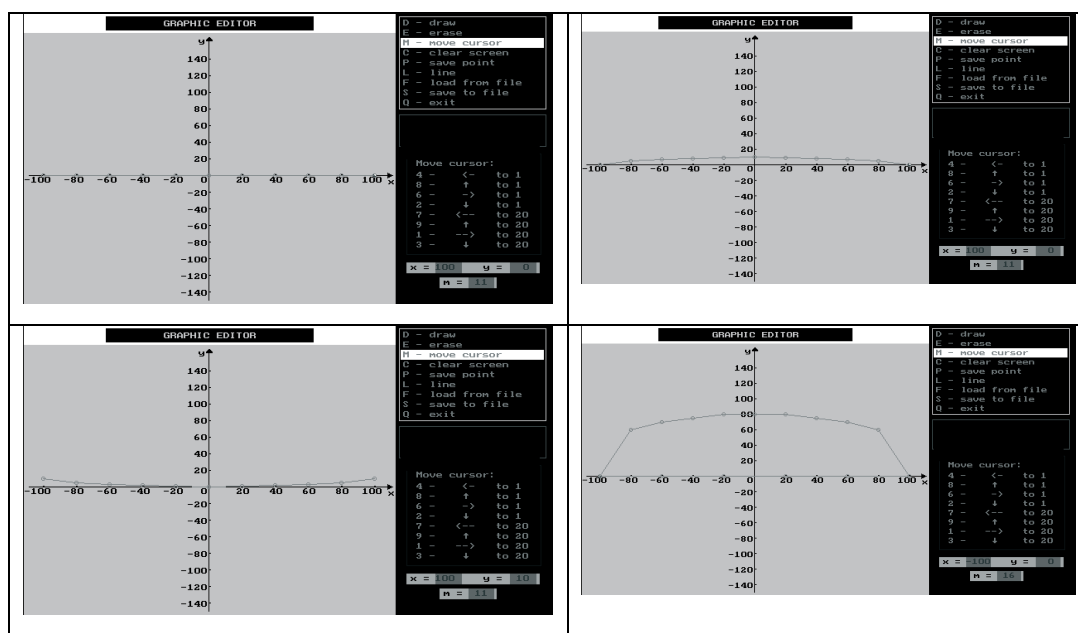


Рис. 1. Моделювання вузлових функцій

Деякий функціонал $\Phi(p_{i,j})$ може бути заданий матрицею $M[i, j]$.

$$F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_k, \dots, p_m) = M[i, j] \quad (1)$$

Використуємо інтерполяційний поліном Лагранжа, розглядаючи (1) у якості певного вузла інтерполяції. На випадок одновимірної інтерполяції отримаємо $M[i, j]$ як

$$M_n[i, j] = \sum_{i=0}^{n-1} M_i(i, j) \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} \frac{u - u_j}{u_i - u_j} \quad (2)$$

де n – кількість вузлів інтерполяції, u – параметр $M_i[i, j]$, відповідний проміжному перерізу поверхні, що моделюється.

Автором було розроблено відповідне програмне забезпечення, що дало можливість сформувати вузлові функції (див. рис. 1). Таким чином фактично були отримані дискретні чисельні моделі вузлових функцій. Ці лінії моделюються певної визначеної форми, досить легко можуть бути сформовані, що саме й дозволяє врахувати вимоги щодо наперед заданих умов локальних форм, наприклад автомобільного шляху. Тоді поверхня автомобільного полотна може бути представлена дискретним лінійчатим каркасом ліній, що являють собою її умовні перерізи. У випадку тунелю вузлова функція є замкнутою, проте також дозволяє врахувати певні локальні особливості такої інженерної споруди щодо форми.

Як було зазначено вище, кількість вузлів базових функцій може бути різною, що обумовлено суто практичними питаннями проектування. Наразі у програмному забезпеченні передбачена й така можливість у вигляді розробленого алгоритму методу вирівнювання кількості вузлових точок на вузлових функціях.

Моделюючий блок розробленого автором програмного забезпечення дає можливість отримати геометричні моделі певних ділянок автомобільних шляхів та тунелів. Приклади побудови різних ділянок автомобільних шляхів наведені на рисунку 2.

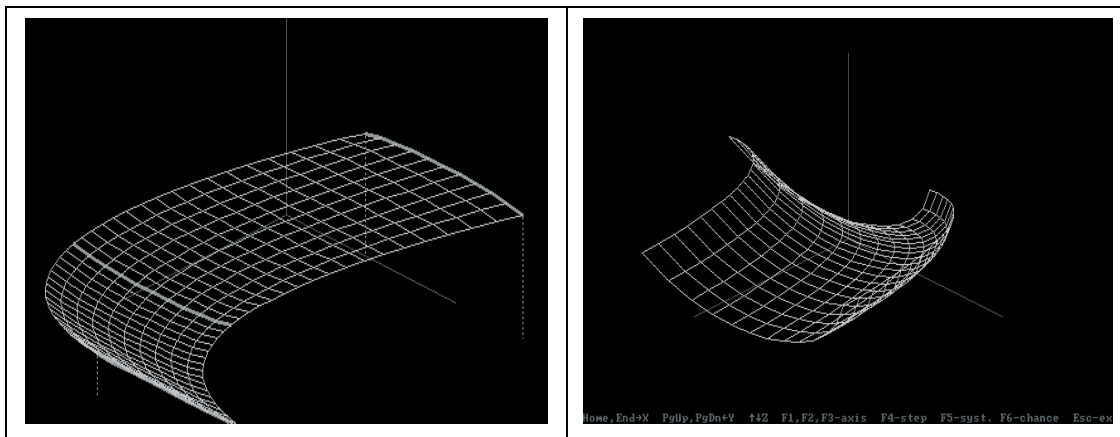


Рис. 2. Побудовані геометричні моделі ділянок автошляхів

При моделюванні вузлових функцій можна врахувати специфічні умови щодо геометричної форми профілю полотна, особливо на таких ділянках, де суттєво змінюється геометрія траси, наприклад, закруглення, різкі повороти, перепади по висоті тощо. Досить непростим моментом є визначення схеми інтерполяції, тобто кількості її вузлів та їх розташування, що пов'язано з питаннями проектування та технологічними умовами.

Щодо проектування тунелів необхідно моделювати різного роду каналові поверхні. Запропонований підхід та метод дозволяє відносно просто отримати геометричні моделі тунельних переходів з наперед заданими конструктивними умовами. Необхідно підкреслити, що водночас можна моделювати, як геометричні параметри форми тунелю, так і геометрію полотна автошляху. На рисунку 3 наведені приклади побудови деяких геометричних моделей окремих ділянок тунельного типу.

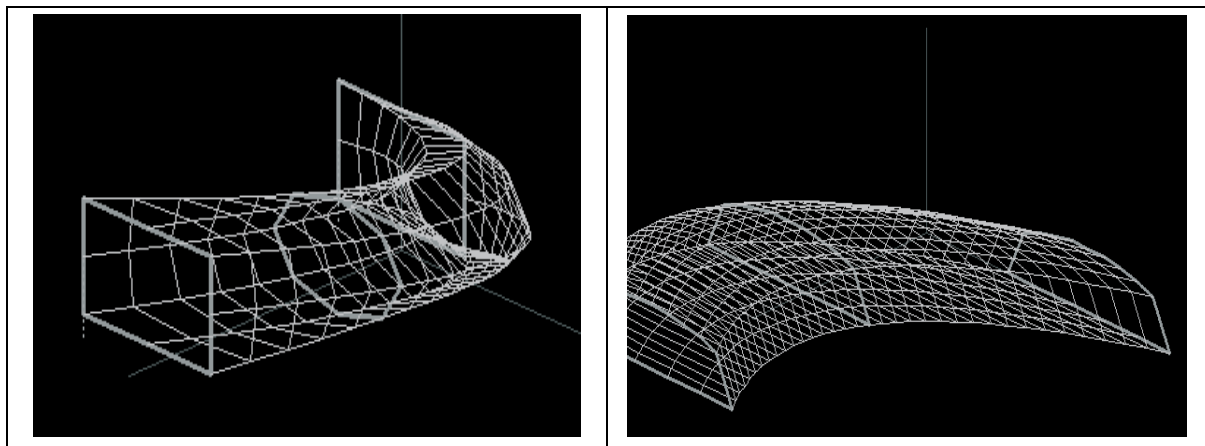


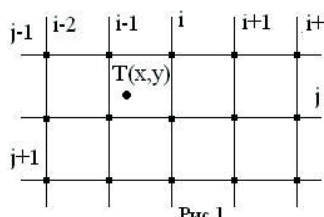
Рис. 3. Побудовані геометричні моделі ділянок тунелів

Вузлові функції можуть змінювати своє положення у просторі у відповідних носіях-площинах, які, в свою чергу, також можуть змінювати своє положення, впливаючи таким чином безпосередньо на схему інтерполяції і, відповідно, на кінцевий результат моделювання.

Багатопараметричні системи та середовища, на прикладі екологічних систем, можуть бути настільки складними структурно й параметрично, що використання апарату одновимірної інтерполяції може виявитися недостатнім. Тому у таких випадках доцільно використати, наприклад, апарат двовимірної інтерполяції. Враховуючи запропонований дискретно-інтерполяційний метод моделювання, власне, ось у чому полягає його сутність.

У випадку двовимірної інтерполяції можна знайти вид степеневого многочлена $\Phi_{m,n}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ степеня m по \mathbf{u} та n по \mathbf{v} , та визначити значення функціонала F у довільній точці з параметрами (\mathbf{u}, \mathbf{v}) . Геометрично це означає, що при двовимірній інтерполяції через вузлові точки проходить деяка поверхня $z = \Phi_{m,n}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$.

Якщо побудувати регулярну сітку та задати у вузлах сітки значення функції z , то вся площадка розпадається на $m \cdot n$ прямокутників, в один з яких і потрапить точка (u, v) (рис.1). Відбувається інтерполяція при різних u_i , но фіксованих v_j , після чого необхідно перейти до v_{j+1} і повторити знову всю процедуру. Отже, отримуємо 2-вимірну інтерполяцію $\Rightarrow P_{m,n}(x, y)$ степеня m по x і степеня n по $y \Rightarrow z(x, y)$ у довільній точці $T(x, y)$. Через вузлові точки проводиться деяка поверхня $z = P_{m,n}(x, y)$. Отримуємо таку формулу для двовимірної інтерполяції за Лагранжем:



$$P_{m,n}(x, y) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} z(x_j, y_j) \prod_{\substack{p=0 \\ p \neq i}}^{m-1} \prod_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^{n-1} \frac{(x - x_i)(y - y_j)}{(x_p - x_i)(y_q - y_j)} \quad (3)$$

Розглянемо тепер побудову моделей багатопараметричних середовищ. Нехай $F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_k, \dots, p_m)$ – багатопараметрична неявно задана функція. Сформуємо її у вигляді деякого функціонала $\Phi(p_{i,j})$, що заданий матрицею $M[i, j]$.

$$F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_k, \dots, p_m) = M[i, j],$$

де $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k, \dots, p_m$ – екологічні різноструктурні та різноякісні параметри (показники забруднення, рівень концентрації певних речовин, урахування природніх особливостей тощо), а

$$M[i, j] = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m,1} & p_{m,2} & \dots & \dots & p_{m,n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Тобто, $M[i, j]$ і є вузлова дискретно-інтерполяційна екологічна матриця.

Розглядаючи (4) як певний вузол інтерполяції, використаємо інтерполяційний поліном Лагранжа та, у випадку одновимірної інтерполяції отримаємо $\Phi(p_{i,j})$ як

$$\Phi(p_{i,j}) = \sum_{i=0}^{n-1} M_i(i, j) \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} \frac{u - u_j}{u_i - u_j} \quad (5)$$

де u – параметр інтерполяції, наприклад, певний вектор направленості; n – кількість вузлів інтерполяції.

Вираз (5), який являє собою узагальнену дискретно-інтерполяційну екоматрицю, і є дискретно-інтерполяційна геометрична модель певної екологічної системи або екологічного середовища.

Важливим фактором є введення певного критерію інтерполяції. Це пов'язано з тим, що, інтерполяційний поліном фактично є зрізаним рядом (аналогом ряду Тейлора) у наслідок того, що він обмежений степенем n і для його збіжності необхідно спадання абсолютної величини коефіцієнта при u з ростом степеня u . Критерієм гарної апроксимації у випадку багатовимірної інтерполяції є спадання абсолютних величин похідних по всім змінним із зростанням їх порядку.

У перспективі зазначимо, що застосування такого підходу щодо моделювання різних об'єктів, явищ і середовищ, що характеризуються великою кількістю різноякісних параметрів, є раціональним.

Таким чином, використовуючи запропонований дискретно-інтерполяційний підхід, на основі дискретно-інтерполяційних однопараметричних множин ми отримали можливість моделювати складні геометричні форми технічних об'єктів у вигляді поверхонь, будувати дискретні математичні моделі досить складних багатопараметричних систем, процесів та середовищ, що характеризуються великою кількістю параметрів та властивостей, які можуть мати не тільки різноманітну структуру, але й певну анізотропність властивостей у часі й просторі. З точки зору алгоритмізації процесу метод є оптимальним щодо формоутворення та моделювання з великими можливостями варіативності.

Список використаних джерел

1. Холковський Ю. Р. Інтерполяція дискретних масивів у загальному випадку як спосіб моделювання багатопараметричних об'єктів та процесів / Ю. Р. Холковський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. — Мелітополь : ТДАТУ, 2011. — Вип. 4 — Т. 51. — С. 156—160.
2. Холковський Ю. Р. Моделювання складних просторових форм із використанням дискретно-інтерполяційного підходу // Труды 14-й Международной научно-практической конференции «Современные проблемы геометрического моделирования». — Мелітополь : ТДАТУ, 2012. — С. 51—57.
3. Холковський Ю. Р. Дискретно-інтерполяційний похід при моделюванні багатопараметричних екологічних систем // Сборник материалов 9-ой Международной конференции «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики». — Минск 2013. — С. 268—272.
4. Холковський Ю. Р. Побудова геометричних моделей технічних об'єктів із використанням дискретно-інтерполяційного підходу // Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання». — Мелітополь, 2014. — Вип. 1. — С. 138—143.

Yuriy KHOLKOVSKY

Kyiv

THE CONSTRUCTION OF THE DISCRETE INTERPOLATION OF MULTIVARIABLE MODELS OF OBJECTS, SYSTEMS AND ENVIRONMENTS

Given the construction of discrete interpolation geometric models of complex objects, systems and environments based on the non-traditional discrete-interpolation approach.

Key words: interpolation, one-parameter set, the host interpolated, discrete features, multivariate interpolation, discrete-interpolation matrix.

Юрий ХОЛКОВСКИЙ

г. Киев

ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНО-ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, СИСТЕМ И СРЕД

Рассмотрено построение дискретно-интерполяционных геометрических моделей сложных объектов, систем и сред на основе нетрадиционного дискретно-интерполяционного подхода.

Ключевые слова: интерполяция, однопараметрическое множество, узел интерполяции, дискретные функции, многомерная интерполяция, дискретно-интерполяционная матрица.

Стаття надійшла до редколегії 29.02.2016

МЕТОД БАРИЦЕНТРИЧЕСКОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА КОНЕЧНОМ ЭЛЕМЕНТЕ T21

В статье описан универсальный метод барицентрической конденсации для треугольного конечного элемента T21, в котором количество граничных узлов равно 15, а внутренних – 6. Данный метод позволяет избавиться от внутренних узлов. Это дает нам полное представление о природе барицентрической редукции. Также в статье представлено формализацию получения спектра узловых нагрузок, используя методику расчета пяти базисных функций. Другие случаи (T10, T15, T28) аналогичны. Результаты экспериментов со случайными блужданиями и гипотеза диффузионного пятна подсказывают, что в угловых узлах нагрузки следует уменьшать, а в ближайших к барицентру узлах – увеличивать. Полученные результаты моделирования показали преимущества предложенного подхода.

Ключевые слова: конечный элемент, треугольник высшего порядка, расчетный узел, барицентрическая конденсация.

В статье рассматривается треугольный конечный элемент с общим числом равномерно расположенных узлов – 21. Граничных узлов – 15, внутренних – 6. Такой элемент называют треугольником 5-го порядка. В методе конечных элементов (МКЭ) по известным причинам стремятся избавиться от внутренних узлов, сохранив при этом межэлементную непрерывность [1; 2; 4]. МКЭ может быть обобщен практически на неограниченный класс задач благодаря тому, что позволяет использовать элементы различных форм для получения сеточных разбиений нерегулярных областей. Размеры конечных элементов в разбиении могут различаться в десятки раз. Нагрузки и граничные условия могут иметь произвольный вид [1; 2]. Процедура устранения внутренних узлов называется конденсацией [8]. Ниже представляется универсальный способ конденсации, пригодный для всех конечных элементов высших порядков.

Чтобы не сталкиваться с явлением физической неадекватности спектра узловых нагрузок на границе КЭ (проблема Эргатудиса-Айронса-Зенкевича), мы с самого начала рекомендуем физически обоснованные «рецепты» распределения внутренней нагрузки (дуге моды) по граничным узлам.

Такой подход в принципе исключает противоестественные «рецепты» конденсации типа Джордана на квадрате (1970) или типа Сьярле-Равьяра на треугольнике (1972). Об этих «рецептах» можно также прочитать, например, в книге [5]. Альтернативным подходам посвящены статьи [3; 7].

Элемент T21 показан на рис. 1.

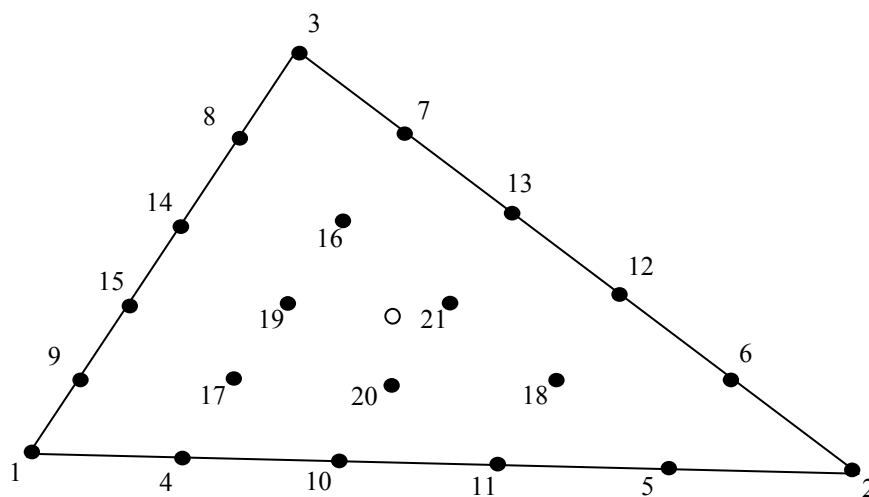


Рис. 1. Треугольник 5-го порядка
(светлый кружок – барицентр элемента)

Чтобы получить спектр узловых нагрузок, используем формулы интегрального усреднения базисных функций (коэффициентов Лагранжа):

$$\gamma_i = \frac{1}{S} \iint_D N_i(x, y) dS, i = \overline{1, 21}, \quad (1)$$

где γ_i – узловая доля единичной нагрузки от равномерной массовой силы; D – область интегрирования (треугольник 123); S – площадь КЭ, $N_i(x, y)$ – базисная функция, которая ассоциируется с узлом i . Базисные функции должны удовлетворять интерполяционной гипотезе Лагранжа:

$$N_i(x_k, y_k) = \begin{cases} 1, i = k, \\ 0, i \neq k, \end{cases} \sum_{i=1}^{21} N_i(x, y), \quad (2)$$

где i – номер функции, k – номер узла.

Для получения базиса не обязательно составлять и решать СЛАУ 21×21 . На треугольных конечных элементах получил распространение геометрический метод, позволяющий выразить все функции через три барицентрические координаты $L_1(x, y)$, $L_2(x, y)$, $L_3(x, y)$ основного треугольника (симплекса) 123. Чтобы получить полный набор узловых нагрузок γ_i , достаточно «пропустить» через формулу (1) только пять базисных функций: три граничных, например, N_1 , N_4 , N_{10} и две внутренние N_{16} и N_{19} . Эти функции приведены ниже:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{24} L_1 (5L_1 - 1)(5L_1 - 2)(5L_1 - 3)(5L_1 - 4); \\ N_4 &= \frac{25}{24} L_1 \cdot L_2 (5L_1 - 3)(5L_1 - 2)(5L_1 - 1); \\ N_{10} &= \frac{25}{12} L_1 \cdot L_2 (5L_1 - 2)(5L_1 - 1)(5L_2 - 1); \\ N_{16} &= \frac{125}{16} L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 (5L_3 - 2)(5L_3 - 1); \\ N_{19} &= \frac{125}{4} L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 (5L_1 - 1)(5L_3 - 1). \end{aligned} \quad (3)$$

Интегрировать в (1) лучше всего по формуле Холанда-Белла [6], которая специально приспособлена к барицентрическим координатам. Результат интегрирования таков:

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \frac{11}{1008}, i = 1, 2, 3; \quad \gamma_i = \frac{25}{1008}, i = 4, 5, \dots, 15; \\ \gamma_i &= \frac{200}{1008}, i = 16, 17, 18; \quad \gamma_i = \frac{25}{1008}, i = 19, 20, 21. \end{aligned}$$

На следующем шаге процедуры барицентрической конденсации мы концентрируем в барицентре всю нагрузку внутренних узлов Т21. Суммарная нагрузка в барицентре: $\gamma_0 = \frac{675}{1008}$. Этой нагрузке соответствует функция

$$N_0 = \frac{1125}{28} L_1 \cdot L_2 \cdot L_3, \quad (4)$$

которую мы назовем корректирующей. Эта функция позволяет генерировать множество базисов на элементе Т15 серендипова семейства (без внутренних узлов). Формула-генератор базисов Т15 имеет вид:

$$\overline{N}_i = N_i + \alpha_i \cdot N_0, i = \overline{1, 15}, \quad (5)$$

где N_i – «старая» функция (Т21); \overline{N}_i – «новая» функция (Т15); α_i – доля «внутренней» нагрузки $\frac{675}{1008}$, передаваемая из барицентра в граничный узел i . Если проинтегрировать (5), учитывая (1), мы получим формулу связи между «новым» и «старым» спектром.

$$\overline{\gamma}_i = \gamma_i + \alpha_i \times \gamma_0. \quad (6)$$

В простейшем случае $\alpha_i = \frac{1}{15}$ (равномерное распределение барицентрической нагрузки) каждый граничный узел получает по $\frac{45}{1008}$. Спектр нагрузок имеет вид:

$$\overline{\gamma}_i = \frac{56}{1008}, i = 1, 2, 3; \quad \overline{\gamma}_i = \frac{70}{1008}, i = 4, 5, \dots, 15.$$

Мы получили физически правдоподобный спектр. И все же он не безупречен. Результаты экспериментов со случайными блужданиями и гипотеза диффузионного пятна подсказывают, что в угловых узлах нагрузки следует уменьшать, а в ближайших к барицентру узлах – увеличивать. Читатель уже заметил, что так можно добиться совпадения теоретического спектра с эмпирическим. В качестве примера приведем еще одно (неравномерное) распределение:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \frac{1}{27}, \overline{\gamma}_i = \frac{36}{1008}, i = 1, 2, 3; \\ \alpha_i &= \frac{1}{15}, \overline{\gamma}_i = \frac{70}{1008}, i = 4, 5, \dots, 9; \\ \alpha_i &= \frac{11}{135}, \overline{\gamma}_i = \frac{80}{1008}, i = 10, \dots, 15. \end{aligned}$$

Выводы: на Т21 задача восстановления функции двух аргументов решается однозначно, на Т15 – решений множество. При этом поведение функции $f(x, y)$ на границе треугольника строго регламентировано. Барицентрическая конденсация – хороший пример «мягкого» моделирования (по В.И. Арнольду).

Список использованных источников

1. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. — М. : Мир, 1984. — 428 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. — М. : Мир, 1975. — 541 с.
3. Ковалюк Д. В. Примеры адекватной статической конденсации на треугольном элементе четвертого порядка / Д. В. Ковалюк, А. Н. Хомченко // Вестник ХНТУ. — № 47 (2). — Херсон : ХНТУ, 2013. — С. 155—158.
4. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. — М. : Мир, 1981. — 304 с.
5. Митчелл Э. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными / Э. Митчелл, Р. Уэйт. — М. : Мир, 1981. — 216 с.
6. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. — М. : Мир, 1977. — 350 с.
7. Хомченко А. Н. Про «м'яке» моделювання біквадратичного ССЕ / А. Н. Хомченко // Наукові праці: Наук.-метод. журнал «Комп'ютерні технології». — Вип. 201 (213). — Миколаїв : ЧДУ ім. П. Могили, 2013. — С. 106—108.
8. Хомченко А. Н. Конечные элементы высших порядков и барицентрическая конденсация / А. Н. Хомченко, Е. И. Литвиненко, И. А. Астионенко // Міжвузівський збірник «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». — Вип. 6. — Луцьк, 2011. — С. 266—269.

Анатолій ХОМЧЕНКО, Євген СІДЕНКО
м. Миколаїв

МЕТОД БАРИЦЕНТРИЧНОЇ КОНДЕНСАЦІЇ НА СКІНЧЕННОМУ ЕЛЕМЕНТІ T21

У статті описаний універсальний метод барицентричної конденсації для трикутного скінченного елемента T21, в якому кількість граничних вузлів дорівнює 15, а внутрішніх – 6. Даний метод дозволяє позбутися від внутрішніх вузлів. Це дає нам повне уявлення про природу барицентричної редукції. Також в статті представлено формалізацію отримання спектра вузлових навантажень, використовуючи методику розрахунку п'яти базисних функцій. Інші випадки (T10, T15, T28) аналогічні. Результати експериментів з випадковими блуканнями і гіпотеза дифузійної плями підказують, що в кутових вузлах навантаження слід зменшувати, а в найближчих до барицентра вузлах – збільшувати. Отримані результати моделювання показали переваги запропонованого підходу.

Ключові слова: кінцевий елемент, трикутник вищого порядку, розрахунковий вузол, барицентрична конденсація.

Anatoly KHOMCHENKO, Ievgen SIDENKO
Mykolaiv

BARYCENTRIC CONDENSATION METHOD ON THE FINITE ELEMENT T21

In this article the universal method of barycentric condensation for triangular finite element T21, which the number of border nodes is equal 15 and internal – 6 is analyzed. This method allows to get rid of internal nodes. This gives us a complete idea of the nature of the barycentric reduction. In the article also presents the formalization of obtaining the spectrum of nodal loads using the method of calculation of the five basic functions. Other cases are (T10, T15, T28) similar. Results of experiments with random walks and hypothesis of diffusion spot suggest that the load in corner units should be decreased, and the load in the nearest to the bary-center units should be increased. These simulation results indicated the benefits of the proposed approach.

Key words: finite element, the highest order triangle, current node, barycentric condensation.

Стаття надійшла до редколегії 29.02.2016

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

- АГАРКОВ Олексій Юрійович**, аспірант кафедри теоретичної механіки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.
- АНТИПОВА Катерина Олександрівна**, студентка VI курсу факультету програмне забезпечення систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.
- БАБИЧ Ярослав Олександрович**, студент III курсу інституту автоматики, кібернетики та обчислювальної техніки Рівненського національного університету водного господарства та природокористування.
- БЕРЕЗЬКИЙ Олег Миколайович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії Тернопільського національного економічного університету.
- БЕРЕЗЬКА Катерина Миколаївна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри економіко-математичних методів Тернопільського національного економічного університету.
- БІДНІЧЕНКО Олена Галиківна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної графіки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.
- БОЙЧУК Олена Володимирівна**, кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри прикладних математики, механіки та інформатики Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- БОНДАР Олександр Володимирович**, студент VI курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- БОРДУН Сергій Олександрович**, студент V курсу факультету програмне забезпечення систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.
- БОРИСЕНКО Валерій Дмитрович**, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- БОРИСЕНКО Максим Юрійович**, викладач кафедри прикладних математики, механіки та інформатики Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- БОРЧИК Євгеній Юрійович**, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- БУДАК Валерій Дмитрович**, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, ректор Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- БУЛГАКОВА Олександра Сергіївна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладних математики, механіки та інформатики Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- ГЛАДКА Олена Миколаївна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Рівненського національного університету водного господарства та природокористування.
- ГОРІШНЯ Дар'я Олександрівна**, студентка IV курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- ГОЧ Володимир Сергійович**, студент III курсу інституту автоматики, кібернетики та обчислювальної техніки Рівненського національного університету водного господарства та природокористування.
- ЄВСТИГНЄВ Юрій Вікторович**, студент III курсу машинобудівного інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.
- ЗІВЕНКО Василь Олексійович**, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.
- ЗОСІМОВ В'ячеслав Валерійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладних математики, механіки та інформатики Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

КИСЛИЧЕНКО Павло Олександрович, студент VI курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

КОВАЛЕНКО Ігор Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри програмне забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

КУДРЯВЦЕВ Андрій Валерійович, студент II курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

ЛУКЬЯНЧИКОВ Сергій Дмитрович, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

МАШИРОВ Костянтин Васильович, студент V курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

МЕЛЬНИК Віктор Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

МИХАЙЛЕНКО Всеволод Євдокимович, доктор технічних наук, професор кафедри нарисної геометрії, інженерної й машинної графіки Київського національного університету будівництва і архітектури.

НЕМІШ Василь Миколайович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри економіко-математичних методів Тернопільського національного економічного університету.

ПАВЛЕНКО Олег Олегович, лаборант кафедри комп'ютерної інженерії, Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

ПАЛЬКО Костянтин Юрійович, студент IV курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

ПАЛЬКО Максим Юрійович, студент IV курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

ПРАДЄДОВ Владислав Васильович, студент V курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

ПОГРОМСЬКА Ганна Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладних математики, механіки та інформатики Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

СИНЯВІН Олександр Миколайович, студент II курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

СІДЕНКО Євгеній Вікторович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського державного університету імені П. Могили.

СТОВБА Олексій Олександрович, студент V курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

ТИМОФІЄВА Надія Костянтинівна, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України.

УСТЕНКО Ірина Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

УСТЕНКО Сергій Анатолійович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

ХОЛКОВСЬКИЙ Юрій Романович, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій дизайну і графіки Київського національного авіаційного університету.

ХОМЧЕНКО Анатолій Никифорович, доктор фізико-математичних наук професор, завідувач кафедри прикладної та вищої математики Чорноморського державного університету імені П. Могили.

ХРИСТОДОРОВ Олександр Вікторович, студент IV курсу механіко-математичного факультету Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського.

В научном журнале освещены актуальные вопросы геометрического моделирования, компьютерных систем, информационных технологий и т.д. Авторами четко актуализируются понятия «компьютерное моделирование», «геометрическое моделирование», «объемное моделирование», «программирование», «прикладная геометрия» и другие. К авторским концепциям привлечены: LabVIEW среда, CRM-система, AutoCAD, LEF-пласты, платформа Android.

Издание адресовано ученым, преподавателям, студентам технических специальностей.

Topical issues of geometric modeling, computer systems, and information technologies are highlighted in the scientific journal. The authors clearly actualize the concepts of «computer modeling», «geometric modeling», «three-dimensional modeling», «programming», «applied geometry» and others. The authors' concepts involve LabVIEW environment, CRM-systems, AutoCAD, LEF-layers, Android platform.

The publication is addressed to scientists, teachers, students of technical specialties.

Наукове видання

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИ

GEOMETRISCHE MODELIERUNG AND INFORMATIONSTECHNOLOGIEN

GEOMETRIC MODELING AND INFORMATION TECHNOLOGIES

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1, березень 2016

Формат 60×84 1/8. Ум. друк. арк. 15,0.
Тираж 100 пр.

Адреса редакції та видавця:
Видавництво МНУ імені В. О. Сухомлинського
54030, м. Миколаїв, вул. Нікольська, 24
тел. (0512) 37-88-38, т/ф 37-88-15
e-mail: publish.mnu@i.ua

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи ДК № 3375 від 27.01.2009 р.