

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 1563-0064

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА

Научно-технический журнал

Основан в 1997 г.

№ 3(70), июль – сентябрь 2015

Выходит 4 раза в год

© Харьковский национальный
университет радиоэлектроники, 2015

Свидетельство о государственной регистрации КВ № 12097-968 ПР 14.12.2006

РИ, 2015, № 3

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА

ТЕРЕНТЬЄВА І. Є. СТРУКТУРИЗАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ГОТОВНОСТІ РЕЗЕРВОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ НАЗЕМНОГО РАДІОДОСТУПУ UTRAN.....	3
---	---

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІИ

СКУЛИШ М.А., СУЛИМА С.В. МЕТОД УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В ДАТАЦЕНТРАХ ОПЕРАТОРА МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ.....	8
ЮДІН О.К., ЗЮБІНА Р.В., ФРОЛОВ О.В. АНАЛІЗ СТЕГАНОГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ ПРИХОВУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У КОНТЕЙНЕРИ РІЗНИХ ФОРМАТІВ.....	13

СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ

ПАНКРАТОВ А.В., РОМАНОВА Т.Е., СТОЯН Ю.Е. ПСЕВДОНОРМАЛИЗОВАННЫЕ КВАЗИ-РНІ-ФУНКЦИИ ДЛЯ МНОГОГРАННИКОВ.....	22
---	----

ХЛУД О.М., СУББОТА И.А., РОМАНОВА Т.Е. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПАКОВКИ ГОМОТЕТИЧЕСКИХ ОДИНАКОВО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЭЛЛИПСОИДОВ.....	27
--	----

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

ГРЕБЕННИК И.В., БАРАНОВ А.В., ЧЕРНАЯ О.С., ГОРБАЧЕВА Е.Е. ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ НА ЦИКЛИЧЕСКИХ ПЕРЕСТАНОВКАХ НА ОСНОВЕ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА.....	33
--	----

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ХАХАНОВ В.І., ЧУМАЧЕНКО С.В., ЛИТВИНОВА Є.І., МЩЕНКО О.С. РОЗУМНИЙ КІБЕР -УНІВЕРСИТЕТ – CLOUD-MOBILE СЕРВІСИ УПРАВЛІННЯ НАУКОВО-ОСВІТНІМИ ПРОЦЕСАМИ.....	39
--	----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

КИСЛЕНКО Ю.І., СЕРГЄЄВ Д.С. СТРУКТУРНИЙ ПІДХІД ДО ПОШУКУ ПРИРОДНО-МОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	45
--	----

ВЕНГРИНА О.С., ДОЛГОВА Н.Г. ВПЛИВ ТУРБУЛЕНТНОГО ОТОЧЕННЯ НА ПРОЕКТ РЕДЕВЕЛОПМЕНТА.....	50
--	----

БЕСКОРОВАЙНИЙ В.В., ПОДОЛЯКА К.Е. МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕБОРА ДЛЯ РЕИНЖИНИРИНГА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА.....	55
---	----

ВАЛИД АХМЕД МАХМУД АЛЬРЕФАИ. ОБ ОДНОМ КЛАССЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С КОНКУРЕНТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ.....	62
---	----

РЕФЕРАТИ.....	67
---------------	----

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ РУКОПИСЕЙ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА.....	71
--	----



СТРУКТУРИЗАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ГОТОВНОСТІ РЕЗЕРВОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ НАЗЕМНОГО РАДІОДОСТУПУ UTRAN

ТЕРЕНТЬЄВА І. Є.

Проводиться класифікація обладнання системи радіодоступу UTRAN з урахуванням структури резервування. Аналізується середовище резервування та взаємодія конструктивних модулів для базових станцій, контролера радіомережі й модулів програмного забезпечення. Розглядається резервування на рівні макроелементів системи. Показується вплив резервування на готовність телекомунікаційного обладнання. Класифікація та структурування проводиться на прикладі обладнання компанії Huawei.

Ключові слова: система радіодоступу UTRAN, телекомунікації, базова станція, контролер мережі, резервування, коефіцієнт готовності.

1. Вступ

У процесі глобальної інформатизації важливу роль відіграють телекомунікаційні системи (ТКС), які зазнали стрімкого розвитку в останні десятиліття. Згідно з сьогоденними прогнозами кількість бездротових пристроїв буде складати 7 трильйонів на 7 мільярдів чоловік до 2017-2020 років. Слід зазначити, що широкопосмугові бездротові мережі передачі інформації стають одним з основних напрямків розвитку телекомунікаційної індустрії. А для країн, у яких велика територія збігається з невеликою щільністю населення, бездротові мережі мають особливе значення, бо дозволяють економічно та оперативно створювати телекомунікаційну інфраструктуру на цих територіях [1].

Від якості надаваних послуг і надійності телекомунікаційних систем залежить виконання великої кількості задач в різних сферах суспільства. Тому до готовності ТКС висуваються жорсткі вимоги. Але проблемою на сьогоднішній день є відсутність систем, які гарантують 100% відмовостійкість.

Отже, розроблення та оптимізація технологій резервування є важливою проблемою, вирішення якої дозволить забезпечити задані рівні готовності й доступності сучасних ТКС.

Питанням розроблення моделей для оцінювання готовності та надійності цифрових систем присвячено

фундаментальні праці [1, 2]. Проте в них розглянуто тільки класичні види структур резервування та не врахована велика кількість структур збитковості телекомунікаційного обладнання (ТКО). В роботах [3, 4] представлено моделі оцінювання надійності і готовності ТКС третього покоління, але також не досліджено різноманітні структури резервування ТКО та розглянуто тільки марковські моделі процесу експлуатації.

З огляду на зазначене вище, метою дослідження є проведення структуризації технологій резервування ТКО системи наземного радіодоступу UTRAN та оцінювання готовності конструктивних блоків (КБ) при резервуванні.

2. Постановка задачі дослідження

Для забезпечення вимог до готовності ТКС застосовуються два основних напрямки при побудові відмовостійких систем.

Перший спосіб – використання тільки відмовостійких компонентів. При реалізації цього напрямку кожен компонент системи може продовжувати своє функціонування, навіть якщо один або декілька підкомпонентів системи виходять з ладу.

Другий спосіб – це розробка методів, що гарантують побудову відмовостійкої системи з компонентів, які не є відмовостійкими. В таких системах відмовостійкість реалізована за рахунок технології резервування та застосування спеціального програмного забезпечення, елементних взаємозв'язків і алгоритмів функціонування. Саме цей спосіб використовується для дослідження.

Для забезпечення необхідного рівня готовності за допомогою резервування слід розглянути архітектуру ТКС, провести аналіз ТКО та можливих варіантів технологій резервування. Далі необхідно оцінити коефіцієнт готовності системи при застосуванні різних видів резервування і обрати оптимальний варіант за встановленим критерієм.

3. Архітектура UMTS

Універсальна служба мобільного зв'язку UMTS (Universal Mobile Telecommunications Services) є європейським стандартом третього покоління WCDMA. Архітектура мережі UMTS (рис. 1) підрозділяється на дві складові частини: мережа радіодоступу та базова мережа.

З функціональної точки зору елементи мережі радіодоступу RAN (Radio Access Network, наземна UMTS RAN - UTRAN) забезпечують широкопосмуговий радіодоступ. Базова мережа CN (Core Network) здійснює перемикання та маршрутизацію викликів, а також підключення даних до зовнішніх мереж. Крім того, до складу мережі входить обладнання користувачів (UE) [6-8].

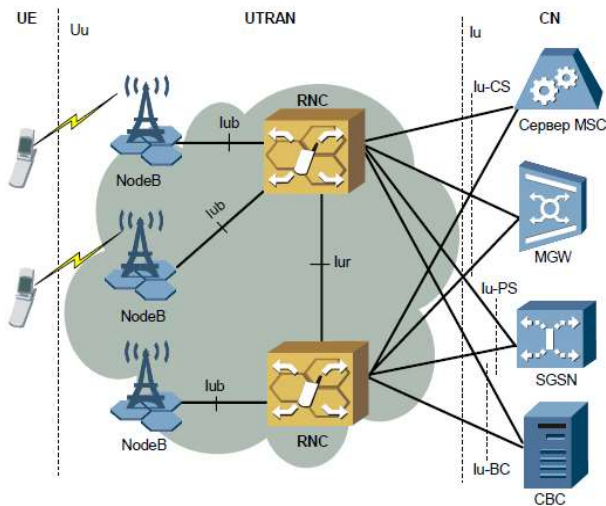


Рис. 1. Архітектура мережі UMTS

Об'єктами дослідження є базові станції Node B та контролери радіодоступу RNC, які є структурними елементами UTRAN.

4. Структуризація видів резервування обладнання UTRAN

Архітектурні та технічні рішення, спрямовані на забезпечення надійності функціонування обладнання UTRAN, полягають в наступному:

1. Застосування модульного принципу побудови елементів апаратного й програмного забезпечення обладнання RNC, що сприяє використанню різних схем експлуатаційного резервування елементів цього обладнання.

2. Забезпечення підтримки таких схем резервування обладнання:

– навантажене дублювання ($2N$), коли кожен активний (основний) елемент обладнання має ідентичний запасний елемент, який перебуває в стані гарячого резерву (якщо кількість активних елементів дорівнює N_{OCH} , то повинна існувати така ж кількість елементів гарячого резерву N_H , тобто загальна кількість елементів обладнання ($N_{OCH} + K_H$));

– m -кратне ненавантажене резервування (nN), коли кожен активний елемент обладнання має n ідентичних запасних елементів, що перебувають в стані ненавантаженого резерву, де $n = 1, 2, \dots$ (якщо кількість активних елементів дорівнює N_{OCH} , то повинно існувати nN_{HH} елементів ненавантаженого резерву);

– навантажене заміщення ($N_{OCH} + K_H$), коли на групі з N_{OCH} ідентичних активних елементів існує K_{HH} додаткових елементів, що перебувають в стані навантаженого резерву, де $N_{OCH} \geq K_H$;

– ненавантажене заміщення ($N_{OCH} + K_{HH}$), коли на групі з N_{OCH} ідентичних активних елементів існує K_{HH} додаткових елементів, що перебувають в стані холодного резерву, де $N_{OCH} \geq K_{HH}$;

– функціонально надлишкове забезпечення ($SN_{OCH} +$), коли група з N_{OCH} функціонально надлишкових елементів обладнання функціонує як пул певного функціонального ресурсу, кількість якого в S разів перевищує його номінальну потребу. В цьому випадку, якщо один з елементів обладнання вийде з ладу, потребу у використанні необхідного ресурсу задовольняють інші елементи цього пулу. S – коефіцієнт функціональної надмірності ресурсного пулу, де $2 > S > 1$. Якщо, наприклад, $S = 1,1$, то має місце десятипроцентна функціональна надлишковість, тобто забезпечено одночасне резервування функціональних можливостей тільки десятої частки від елементів пулу.

Слід виділити такі методи резервування макроелементів обладнання UTRAN:

1. Загальне навантажене резервування кожного контролера RNC ідентичним фізично відокремленим макроелементом за схемою $RNC_{OCH} + mRNC_H$, де зазвичай кратність резервування $m = 1$.

2. Загальне ковзне навантажене резервування базових станцій $nNB_{OCH} + mNB_H$ ($n = 1, 2, 3, \dots$ - кількість основних базових станцій), коли на групі з nNB_{OCH} базових станцій існує mNB_H додаткових, які перебувають у стані навантаженого резерву (необхідний час для підключення навантаженого резерву - не більше 1 с).

3. Загальне ковзне ненавантажене резервування базових станцій $nNB_{OCH} + mNB_{HH}$, коли на групі з nNB_{OCH} базових станцій існує mNB_{HH} додаткових, які перебувають у стані ненавантаженого резерву (необхідний час для здійснення заміщення - не більше 90 с).

4. Ковзне навантажене і ненавантажене резервування базових станцій

$$nNB_{OCH} + m_1NB_H + m_2NB_{HH},$$

коли на групі з nNB_{OCH} базових станцій існує m_1NB_H додаткових, які перебувають у стані навантаженого резерву, та m_2NB_{HH} додаткових базових станцій, які перебувають у стані ненавантаженого резерву.

5. Ковзне навантажене, полегшене та ненавантажене резервування базових станцій

$$nNB_{OCH} + m_1NB_H + m_2NB_{ПОЛ} + m_3NB_{HH},$$

коли на групу з nNB_{OCH} базових станцій існує m_1NB_H додаткових, які перебувають у стані навантаженого резерву, $m_2NB_{ПОЛ}$ додаткових Node B, які перебувають у стані полегшеного резерву, та m_3NB_{HH} додаткових Node B, які перебувають у стані ненавантаженого резерву.

б. Функціональне резервування базових станцій ($SnNB_{OCH} +$), коли група з nNB_{OCH} функціонує як пул абонентського ресурсу, в якому кількість станцій в S разів перевищує його номінальну потребу в обробці обсягів трафіка (в цьому випадку, якщо одна з базових станцій вийде з ладу, то потребу у використанні її ресурсу задовольняють інші станції цього пулу). Якщо S – коефіцієнт функціональної надмірності ресурсного пулу Node B, тоді при $S = 2$ маємо стовідсоткову ресурсну абонентську надмірність. Необхідний час для здійснення функціонально надлишкового забезпечення Node B – не більше 1 с.

5. Структура середовища резервування конструктивних блоків базової станції та контролера базових станцій RNC

Об'єктами резервування є:

- конструктивні блоки (КБ) базової станції WAM і SW;
- конструктивні блоки контролера базових станцій FAM, VAM і LMT.

Слід виділити такі методи резервування КБ базової станції:

1. Загальне навантажене резервування (дублювання) ідентичним фізично відокремленим блоком кожного КБ в Node B за схемою $nKB_{OCH} + mKB_H$, де зазвичай кратність резервування $m = 1$.
2. Загальне ненавантажене резервування ідентичним фізично відокремленим блоком кожного КБ за схемою $nKB_{OCH} + mKB_H$.
3. Загальне одночасне навантажене та ненавантажене резервування КБ ідентичними фізично відокремленими блоками за схемою $nKB_{OCH} + m_1KB_H + m_2KB_{HH}$.
4. Загальне ковзне навантажене резервування блоків $nLMT_{OCH} + mLMT_H$, коли на групу з $nLMT_{OCH}$ існує $mLMT_H$, які перебувають в стані навантаженого резерву (зазвичай $m < n$).

Можливі варіанти схем резервування КБ в RNC:

1. Загальне ковзне навантажене резервування блоків $nLMT_{OCH} + mLMT_H$, коли на групу з $nLMT_{OCH}$ існує $mLMT_H$, які перебувають в стані навантаженого резерву.
2. Загальне ковзне ненавантажене резервування блоків $nLMT_{OCH} + mLMT_{HH}$, коли на групу з $nLMT_{OCH}$

існує $mLMT_{HH}$, які перебувають в стані ненавантаженого резерву.

3. Ковзне навантажене та ненавантажене резервування блоків $nLMT_{OCH} + mLMT_H + mLMT_{HH}$, коли на групу з $nLMT_{OCH}$ блоків існує m_1LMT_H додаткових блоків LMT, які перебувають в стані навантаженого резерву, та m_2LMT_{HH} додаткових LMT, які перебувають в стані ненавантаженого резерву.

6. Структура середовища резервування нижнього рівня (програмні модулі)

Об'єктами резервування є:

- програмні модулі (ПМ) «master O&M» і «telecom master» блоку WAM в BTS;
- програмні модулі «BTS Manager» і «manager AXC» блоку SW в BTS.

Можливі варіанти схем резервування ПМ:

1. Навантажене дублювання ідентичним логічно ізолюваним модулем кожного ПМ в BTS за схемою $N_{ПМ_{OCH}} + N_{ПМ_H}$.
2. Взаємне стовідсоткове функціонально надмірне забезпечення кожного ПМ з пари «master O&M» і «telecom master» та пари «BTS Manager» і «manager AXC» за схемою $2N_{ПМ_{OCH}} + 2N_{OCH}$. Наприклад, якщо у ПМ «master O&M» виникнуть проблеми невідповідності, тоді виконання його функцій візьме на себе ПМ «telecom master». Те ж саме стосується пари «BTS Manager» і «manager AXC».

Розроблена класифікація дозволить формалізувати структуру технологій резервування та виділити альтернативні практично значущі структури резервування для вибору оптимального варіанту.

7. Особливості резервування обладнання на рівні макроелементів RAN

Основний варіант забезпечення експлуатаційної надійності будь-якого макроелемента RAN показано на рис. 2.

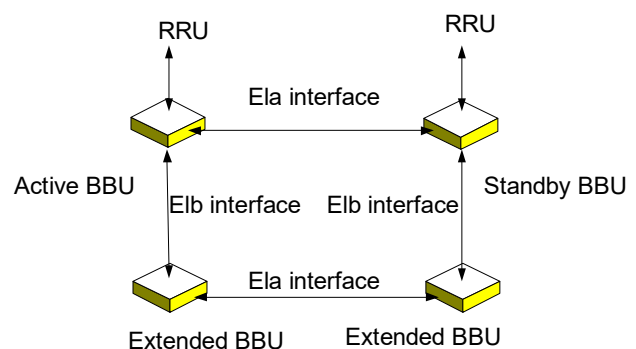


Рис. 2. Основний варіант резервування макроелементів RAN

Як бачимо, основний системний блок (ВВU) макроелемента резервується за схемою $KБ_{ОСН} + 1КБ_{Н} + 2КБ_{НН}$. Отже, маємо один активний системний блок Active ВВU, який на заданому інтервалі часу бере на себе робоче навантаження; один системний блок Standby ВВU, який здійснює функцію навантаженого резервування активного блоку; два додаткових пасивних системних блоки extended ВВU, які здійснюють функції ненавантаженого резервування як основного активного, так і резервного навантаженого системного блоку.

До основного системного блоку можуть бути підключені віддалені блоки RRU, які розміщуються у можливих місцях концентрації абонентського навантаження. Цим забезпечується надійність каналу транспортування інформації між основним та віддаленим блоками макроелемента.

8. Розрахунок готовності основного варіанту резервування макроелементів UTRAN

Для оцінювання коефіцієнта готовності резервованої системи використаємо методику, яку запропоновано в роботах [9, 10]. Процес експлуатації представляється як послідовність зміни різних станів (інтервалів) процесу, в яких може знаходитися i -й КБ. Таким чином, поведінку КБ на інтервалі експлуатації $(0, \infty)$ можна описати випадковим процесом $Li(t)$, $(i = \overline{1, m})$, $(t \geq 0)$ з кінцевим простором станів $E = \bigcup E_i$.

Кожний з КБ може перебувати в одному з наступних станів випадкового процесу $Li(t)$ [9]:

$G_1^{(i)}$ – якщо в момент часу t КБ використовувався за призначенням і перебував в працездатному стані;

$G_2^{(i)}$ – якщо в момент часу t КБ не використовувався за призначенням і проводився контроль його працездатності за допомогою вбудованої системи контролю (ВСК);

$G_3^{(i)}$ – якщо в момент часу t КБ не використовувався за призначенням і проводився його демонтаж або монтаж;

$G_4^{(i)}$ – якщо в момент часу t забракований КБ не за планом простоював через відсутність запасного КБ;

$G_5^{(i)}$ – якщо в момент часу t проводилося «хибне відновлення» КБ в сервісному центрі;

$G_6^{(i)}$ – якщо в момент часу t проводилося «вірне» відновлення КБ.

Для паралельної структури резервування коефіцієнт готовності визначається за формулою

$$K_{\Gamma} = 1 - (1 - EG_1/EG_0)^m, \quad (1)$$

де $EG_0 = EG_1 + EG_2 + EG_4$ – сума математичних сподівань перебування КБ у станах $G_1^{(i)}$, $G_2^{(i)}$ і $G_4^{(i)}$ відповідно.

При експоненціальному законі розподілу наробки до відмови використовуються вирази [10]

$$EG_1 = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda [1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda\tau}]}; \quad (2)$$

$$EG_2 = \frac{1}{1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda\tau}} \left[\frac{\tau(1 - \beta e^{-\lambda\tau})}{1 - \beta} - \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda} \right], \quad (3)$$

де τ – періодичність контролю; λ – інтенсивність раптових відмов КБ; α і β – умовні ймовірності «хибної відмови» та «невиявленої відмови» під час контролю працездатності КБ відповідно.

Приклад. Визначимо коефіцієнт готовності блоку ВВU, якщо інтенсивність раптових відмов ВВU $\lambda_1 = 5,0 \cdot 10^{-5}$

1/год, $\alpha = \beta = 0,001$, $\tau = 1$ год, $MS_5 = 0$ (об'єм запасних частин необмежений). Порядок розрахунку коефіцієнта готовності полягає в наступному:

– визначаємо середній час перебування ВВU в працездатному стані за середній цикл регенерації за формулою (2)

$$EG_1 = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda [1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda\tau}]} = 952,4 \text{ год};$$

– визначаємо середній час перебування ВВU в стані прихованої відмови за середній цикл регенерації за формулою (3)

$$EG_2 = \frac{1}{1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda\tau}} \left[\frac{\tau(1 - \beta e^{-\lambda\tau})}{1 - \beta} - \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda} \right] = 0,18 \text{ год};$$

– визначаємо середній цикл регенерації ВВU за формулою $EG_0 = EG_1 + EG_2 = 952,4$ год;

– визначаємо коефіцієнт готовності одного комплекту апаратури за формулою (1)

$$K_{\Gamma} = 1 - (1 - EG_1/EG_0)^m.$$

За відсутності резервування ($m = 1$) отримуємо

$$K_{\Gamma} = 0,9996.$$

При паралельному резервуванні ($m = 2$):

$$K_{\Gamma} = 0,999999.$$

Отримані результати свідчать про те, що за відсутності резервування готовність ВВU не відповідає вимогам «п'яти дев'яток». За допомогою резервування мож-

ливо істотно підвищити готовність системи й забезпечити задані вимоги. Однак при збільшенні кратності резервування необхідно враховувати вартість резервних комплектів. Вплив на вибір варіанту резервування експлуатаційних витрат є метою подальших досліджень.

9. Висновки

Проаналізовано блоки та макроелементи системи радіодоступу UTRAN. Проведено класифікацію видів резервування на прикладі обладнання компанії Huawei. Запропоновано класифікацію резервування для всіх рівнів обладнання та програмного забезпечення. Надана класифікація дозволяє визначити оптимальну технологію резервування блоків та макроелементів для забезпечення заданого рівня готовності. Показано на прикладі, що без застосування резервування не завжди вдається забезпечити необхідний рівень готовності ТКО. Отримані результати можуть бути використані виробниками ТКО, а також компаніями стільникового зв'язку в процесі впровадження та експлуатації обладнання 3G. Подальшим продовженням досліджень є розробка критерію оптимізації технологій резервування й оцінювання експлуатаційних витрат.

Література: 1. *Системи зв'язку з рухомими об'єктами* [Текст] : підручник // С. О. Кравчук, О. Г. Голубничий, А. Г. Тараненко та ін. К. : Вид-во ТОВ «Спринт-Сервіс», 2012. 452 с. 2. *Nakagava, T. Maintenance Theory of Reliability* [Text] / T. Nakagava. Springer Verlag, 2005. 258 p. 3. *Pham, H. Handbook of reliability engineering* [Text] / H. Pham.

London : Springer, 2003. 298 p. 4. *Dharmaraja, S. Reliability And Survivability Analysis For UMTS Networks* [Text] : An Analytical Approach / S. Dharmaraja, U. Varshney // IEEE Transactions On Network And Service Management. September 2008. Vol. 5, No. 3. P. 132-142. 5. *Lin, Yi-Bing. Per-User Checkpointing for Mobility Database Failure Restoration* [Text] / Yi-Bing Lin // IEEE Transactions On Mobile Computing. January-March 2005. Vol. 4, No. 1. P. 1-12. 6. *BSC6900 GSM. Hardware Description* [Text]. Huawei Technologies Co., Ltd., 2010. P. 9-12. 7. *Airbridge BTS3900C CDMA Base Station. Hardware Description* [Text]. Huawei Technologies Co., Ltd., 2010. P. 4-33. 8. *RAN12.0 3900 Series NodeB. Product Description* [Text]. – Huawei Technologies Co., Ltd., 2010. 70 p. 9. *Уланский В. В. Показатели эффективности эксплуатации резервированных авиационных радиоэлектронных систем* [Текст] / В. В. Уланский, И. А. Мачалин // Математичні машини і системи. – 2006. № 4. С. 155-163. 10. *Уланский В. В. Математическая модель процесса эксплуатации легкозаменяемых блоков систем авионики* [Текст] / В. В. Уланский, И. А. Мачалин // Авиационно-космическая техника и технология. 2006. № 6(32). С. 74-80.

Надійшла до редколегії 11.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Бараннік В.В.

Терентьєва Ірина Євгенівна, аспірантка каф. телекомунікаційних систем Національного авіаційного університету, E-mail: i.terentyeva@ukr.net.

Terentyeva Irina Evgenevna, aspirant, telecommunication systems, national aviation University. E-mail: i.terentyeva@ukr.net.



МЕТОД УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В ДАТАЦЕНТРАХ ОПЕРАТОРА МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

СКУЛИШ М.А., СУЛИМА С.В.

Розглядається можливість віртуалізації мережі мобільного зв'язку. Описується метод динамічного управління ресурсами системи датацентрів мобільного оператора, який використовує гнучку аналітичну модель для визначення оптимальної кількості датацентрів, топології їх розміщення та кількості ресурсів, які виділяються функціональним блокам системи, що розгортаються в датацентрах та передбачають використання декількох типів ресурсів.

Ключові слова: хмарні обчислення, NFV, виділення ресурсів, мобільна мережа.

Key words: cloud computing, NFV, resource allocation, mobile network.

1. Вступ

Якість обслуговування абонента в процесі надання послуг зв'язку залежить від організації процесу обслуговування заявок в датацентрі оператора зв'язку [1]. Останнім часом у мережі мобільного стільникового зв'язку спостерігається швидкий розвиток, зокрема, з введенням мережі 4-го покоління LTE. Сьогоднішні мережі мобільного зв'язку здатні запропонувати більш високі швидкості передачі даних, з інтеграцією більшої кількості послуг і гарантією високої якості сприйняття. Тим не менш, цей розвиток означає, що обсяг даних, які передаються в мобільній мережі, також зростає. Крім того, конкуренція на ринку вимагає більш швидкого розгортання послуг і здатність справлятися з більш високими вимогами обслуговування, щоб зберегти максимальну якість сприйняття користувачами. Всі ці моменти викликають різке зниження доходів операторів і, отже, ведуть до необхідності зменшення сукупної вартості володіння (ТСО), щоб бути в змозі підтримувати рівень доходів. Два поняття перебувають в центрі досліджень і розробок в даний момент, а саме Віртуалізація Мережевих Функцій (Network Functions Virtualization – NFV) і Програмно Конфігуровані Мережі (Software Defined Networking – SDN) [2].

У сучасних архітектурах мереж все складніші сервіси, такі як IPTV, сервіси безпеки та оптимізація доставки, введено за допомогою розгортання middleboxes. Одним із прикладів все більш складної

мережевої платформи є 3GPP Evolved Packet Core (EPC) та його оптимізації для доставки контенту і безпеки. На додаток до типових eNodeB, S/PGW, MME та інших мережевих функцій [3], розгортання EPC вимагає таких функцій, які, як правило, встановлюються в незалежних блоках (independent boxes): 1) Network Address Translation (NAT) з приватних IPv4 адрес до публічних IPv4/v6 адрес; 2) управління доступом до послуг (service access policing), наприклад, для VPN, відео платформ і VoIP; 3) захист мережевого обладнання брандмауером; 4) реалізація мережі розподілу контенту (CDN) для ефективного розподілу популярного контенту; 5) двигуни транскодування для оптимізації доставки зображення та відео [4]. Значна залежність мереж від апаратного забезпечення та існування різних спеціалізованих апаратних пристроїв, таких як брандмауери, обладнання глибокої інспекції пакетів (DPI) і маршрутизаторів у мережній інфраструктурі ускладнили проблеми, що стоять перед провайдером послуг мережі [5].

Концепція Віртуалізації Мережевих Функцій (NFV) [6] виникла для віртуалізації функцій мобільної мережі і переміщення їх на платформу апаратного забезпечення загального користування або датацентрів. NFV дозволяє операторам видалити залежність від спеціалізованого обладнання та замість цього реалізувати мережеві функції як віртуальні сутності програмного забезпечення на стандартизованих серверах [2], що можуть поєднуватись у ланцюги для забезпечення потрібної функціональності. Такий підхід підвищує гнучкість мережі та масштабованість, оскільки структурні блоки можуть розміщуватись і перерозміщуватись під час роботи залежно від потреби [7].

Така концепція розгортання віртуалізованих мережевих функцій має низку переваг стосовно масштабованості, кращого визначення параметрів мережі, оптимізації навантаження або економії енергії. Можливість додаткових і масштабованих функціональних доповнень без необхідності установки або придбання спеціалізованого обладнання, безумовно, має величезне значення. Крім того, мобільна мережа стане більш динамічною, оскільки віртуальні платформи підтримують швидке створення екземплярів, видалення або динамічне виділення ресурсів. Динамічне створення об'єктів розглядається як важливий інструмент, щоб мати змогу впоратися з швидкою зміною послуг та поведінки користувачів [2]. Так само як можна розгортати прикладні програми в хмарі, телекомунікаційний оператор може розгортати сервіси або оновлення сервісів щотижня, замість, скажімо, раз на три роки. Оператор більше не прив'язаний до дорогого пропріетарного мережевого обладнання [8]. Таким чином, очікується, що NFV матиме вплив на бажане зменшення витрат в сучасних мобільних мережах.

Тим часом, Програмно Конфігуровані Мережі [9] розглядаються як додаткова концепція розгортання мобільних мереж. SDN вводить те, що називається Декомпозицією Мережевих Функцій (NFD), де функції

площини управління додаватимуться до логічно централізованого контролера, який може розгортатися на платформі датацентру, в той час як функції площини даних реалізуються мережевими елементами SDN у транспортній мережі [2].

Можна передбачати різні сценарії розгортання SDN і NFV залежно від мережесегментів (наприклад, ядро (core) або границя (edge)) і, отже, на горизонті середньостроковій або короткостроковій. Тим не менш, ця загальна тенденція “програмації” продовжуватиметься через постійну еволюцію технологій і скорочення витрат [10].

На практиці більш дорогі спеціалізовані апаратні засоби часто працюють швидше і ефективніше, ніж віртуалізовані сутності, навіть хоча останні є більш гнучкими. Оскільки спеціалізовані апаратні засоби на даний час широко використовуються, цілком імовірно, що гібридні сценарії розгортання стануть поширеними, коли частина сервісів надаватиметься фізичним обладнанням. Це призводить до сценарію, аналогічного “спалаху у хмарі” (cloud burst): базове навантаження обробляється фізичним обладнанням (приватна хмара у сценарії “спалаху у хмарі”), в той час як коливання навантаження обробляються за допомогою динамічно створюваних віртуальних сервісних сутностей (публічна хмара в сценарії “спалаху у хмарі”); такий сценарій ілюструється на рис. 1 [7].



Рис. 1. Сценарій віртуалізації при коливаннях навантаження

У NFV мережах набір ланцюгів сервісів повинен розташовуватись на фізичних вузлах мережі. Ланцюг сервісів – це набір з одного або декількох сервісів чи віртуальних машин, які з’єднані разом для забезпечення певної функціональності і можуть бути представлені у вигляді графа, що містить сервіси і мережеві вимоги між ними. У гібридному мережевому середовищі ланцюги сервісів можуть розміщуватись з використанням або фізичного обладнання, або віртуалізованих сутностей.

Успіх цього підходу залежить від наявності та продуктивності алгоритмів, що визначають, де і як ці структурні блоки створюються [7].

Введення NFV в мобільну мережу має безліч переваг, однак це вимагає передачі трафіка мережі до дата-

центрів оператора, що накладає додаткове навантаження на транспортну мережу та вимагає ретельного планування розташування датацентрів у мобільній мережі [2]. Основними питаннями проблеми розміщення елементів є їх кількість та місце в топології, де їх слід розмістити [11].

Поняття SDN і NFV розглядаються як дуже перспективні засоби для проектування економічно ефективних архітектур мобільних мереж, але на даний момент NFV все ще перебуває на початкових етапах реалізації [12]. Оскільки NFV надає бачення мережної архітектури для віртуалізації функцій вузлів мережі в блоки, що можуть бути об’єднані в ланцюг, одним із найактуальніших питань досліджень є те, яким чином ефективно розподіляти ресурси між функціональними блоками.

Отже, щоб розглянути цей аспект, сформулюємо загальний підхід, який забезпечує формалізований опис проблеми розподілу ресурсів для набору віртуальних функцій мережі.

Введення віртуалізації функцій до мобільної мережі LTE було в центрі уваги останніх наукових робіт, викликаних проектом NFV та застосуванням SDN. Існують деякі дослідження, які стосуються архітектурних аспектів міграції мобільних функцій до датацентру, як в [13], де відмічаються переваги і сценарії використання віртуалізованих мобільних функцій. Робота [14] пропонує використання платформи датацентру для розвантаження трафіка мобільного ядра. Однак ранні дослідження були пов’язані з архітектурною побудовою [2].

Проблема розміщення контролерів розглядалась в [11] і [15] з основним акцентом на досягнення мінімальної затримки SDN управління, а також стійкості надання послуг. У дослідженні [2] розглядається оптимальне розміщення датацентрів, на яких розміщуються віртуалізовані шлюзи, а також вирішується задача застосування віртуалізації та SDN декомпозиції на шлюзах мобільного ядра. Однак задача розміщення виникає і для інших функцій мережі.

Подібно до проблеми розміщення контролерів в області SDN, такі технології як NFV вимагають відповідних алгоритмів, які можуть вирішувати проблеми, що виходять за рамки однокритеріальних проблем розміщення. Ці проблеми можуть вносити додаткові складності через можливі взаємозалежності між мережевими функціями, як у випадку об’єднання функцій у ланцюжки, і нові потенційні обмеження відносно додаткових аспектів, таких як безпека [16].

Тому метою дослідження є підвищення ефективності роботи мобільної мережі шляхом оптимального розміщення ресурсів системи в хмарному середовищі. В статті пропонується аналітичний підхід до моделювання і дослідження розміщення мережесегментів у мережі оператора мобільного зв’язку.

2. Метод управління ресурсами у віртуалізованій мережі мобільного зв'язку

Передбачається, що в мережі розгорнуті контролери, які надсилають запити до опорної мережі на певний ланцюг сервісів, що реалізується віртуалізованими мережевими функціями.

Мережа представлена графом $G = (V, E)$ з множиною вузлів V , яка містить n вузлів, з'єднаних ребрами з множини E . Додатково затримки найкоротших шляхів між кожною парою вузлів попередньо вираховані і зберігаються у матриці відстаней $D = \{d_{i,j}\}_{n \times n}$, в якій $d_{i,j}$ означає затримку передачі з вузла i в вузол j . Затримки в D нормалізовані по діаметру графа, тобто $d_{i,j} \in [0, 1]$. Нехай визначено інтенсивність заявок, що надходять з вузлів мережі – $\{e_g: g \in V\}$, а також загальне допустиме значення часу обробки заявки всією системою R . Припускаємо відсутність обмежень на доступні ресурси датацентру. Також припускаємо, що датацентри можуть розмішуватись в точках, де оператор вже має сайт, щоб зменшити вартість площі приміщення, тобто датацентри розмішуються у вузлах V .

При заданій кількості датацентрів K існує скінченна

множина з $\binom{n}{K}$ можливих розташувань, відповідно,

розміщення датацентрів є задачею багатокритеріальної комбінаторної оптимізації. Метою задачі є знаходження таких розташувань датацентрів з множини можливих розташувань розміру K – $P_K = \{P \in 2^V \mid |P| = K\}$, що є оптимальними відповідно до деякої цільової функції.

Метою оптимізації є визначення місця розташування кожного датацентру, таких що мінімізується функція загальних витрат:

$$\min_{\{v_k: k \in V\}} \sum_k U_k \cdot v_k \quad \text{при обмеженні } \sum_k v_k = K, \quad (1)$$

де K – задане число датацентрів, які використовуються в мережі G ; v_k – булева змінна, яка рівна одиниці, якщо датацентр розміщується в точці k ; U_k – загальні витрати на розміщення датацентру в точці k , $U_k = ddc_k + U_{sc}$; ddc_k – максимальна затримка передачі від вузла мережі до датацентру в точці k ; U_{sc} – витрати на розміщення датацентру в точці k ; ddc_k розраховується так:

$$ddc_k = \max_{g \in V} \text{latency}_g \cdot \pi_{g,k},$$

тут latency_g – затримка між датацентром та контролером g , $\text{latency}_g = \min_{\{k: k \in V \wedge v_k = 1\}} d_{g,k}$;

$\pi_{g,k}$ – булева змінна, яка рівна одиниці, якщо контролер g обслуговується датацентром, розміщеним в точці k .

Кожен функціональний блок характеризується кількістю ресурсів кожного з m типів, які йому виділяються. Щоб визначити, скільки ресурсів кожного типу виділити кожному функціональному блоку системи, представимо аналітичну модель такої багатоетапної системи. Розглянемо систему, що складається з f блоків. Нехай бажаний час відповіді для системи буде T . Нехай інтенсивність надходження заявок в систему буде λ . На основі заданих значень інтенсивності надходження заявок і часу відповіді метою буде визначення необхідної кількості ресурсів, виділених кожному блоку так, що система може обслужити всі вхідні запити з середнім часом обслуговування T .

Наша модель заснована на мережі масового обслуговування. Системи масового обслуговування, які представляють один етап, виходять в ті, які представляють собою наступний рівень. Блоки моделюємо як $G/G/1$ системи масового обслуговування. Оскільки система $G/G/1$ може охопити довільний розподіл часу прибуття і довільний час обслуговування, вона дозволяє охопити поведінку різних систем.

Зауважимо, що модель може працювати з системами з довільним числом етапів, оскільки складне завдання моделювання багатоетапної системи зводиться до моделювання окремого блоку на кожному етапі. Також можливо розглядати системи, які передбачають не суворо послідовний зв'язок між блоками, проте дослідження таких систем тут не розглядається.

Поведінку $G/G/1$ системи можна описувати таким результатом теорії масового обслуговування [17]:

$$w_{ji} \leq \frac{\lambda_{ji} (\sigma_{a,ji}^2 + \sigma_{b,ji}^2)}{2(1 - A_{ji})},$$

де w_{ji} – середній час очікування для ресурсу і етапу j ;

λ_{ji} – середня інтенсивність надходження заявок; $\sigma_{a,ji}^2$

та $\sigma_{b,ji}^2$ – дисперсія часу між прибуттям запитів і часу обслуговування відповідно; $A_{ji} = \lambda_{ji} t_{ji}$, t_{ji} – середній час обслуговування на ресурсі і блоку j .

Нехай середній інтервал між надходженням заявок в систему є відомим і дорівнює $1/\lambda$, а також відомі дисперсії часу між надходженням і обслуговуванням заявок, які можуть отримуватись системою, наприклад, в результаті онлайн моніторингу.

Для моделювання загального часу обслуговування в системі приймаємо, що час обслуговування на різних ресурсах незалежний та адитивний. Конвеєрна обробка в системі показує, що це припущення допустиме, оскільки при застосуванні з'єданого часу обслуговування та однієї черги для запиту конвеєр між ресурсами не враховується. Відповідно до цього припущення вхідний потік у чергу формується з черги попереднього ресурсу [18].

Отже, черги ресурсів у кожному блоці розташовуються послідовно. Приймається також дисципліна обслуговування з розділенням процесора у кожній черзі.

Нехай c_j^i – обсяг ресурсу типу i , який виділений для

блоку j , а s_j^i означає час обробки заявки на ресурсі i на блоці j однією одиницею ресурсу.

Середній час обслуговування у системі обслуговування ресурсу (параметр t_{ji}) може бути обчислений шляхом ділення середнього часу обслуговування заявки на цьому ресурсі (s_j^i) на частку виділеного ресурсу (c_j^i).

Таким чином, загальний середній час обслуговування заявки W можна представити як:

$$W \leq \sum_{i,j} \frac{\lambda(\sigma_{a,ji}^2 + \sigma_{b,ji}^2)}{2 \left(1 - \lambda \cdot \frac{s_j^i}{c_j^i}\right)} + \sum_{i,j} \frac{s_j^i}{c_j^i} \quad (2)$$

Отже, необхідно знайти таку мінімальну кількість ресурсів кожного типу, яку необхідно виділити кожному вузлу, щоб задовольнити нерівність (2). Оптимізаційна задача формулюється так:

$$\left\{ c_j^i; i=1, m, j=1, f \right\} \sum_j \sum_i cost^i \cdot c_j^i$$

при обмеженні $\sum_{i,j} \frac{\lambda(\sigma_{a,ji}^2 + \sigma_{b,ji}^2)}{2 \left(1 - \lambda \cdot \frac{s_j^i}{c_j^i}\right)} + \frac{s_j^i}{c_j^i} \leq T$, (3)

де $cost^i$ – вартість використання одиниці ресурсу типу i ; T – задане допустиме значення повного середнього часу перебування в системі обслуговування.

В результаті рішення (3) отримуємо матрицю C^* розміром $(m \times f)$, (i, j) елемент якої містить оптимальне значення кількості i -го ресурсу, необхідного j -му вузлу c_j^{i*} , отримане після вирішення задачі (3).

Тоді збільшуємо об'єм ресурсів усіх блоків до цих значень за один крок, в результаті чого ефективна пропускна здатність збільшується миттєво.

Алгоритм визначення оптимальної кількості датацентрів, їх розміщення та кількості ресурсів, які виділяються функціональним блокам системи, що розгортаються в датацентрах, представлено на рис. 2.

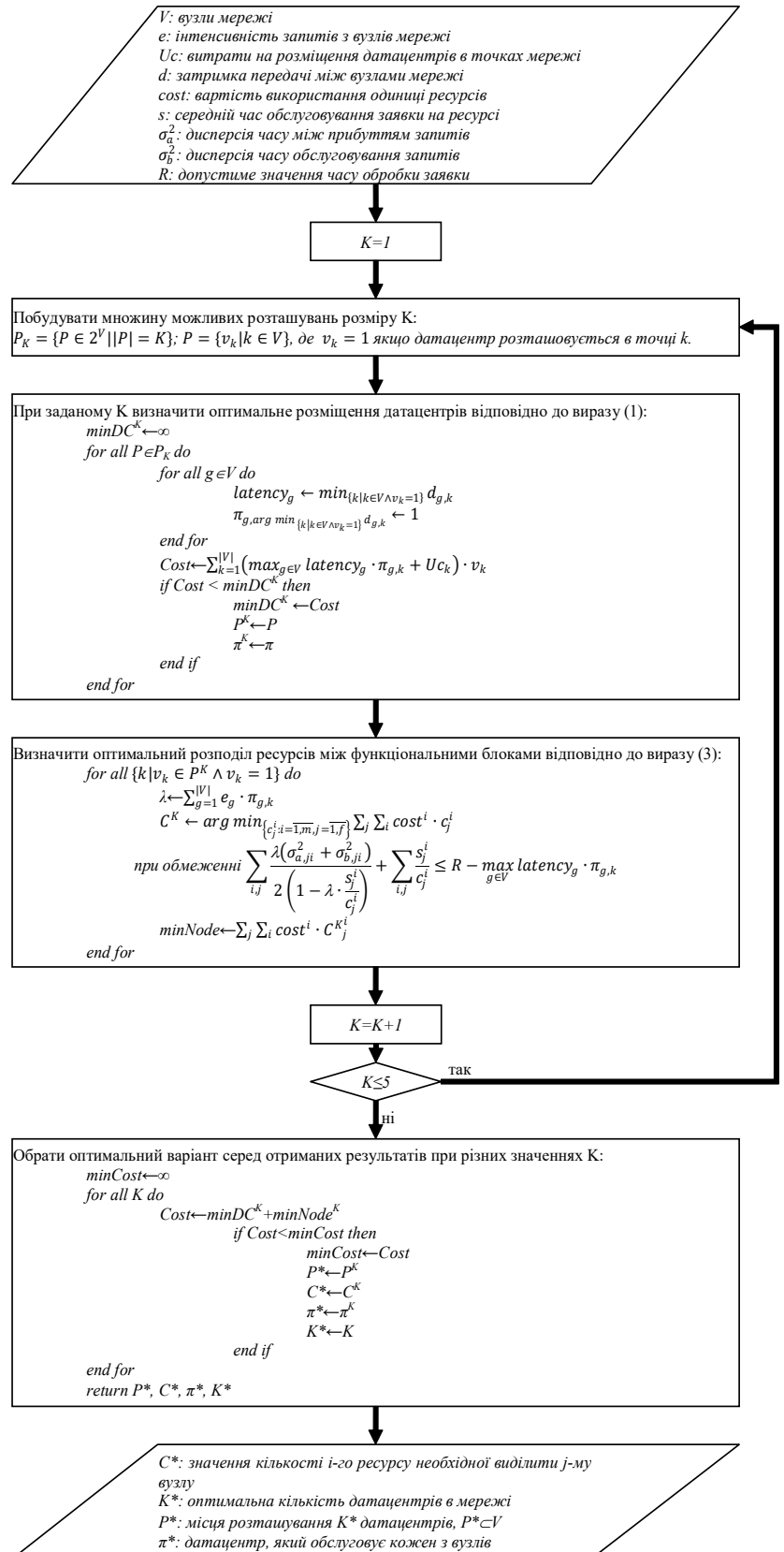


Рис. 2. Алгоритм розміщення ресурсів

Моделювання запропонованого вище методу було проведено в середовищі Mathcad. Зміну розподілу ресурсів на функціональних блоках при зміні вхідного навантаження проілюстровано на рис. 3. Приклад моделювання системи з чотирма вузлами, п'ятьма функціональними блоками та трьома типами ресурсів показав, що у порівнянні з фіксованим виділенням ресурсів можна отримати виграш у 3 рази.

3. Висновки

Встановлено, що динамічне надання ресурсів у віртуалізованих системах мобільного зв'язку ставить нові задачі, не вирішені у попередніх дослідженнях систем надання ресурсів. Запропоновано метод динамічного управління ресурсами системи датацентрів мобільного оператора, який використовує гнучку аналітичну модель для визначення оптимальної кількості датацентрів, топології їх розміщення та кількості ресурсів, які виділяються функціональним блоком системи, що розгортаються в датацентрах та передбачають використання декількох типів ресурсів.

Метод може застосовуватись при управлінні розгортанням віртуалізованих мережевих функцій на нижчерозташованій фізичній інфраструктурі для мінімізації витрат оператора зв'язку та покращення якості обслуговування абонентів.

В подальших дослідженнях запропонований метод може бути розширений для урахування складних зв'язків між функціональними блоками та можливості їх розподіленого розгортання.

Література: 1. *Globa L.* Scheduling of the data center infrastructure resource utilization based on the statistics / L. Globa, M. Skulysh, T. Pidhurska // 2015 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). Constanta, 2015. 2. *Basta A.* Applying NFV and SDN to LTE mobile core gateways, the functions placement problem / A. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, H. Morper et al. // 4th workshop on All things cellular: operations, applications, & challenges. Chicago, USA, 2014. P. 33-38. 3. *Balbas J.* Policy and charging control in the evolved packet system / J. Balbas, S. Rommer, J. Stenfelt // IEEE Communications. 2009. Vol. 47, No. 2. P. 68-74. 4. *John W.* Research Directions in Network Service

Chaining / W. John, K. Pentikousis, G. Agapiou, E. Jacob et al. // 2013 IEEE SDN for Future Networks and Services. Trento, 2013. P. 1-7. 5. *Hawilo H.* NFV: state of the art, challenges, and implementation in next generation mobile networks (vEPC) / H. Hawilo, A. Shami, M. Mirahmadi, R. Asal // IEEE Network. 2014. Vol. 28, No. 6. P. 18-26. 6. *Network Function Virtualization* [Online]. Available at: http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper3.pdf. 7. *Moens H.* VNF-P: A model for efficient placement of virtualized network functions / H. Moens, F. De Turck // 10th International Conference on Network and Service Management. Rio de Janeiro, 2014. P. 418-423. 8. *The HP Perspective: Network Functions Virtualization & Cloudification* [Online]. Available at: <https://ssl.www8.hp.com/hpmmatter/issue-no-4-spring-2015/hp-perspective-network-functions-virtualization-cloudification>. 9. *Software-Defined Networking: The New Norm for Networks* [Online]. Available at: <https://www.opennetworking.org/downloads/sdn-resources/white-papers/wp-sdn-newnorm.pdf>. 10. *Lombardo A.* An analytical tool for performance evaluation of software defined networking services / A. Lombardo, A. Manzolini, V. Riccobene, G. Schembra // 2014 IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS). Krakow, 2014. P. 1-7. 11. *Heller B.* The controller placement problem / B. Heller, R. Sherwood, N. McKeown // ACM HotSDN. Helsinki, Finland, 2012. P. 1-6. 12. *Ferrer Riera J.* Virtual network function scheduling: Concept and challenges / J. Ferrer Riera, E. Escalona, J. Batalle, E. Grasa, J. A. Garcia-Espin // 2014 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT). Vilanova i la Geltru, 2014. P. 1-5. 13. *Nokia Solutions and Networks. Technology Vision for the Gigabit Experience* [Online]. Available at: <https://nsn.com/file/26156/nsn-technology-vision-2020-white-paper.pdf>. 14. *Banerjee A.* MOCA: a lightweight mobile cloud offloading architecture / A. Banerjee, X. Chen, J. Erman, V. Gopalakrishnan et al. // ACM international workshop on Mobility in the evolving internet architecture (MobiArch '13). New York, USA, 2013. P. 11-16. 15. *Hock D.* Pareto-optimal resilient controller placement in SDN-based core networks / D. Hock, M. Hartmann, S. Gebert, M. Jarschel et al. // 25th International Teletraffic Congress (ITC). Shanghai, 2013. P. 1-9. 16. *Lange S.* Heuristic Approaches to the Controller Placement Problem in Large Scale SDN Networks / S. Lange, S. Gebert, T. Zinner, P. Tran-Gia et al. // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2015. Vol. 12, No. 1. P. 4-17. 17. *Teletraffic engineering handbook* [Online]. Available at: http://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.16.1-2001-PDF-E.pdf. 18. *Goudarzi H.* Maximizing Profit in Cloud Computing System via Resource Allocation / H. Goudarzi, M.

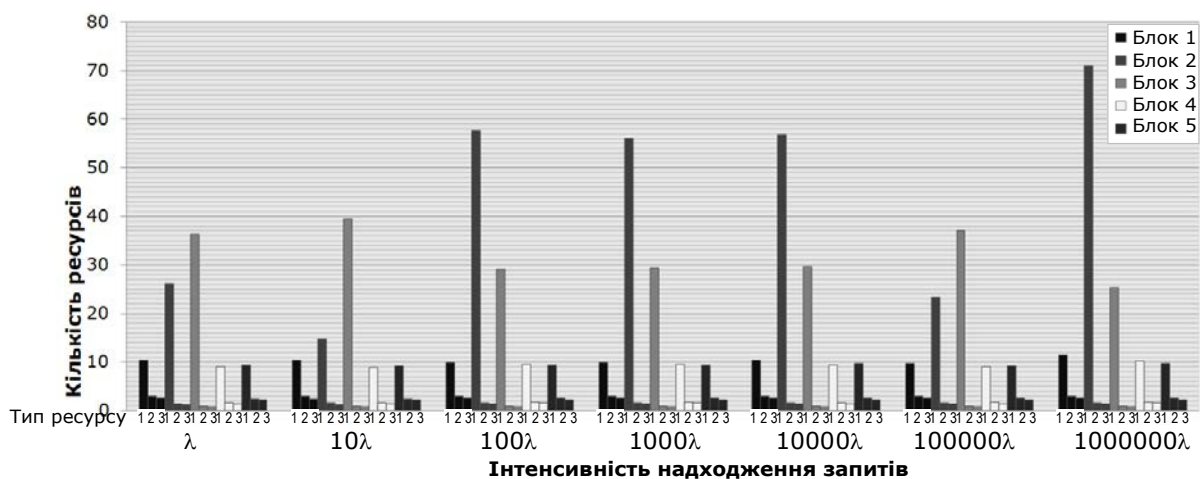


Рис. 3. Кількість ресурсів, виділена функціональним блоком, при зміні інтенсивності надходження запитів

Надійшла до редколегії 14.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Безрук В.М.

Скулиш Марія Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Наукові інтереси: білінг, дата-центри, хмарні обчислення, розподілені системи, SDN. Адреса: Україна, 01033, Київ, пров. Індустріальний, 2, тел. +38(044)4068299.

Суліма Світлана Валеріївна, аспірантка Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Наукові інтереси: мобільні мережі, NFV. пров. Адреса: Україна, 01033, Київ, пров. Індустріальний, 2, тел. 0666245361.

Skulysh Mariia Anatoliivna, PhD., associate professor, associate professor at National technical university of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”. Billing, data centers, cloud computing, distributed systems, SDN. Address: Ukraine, Kyiv, pr. Industrialnyy, 2, mob. +38(044)4068299.

Sulima Svitlana Valeriivna, Ph.D. student at National technical university of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”. Mobile networks, NFV. Address: Ukraine, Kyiv, pr. Industrialnyy, 2, mob. 0666245361.

УДК 004.056.5:004.7

АНАЛІЗ СТЕГANOГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ ПРИХОВУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У КОНТЕЙНЕРИ РІЗНИХ ФОРМАТІВ

ЮДІН О.К., ЗЮБІНА Р.В., ФРОЛОВ О.В.

Аналізуються існуючі стеганографічні методи. Визначаються основні поняття цифрової та комп’ютерної стеганографії. Доводиться, що цифрова стеганографія використовує методи приховування контейнера у дані, які мають аналогову природу. Показується, що комп’ютерна стеганографія вивчає способи приховування інформації за рахунок певних властивостей файлових систем, файлів різних форматів, виконуваних файлів. Пропонується структурна схема та математична модель типової стеганосистеми. Аналізується питання стійкості стеганосистем залежно від розміру та класу обраного контейнера. Визначаються показники оцінки якості стеганосистем та вводиться детальна класифікація стеганографічних методів за форматом контейнера.

Ключові слова: стеганографія, стеганоаналіз, контейнер, відеодані, аудіодані, цифрова стеганосистема.

1. Вступ

Питання збереження конфіденційності інформаційних потоків під час їх передачі каналами зв’язку займає провідну позицію у процесі забезпечення інформаційної безпеки особистості, суспільства та держави. На даний час найбільш поширеними технологіями захисту інформації в процесі передачі даних по відкритих каналах зв’язку є процедури поєднання криптографічних та стеганографічних методів (комбіновані). В процесі розвитку інформаційних систем стеганографія вийшла на принципово новий рівень, названий комп’ютерною стеганографією (КС).

Метою роботи є аналіз та класифікація існуючих методів стеганографічного захисту інформації залежно від класу та типу контейнерів.

2. Основні поняття комп’ютерної стеганографії

Основні поняття комп’ютерної стеганографії були визначені у 1996 р. на 1-й міжнародній конференції по приховуванню даних (Information Workshop on Information Hiding ‘96).

РИ, 2015, № 3

У понятті комп’ютерної стеганографії виділяють більш вузьке поняття – цифрової стеганографії (ЦС). В той час як цифрова стеганографія має на увазі приховування одних даних у інші, такі що мають аналогову природу (медіа, аудіофайлах тощо), то КС вивчає способи приховування інформації за рахунок певних властивостей файлових систем, файлів різних форматів, виконуваних файлів. Набір методів та засобів, що використовуються для створення непомітного (прихованого) каналу передачі даних, називається стеганографічною системою, або стеганосистемою [1]. При побудові стеганосистеми мають враховуватися такі положення:

– стеганосистема повинна мати прийнятну складність обчислення реалізації (тобто прийнятну кількість арифметико-логічних дій для вбудовування повідомлення у стеганоконтейнер та відтворення даних із цього ж контейнера);

– при виявленні факту існування вбудованого повідомлення порушник не повинен мати можливості дістати це повідомлення або відтворити відкритий текст;

– методи приховування мають забезпечити цілісність вбудованого повідомлення для одержувача;

– повинна забезпечуватись необхідна пропускна здатність стеганоконтейнера та каналу зв’язку;

– при проектуванні системи слід використовувати модель потенційного порушника такого рівня, що може мати повне уявлення про існування і функціонування стеганосистеми, але йому не повинно бути відомо про місце знаходження, вид і розмір ключа, за допомогою якого можна визначити факт присутності повідомлення (відкритого тексту) та його зміст;

– порушник має бути позбавлений будь-яких (технічних та будь-яких інших) переваг.

Сьогодні стеганографічні системи активно використовуються для вирішення таких задач захисту інформаційних ресурсів:

– обхід засобів моніторингу;

– захист авторських прав на інтелектуальну власність (ЦВЗ);

– захист конфіденційної інформації від НСД;

- приховування певних програм (таких як віруси);
- викрадення інформації (створення невідомих для власника каналів витоку інформації) тощо.

3. Схема типової стеганосистеми

Основними поняттями у стеганографії є повідомлення та контейнер. Повідомлення $m \in M$ – певна закрита інформація, яку необхідно приховати. $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ – множина всіх повідомлень, що формуються в стеганосистемі.

Контейнер $c \in C$ – множина відкритих даних, яка використовується для вбудовування закритої інформації; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}$ – множина всіх контейнерів, причому $q \gg n$.

Порожній контейнер – контейнер c , який не містить закритої інформації. Заповнений контейнер – такий контейнер, який містить приховану інформацію (C_m). Заповнений контейнер не повинен візуально відрізнятися від порожнього.

Контейнери бувають двох типів: потокові та фіксовані (рис.1). Поточкові контейнери – це послідовність бітів, яка постійно змінюється. Повідомлення вбудовується у нього в реальному режимі часу, тому заздалегідь невідомо, чи вистачить розміру даного контейнера для передачі повідомлення повністю. Фіксовані ж контейнери мають фіксований розмір, тому є можливість обрати оптимальний контейнер для передачі повідомлення. Розмір контейнера повинен, принаймні, у декілька разів перевищувати розмір повідомлення, і, чим більше дане співвідношення, тим надійніше приховане повідомлення. Для підвищення рівня захищеності секретної інформації повідомлення можна попередньо зашифрувати стійким криптографічним алгоритмом. Також часто використовується завадостійке кодування.

4. Математична модель типової стеганосистеми

Процес звичайного стеганографічного перетворення описується такими залежностями:

$$E : C \times M \rightarrow S; \quad (1)$$

$$D : S \rightarrow M, \quad (2)$$

де $S = \{(c_1, m_1), (c_2, m_2), \dots, (c_q, m_q)\} = \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$ – множина заповнених контейнерів (стеганограм).

Залежність (1) описує процес приховування інформації, залежність (2) – витягування прихованої інформації. Однією із обов'язкових умов при цьому є відсутність «перетину», тобто якщо $m_a \neq m_b$ (причому $m_a, m_b \in M$, а $(c_a, m_a), (c_b, m_b) \in S$), то $E(c_a, m_a) \cap E(c_b, m_b) = \emptyset$.

В загальному випадку стеганосистему можна представити як сукупність $\sum(C, M, S, E, D)$ – контейнерів, повідомлень та перетворень, що їх зв'язують. Завжди контейнери c обираються таким чином, щоб заповнений контейнер майже не відрізнявся від порожнього контейнера. Стеганосистема може вважатися надійною, коли $sim[c, E(c, m)] = 1$ (де sim – функція подібності). Контейнер може обиратися двома способами: довільно (сурогатний метод) та підбором найбільш придатного у конкретному випадку контейнера, який зміниться найменше при перетворенні. В останньому випадку контейнер обирається виходячи із умови:

$$c = \max sim[x, E(x, m)]. \quad (3)$$

В будь-якому випадку пряме та зворотне перетворення (E та D) мають відповідати одне одному та підлягати умові, що незначне викривлення контейнера (на величину δ) не має призводити до викривлення прихованої інформації:

$$E(c, m) \approx E(c + \delta, m) \text{ або}$$

$$D[E(c, m)] \approx D[E(c + \delta, m)] = m. \quad (4)$$

5. Стійкість стеганографічних систем

Всі описані вище способи використання стеганографії для формування контейнерів мають у необхідних умо-

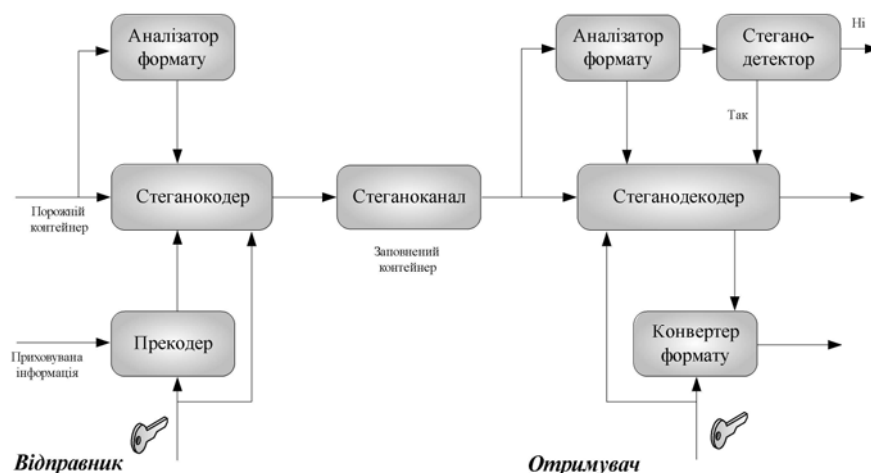


Рис. 1. Структурна схема типової стеганосистеми

вах певний розмір повідомлення та значення надійності його приховування. Оскільки при збільшенні об'єму повідомлення збільшуватиметься, розмір стеганоконтейнера, файл, який виконує роль контейнера, викликати певні підозри. Отже, існує залежність надійності приховування від об'єму повідомлення, яка продемонстрована на графіку (рис. 2).

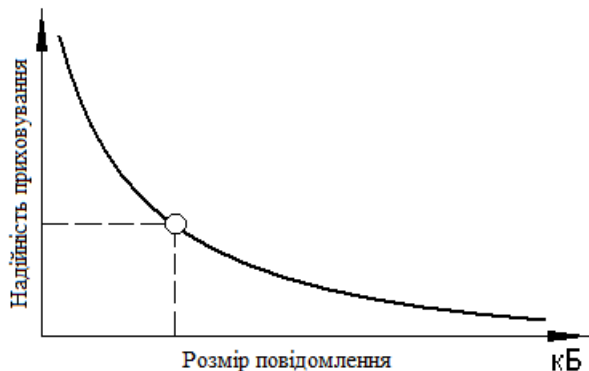


Рис. 2. Графік залежності надійності приховування даних від розміру повідомлення

Шляхом зміни певних якостей стеганоконтейнера можна досягти високої надійності приховування повідомлення або його великого обсягу, але ні в якому випадку не обох показників одночасно, тому що ріст одного із цих значень неминує призводить до зменшення іншого. Таким чином, існує перспектива прийняття оптимального рішення при виборі між об'ємом даних та стійкістю системи до стеганоаналізу.

6. Стеганографічний аналіз

Основою стеганографічного аналізу є моделювання та дослідження стеганографічних систем для виявлення їх вразливих місць та визначення їх надійності. Термінологія стеганоаналізу майже ідентична термінології криптоаналізу, але є деякі відмінності. Криптоаналіз призначений для розшифрування криптограм, в той час як стеганоаналіз використовується для виявлення прихованої інформації і відтворення відкритого тексту.

З рівнем секретності стеганосистеми ділять на теоретично стійкі, практично стійкі та нестійкі.

Теоретично стійкі стеганосистеми проводять приховування інформації у тих частинах повідомлення, значення елементів яких не перевищує рівня шумів або певних помилок, і при цьому теоретично доведено, що неможливо створити стеганоаналітичний метод виявлення прихованої інформації.

Практично стійкі стеганосистеми виконують таку модифікацію фрагментів контейнера, що виявлення прихованої інформації можливе, але відомо, що у порушника подібні стеганоаналітичні методи відсутні.

Нестійкі стеганосистеми перетворюють контейнер таким чином, що існуючими стеганоаналітичними системами можна виявити секретну інформацію. В даному випадку стеганоаналіз дозволяє виявити слабкі

місця такої системи для подальшої її модифікації до теоретично стійкої або, принаймні, до практично стійкої стеганосистеми.

7. Атаки на стеганографічну систему

Стеганографічна система вважається зламаною, якщо порушник зміг довести факт існування прихованого повідомлення у перехопленому контейнері. Передбачається, що порушник може використовувати будь-який вид атак та має необмежені обчислювальні можливості. По аналогії із криптоаналізом виділяють такі види атак на стеганосистеми:

- на основі відомого заповненого контейнера;
- на основі відомого вбудованого повідомлення;
- на основі обраного прихованого повідомлення;
- на основі обраного заповненого контейнера;
- на основі відомого порожнього контейнера (не має аналогу у криптоаналізі);
- на основі обраного порожнього контейнера (не має аналогу у криптоаналізі);
- на основі відомої математичної моделі контейнера або його частини (не має аналогу у криптоаналізі).

8. Оцінка якості стеганосистеми

Кількісна оцінка стійкості стеганографічної системи до зовнішніх впливів є доволі складною задачею, яка зазвичай реалізується методами системного аналізу, математичного моделювання або експериментального дослідження.

Надійна стеганосистема вирішує дві основні задачі:

- приховування самого факту існування повідомлення (перший рівень захисту);
- запобігання НСД до інформації шляхом вибору відповідного методу приховування інформації (другий рівень захисту).

Можливе існування третього рівня захисту – попередній криптографічний захист повідомлення (шифрування).

Модель аналізу загроз та оцінки стійкості стеганосистеми представлена на рис.3.

Оцінка рівня прихованості забезпечується шляхом проведення аналітичних досліджень та випробувань. Надійність стеганосистеми визначається, в основному, можливостями обчислювальної системи.

9. Стеганографічні методи приховування даних

Більшість методів КС базуються на двох принципах:

- файли, що не потребують абсолютної точності, можуть бути видозмінені (певною мірою) без втрати функціональності;
- органи відчуттів людини не здатні розрізнити зміни в модифікованих таким чином файлах та відсутній спеціальний інструментарій для цього.



Рис. 3. Модель аналізу загроз та оцінки стійкості стеганосистеми

Відповідно до існуючих методів комп'ютерної стеганографії, запропоновано класифікацію, зображену на рис. 4. За способом вибору контейнера вирізняють сурогатні, селективні та конструюючі методи. В сурогатних методах стеганографії можливість вибору контейнера відсутня, обирається перший наявний контейнер, який, у більшості випадків, не є оптимальним. Селективні методи дозволяють обирати оптимальний контейнер. Для цього генерують велику кількість альтернативних контейнерів, певна хеш-функція яких порівнюється із хеш-функцією повідомлення. В конструюючих методах контейнер генерується сам.

За способом доступу до інформації, що приховується, розрізняють методи для поточкових та фіксованих контейнерів.

За способом організації контейнера бувають систематичні та несистематичні методи КС. У систематичних методах можна точно сказати, де в контейнері знаходяться інформаційні біти, а де – біти шуму. У несистематичних методах для виділення повідомлення доводиться обробляти всю стеганограму.

За принципом приховування даних є методи безпосередньої заміни та спектральні методи. Методи безпосередньої заміни використовують надлишок

інформації у малозначних частинах контейнера для вбудовування повідомлення. Спектральні ж методи використовують спектральні представлення елементів контейнера для приховування повідомлення. В основному в стеганографії використовується саме надлишковість файлу-контейнера.

Варто також виділити методи, що використовують спеціальні властивості форматів файлів:

- зарезервовані поля форматів файлів, які зазвичай заповнюються нулями і не враховуються програмами;
- спеціальне форматування даних (зсув слів, речень, абзаців або шаблонний вибір символів);
- використання незадіяних частин оптичних та магнітних носіїв.

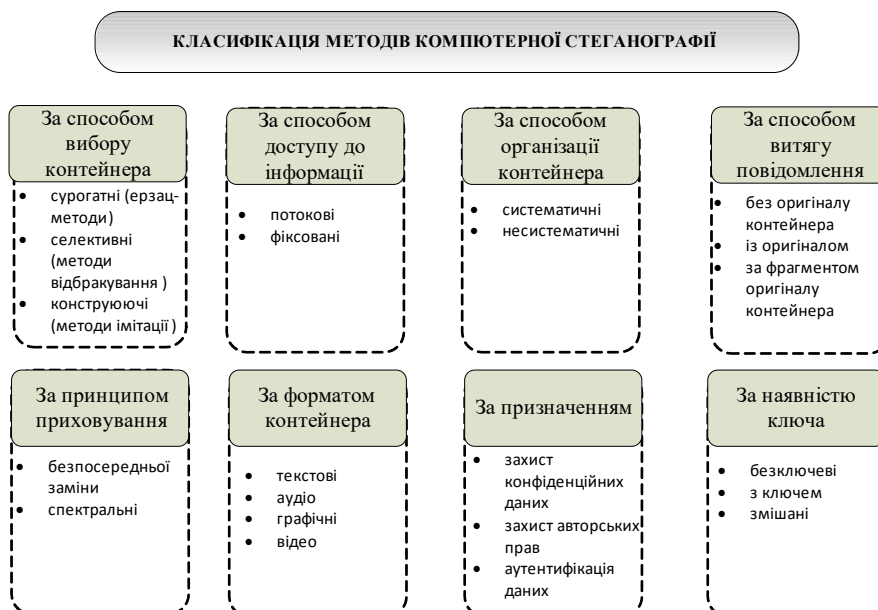


Рис. 4. Класифікація методів КС

Але для таких методів характерні низька пропускна здатність, низькі надійність та рівень прихованості.

За призначенням розрізняють методи для прихованої передачі даних (або прихованого зберігання) та методи для приховування даних цифрових об'єктів з метою захисту авторських прав на них.

За типами контейнера виділяють стеганографічні методи із текстовими, графічними, аудіо- та відеофайлами-контейнерами.

За наявністю ключа виділяють безключові, з ключем та змішані стеганосистеми.

Для функціонування безключової стеганосистеми, крім алгоритму графічного перетворення, відсутня необхідність в додаткових даних, на зразок стеганоключа.

Таким чином, безпека безключової стеганосистеми базується тільки на секретності використовуваних стеганографічних перетворень.

Ключова стеганосистема поділяється на системи з відкритим та закритим ключами. Система з відкритим ключем передбачає наявність закритого каналу зв'язку для передачі стеганоключа і забезпечує вищий рівень захисту повідомлення порівняно з безключовою, однак потребує затрат на передачу ключа. Стеганосистема з відкритим ключем працює по аналогії з криптографічними алгоритмами, однак потрібно зазначити, що стеганоключ не шифрує дані, а приховує місце їх вбудовування в контейнері.

Змішані стеганосистеми використовують як відкритий, так і секретний ключ.

Провівши загальну класифікацію методів комп'ютерної стеганографії, детально розглянемо методи стеганографічного приховування інформації залежно від формату використовуваного контейнера.

10. Приховування даних у тексті

Для приховування інформації у тексті (лінгвістична стеганографія) використовується звичайна надлишковість письмової мови або формати представлення тексту.

Найскладнішим об'єктом для приховування є електронна версія тексту, тому що його друкована версія може бути зображенням в електронному вигляді, обробленим відповідними методами. Ця складність в основному обумовлена відносним дефіцитом у тексті надлишковості, на відміну від зображення або аудіофайлу. В той час як існує можливість внести невидимі для ока модифікації у зображення або не відчутні для слухової системи людини (ССЛ) зміни у звучанні аудіофайлу, будь-яка зайва літера, зайвий символ або зайвий знак пунктуації може бути виявлений випадковим читачем.

Існують три основні методи приховування даних у тексті, що найширше розповсюджені:

- методи довільних інтервалів;

- синтаксичні методи;
- семантичні методи.

11. Методи довільного інтервалу

Дані методи виконують приховування даних за допомогою маніпулювання пропусками у тексті.

1) Метод зміни інтервалу між реченнями.

Повідомлення вбудовуються у двійковому форматі – після кожного символу завершення речення ставиться один або два пропуски, що відповідають бітам «1» та «0». Даний метод, хоч і дуже простий, але має багато недоліків:

- для приховування повідомлення невеликого об'єму потрібен контейнер значного розміру – при умові, що речення мають середньостатистичний вигляд (приблизно 2 рядки по 80 символів на кожен), 1 біт повідомлення приховується у 160 байтах текстового контейнера;
- можливість вбудовування повідомлення дуже залежить від структури текстового контейнера, наприклад, вірші, зазвичай, не мають однозначних знаків завершення повідомлення;
- існують текстові редактори, які самостійно вписують пропуск чи два після знаку закінчення речення (автозавершення);
- непослідовна поява пропусків у тексті може викликати підозри у читача.

2) Метод зміни кількості пропусків у кінці рядка.

Даний метод полягає у додаванні пропусків у кінці кожного рядка. Кількість пропусків залежить від значення біту, що вбудовується. Два пропуски кодують один біт на рядок, чотири пропуски – два біти на рядок, вісім пропусків – три біти на рядок і т.д. Такий підхід дозволяє значно збільшити кількість прихованої інформації порівняно із попереднім методом. Додатковою перевагою даного методу є те, що його можна використати для будь-якого тексту, оскільки дані вільні місця будуть непомітними по відношенню до основного тексту. Недоліком даного методу (як і попереднього) є те, що деякі текстові редактори доставляють пропуски в кінці рядків. Також неможливе використання даного методу на папері у зв'язку із неможливістю розібрати кількість пропусків.

3) Метод зміни кількості пропусків між словами вирівняного по ширині тексту.

Даний метод додає пропуски між словами у тексті, який вирівняний по ширині. Один пропуск між словами інтерпретується як «0», два пропуски – як «1». В середньому даний метод дозволяє приховувати по декілька біт на рядок. Але враховуючи те, що не кожний пропуск між словами може використовуватись для вбудовування інформації, і для однозначного вирішення який пропуск є прихованою інформацією, а який є частиною оригінального тексту, використовують метод вбудовування, аналогічний манчестерсько-

му кодуванню, тобто комбінація бітів «01» вважається «1», а «10» - «0», пари ж «00» та «11» вважаються порожніми.

12. Синтаксичні та семантичні методи

До синтаксичних відносяться методи, які використовують для приховування інформації неоднозначності пунктуації у тексті, та методи зміни структури та стилю тексту. Наприклад, фрази «синій, зелений, червоний» та «синій, зелений та червоний» мають однаковий сенс, але зміна цих форм може бути поставлена у відповідність двійковому коду (форма із використанням сполучника «та» – «1», без сполучника «та» - «0»). Але даний метод необхідно використовувати з обережністю, бо в деяких випадках постійна зміна подібних форм може знизити сприймання даного тексту або отримання даним текстом діаметрально протилежного сенсу. Інколи краще використовувати методи, які змінюють стиль та структуру тексту. Наприклад, речення «Існує немало випадків, коли правила пунктуації є неоднозначними» можна сформулювати таким чином: «Правила пунктуації є неоднозначними у багатьох випадках». Такі методи є більш непомітними для читача, але можливість їх використання зникає у класичних текстах, в яких такі форми будуть незвичні для автора. Дані методи також дуже складні у автоматизації процесу вбудовування та витягу бітів повідомлення.

Семантичні методи подібні до синтаксичних, але замість вбудовування даних заміною двох неоднозначних граматичних форм вони використовують синоніми. Так, слово «але» може бути поставлене у відповідність «1», а слово «однак» – «0». Для цього необхідно мати таблицю синонімів. А враховуючи велику кількість синонімів до одного слова, існує можливість кодування одразу великої кількості біт.

13. Приховування даних у нерухомих зображеннях

В більшості випадків використовуються стеганографічні методи із графічними зображеннями в ролі контейнерів саме через такі причини:

- розповсюдження цифрових фотографій та відео, які необхідно захищати від протизаконного тиражування та розповсюдження;
- відносно великий об'єм графічних зображень, що дає широкий простір для приховування даних (великого розміру);
- розмір контейнера відомий заздалегідь, що дає змогу обирати оптимальний контейнер;
- відносно слабка чутливість людського ока до незначних змін у цифрових графічних зображеннях;
- добре розроблені, в останній час, методи цифрової обробки зображень.

14. Приховування даних у просторовій області

Загальний принцип таких алгоритмів полягає у заміні надлишкової, малозначної частини зображення біта-

ми секретного повідомлення. Для витягу повідомлення необхідно знати алгоритм, по якому воно розмішувалося у зображенні.

1) Метод заміни найменш значущого біту.

Метод заміни найменш значущого біту (НЗБ, LSB – Less Significant Bit) - найбільш розповсюджений серед методів даного класу. НЗБ несуть у собі найменше інформації. Як відомо, людина, у більшості випадків, не може розрізнити інформацію у даних бітах. При цьому в чорно-білому зображенні (в якому кожен піксель кодується одним байтом) об'єм вбудованих даних може займати до 1/8 об'єму зображення-контейнера. Популярність даного методу обумовлена його простотою та можливістю приховувати доволі великі об'єми даних. В більшості випадків цей метод працює із растровими зображеннями, представленими у форматі без компресії даних (GIF, BMP).

Недоліком даного методу є його низька стійкість до викривлення контейнера внаслідок навіть незначних помилок у каналі передачі або активних і пасивних атак порушника. Для уникнення цієї проблеми використовують завадостійке кодування.

2) Метод псевдовипадкового інтервалу.

Даний підхід полягає у псевдовипадковому розподіленні бітів повідомлення по зображенню-контейнеру, внаслідок чого відстань між двома вбудованими бітами визначається псевдовипадково. Цей підхід ефективний у випадку, коли об'єм повідомлення набагато менший за контейнер. Недоліком такого методу є те, що біти повідомлення розподіляються по контейнеру у тому ж порядку, що і у самому повідомленні.

3) Метод псевдовипадкової перестановки.

Основою цього методу є генератор псевдовипадкових чисел (ПВЧ), який формує певну псевдовипадкову послідовність індексів j_1, j_2, \dots, j_k і k -й біт повідомлення зберігається у пікселі із індексом j_k .

Функція перестановки має бути псевдовипадковою і мати достатньо великий набір індексів, щоб жоден з них не повторився жодного разу і не відбулося «перетину». Цей метод забезпечує рівномірний розподіл інформаційних бітів по контейнеру. Імовірність перетину зменшується із зменшенням співвідношення (довжина повідомлення)/(довжина контейнера).

4) Метод блочного приховування.

При використанні даного методу зображення-контейнер розбивають на блоки, що не перетинаються між собою. Для кожного блоку визначають певний біт парності. В кожному блоці приховують один секретний біт. Якщо визначений біт парності не відповідає секретному біту, проводять інвертування НЗБ блоку, доки біт парності не буде, по суті, секретним бітом.

Цей метод, як і всі попередні, має низьку стійкість до викривлень, але він має свої переваги – існує можливість модифікувати такий піксель у блоку, щоб статистика контейнера була змінена якомога менше.

5) Метод заміни палітри.

Ще один метод приховування даних у зображенні – зміна палітри кольорів. Палітра кольорів зображення зберігається у вигляді списку пар індексів (i, A_i) , який визначає відповідність між індексом i та його вектором кольору. Кожному пікселю зображення ставиться у відповідність певний індекс у таблиці. Оскільки порядок кольорів у палітрі не важливий для відновлення зображення, конфіденційна інформація може бути прихована шляхом перестановки кольорів у палітрі.

15. Приховування даних у частотній області зображення

Описані вище стеганографічні методи приховування даних у нерухомих зображеннях є нестійкими до більшості відомих видів спотворень. Наприклад, конвертування зображення у інший формат із компресією призводить до часткового або повного руйнування повідомлення. Більш стійкими до спотворень є методи, що використовують для приховування даних не просторову область контейнера, а частотну.

Найпоширеніші методи приховування даних у частотній області використовують вейвлет-перетворення та дискретно-косинусне перетворення (ДКП). Це по-

Даний метод є модифікацією попереднього. Основною зміною є той факт, що при використанні даного методу секретна інформація приховується не в усіх блоках зображення, а тільки в обраних (найбільш підходящих).

3) Метод Фрідріх.

Згідно з цим методом, який по суті є комбінацією двох алгоритмів, секретні дані вбудовуються в низькочастотні та середньочастотні коефіцієнти ДКП. Каскадне використання цих двох алгоритмів може дати непогані результати відносно стійкості стеганографічної системи до різних атак.

4) Методи розширення спектра.

Система зв'язку є системою із розширеним спектром, коли:

– смуга частот, яка використовується при передачі, значно ширша за необхідну для передачі повідомлення, внаслідок чого співвідношення сигнал/шум є доволі низьким, і повідомлення важко знайти у каналі (особливо для органів чуття людини);

– розширення спектра відбувається за допомогою так званого розширюючого сигналу, який не залежить від інформації, що передається. Присутність енергії сигналу в усіх частотних діапазонах робить радіосигнал

$$\Omega(u, v) = \frac{\zeta(u) \cdot \zeta(v)}{\sqrt{2N}} \cdot \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C(x, y) \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot u \cdot (2x+1)}{2N} \right] \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot v \cdot (2y+1)}{2N} \right]; \quad (5)$$

$$\Omega(u, v) = \frac{\zeta(u) \cdot \zeta(v)}{\sqrt{2N}} \cdot \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C(x, y) \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot u \cdot (2x+1)}{2N} \right] \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot v \cdot (2y+1)}{2N} \right], \quad (6)$$

яснюється широким їх розповсюдженням у технологіях компресії цифрових зображень.

ДКП в цифровій обробці зображень використовується в такому вигляді:

де $C(x, y)$ та $S(x, y)$ - елементи оригінального та відновленого зображення розміром $N \times N$; x, y – просторові координати пікселів зображення; $\Omega(u, v)$ – масив коефіцієнтів ДКП; u, v – координати у частотній області; $\zeta(u) = 1/\sqrt{2}$, якщо $u = 0$, та $\zeta(u) = 1$, якщо $u > 0$.

1) Метод відносної заміни величин коефіцієнтів ДКП.

При використанні даного методу зображення розбивається на блоки 8×8 пікселів. До кожного з блоків застосовується ДКП, в результаті чого отримується матриця коефіцієнтів ДКП 8×8 . Кожен блок призначений для приховування одного біту даних. Приховування проводиться заміною одного коефіцієнта у блоку.

2) Метод Бенгама-Мемона-Ео-Юнга.

стійким до завад, а інформацію, що знаходиться у контейнері, стійкою до її видалення.

– Відновлення первинної інформації відбувається шляхом зіставлення отриманого сигналу та синхронізованої копії кодового (розширюючого) сигналу.

16. Приховування даних у аудіосигналах

Особливий розвиток отримали стеганографічні методи приховування інформації у аудіосередовищі. Це охарактеризовано тим, що ССЛ працює у надширокому динамічному діапазоні і має доволі малий різницевий діапазон. Виходячи із цього, можна зробити висновки, що у аудіофайлах присутній широкий простір для приховування даних. Також ССЛ не здатна розрізняти абсолютну фазу, вирізняє лише відносну. Крім того, існують деякі види спотворень, викликаних зовнішнім середовищем, які можна використати для приховування даних.

1) Кодування найменш значущих бітів (часова область).

Даний метод є найпростішим серед методів приховування даних у аудіосигналах. Його суть полягає у заміні НЗБ у кожній точці вибірки із сигналу, представленого у двійковій послідовності. Використання даного методу обумовлює високу пропускну здатність каналу, платою за що є добре чутний низькочастотний шум. Дану проблему можна вирішити використанням записів, на яких присутній певний шум, наприклад, звук стадіону, під час концерту. Але як і у аналогічних методах приховування інформації у нерухомих зображеннях, заповнені контейнери є вразливими до сторонніх впливів, окрім випадків, коли секретна інформація вбудована із внесенням надлишковості. Однак останнє при збільшенні стійкості каналу зменшує швидкість передачі даних.

2) Метод фазового кодування (частотна область).

Основною ідеєю методу фазового кодування є заміна фази вихідного звукового сегмента на деяку опорну

ССЛ стає нездатною виявити різницю між двома сигналами, а ехо-сигнал сприймається лише як додатковий резонанс. Цей метод непростий у реалізації, тому що значення зсуву дуже важко визначити. Воно значною мірою залежить від якості початкового сигналу і, само собою, від слухача [2].

17. Приховування даних у відеоданих

Стеганографічні методи приховування рідше за все використовуються у відеоданих, оскільки даний файл складається з динамічних зображень (фреймів) та звукової доріжки. Для цих цілей найчастіше використовуються контейнери у форматах MPEG – 2, MPEG – 4 та AVI. Варто також зазначити, що досі не використовуються як контейнери одночасно аудіодоріжки та фрейми. Загальна схема вбудовування повідомлення у відеодані зображена на рис. 5.

На сьогодні існує три методи для приховування інформації у відеоданих, а саме:

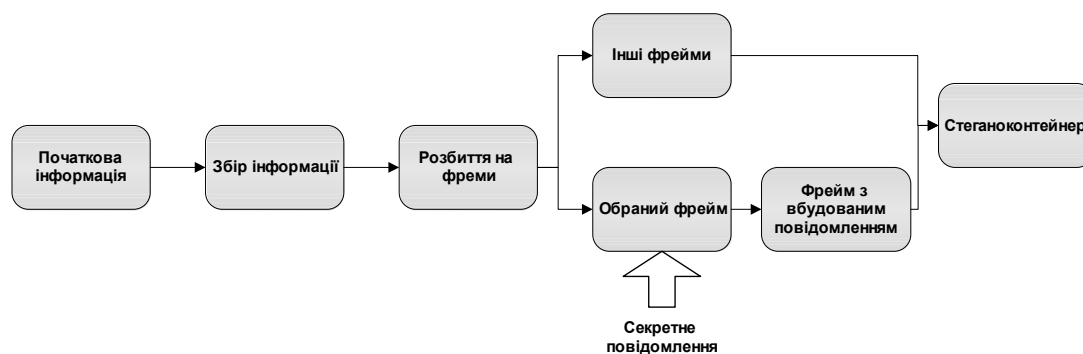


Рис. 5. Загальна схема вбудовування повідомлення у відеодані

фазу, характер зміни якої і відражає повідомлення, яке необхідно приховати. При правильному використанні даний метод є найефективнішим для приховування даних у аудіосигналах, оскільки доки модифікація фази достатньо мала, наявність повідомлення може бути абсолютно не відчутно на слух (не враховуючи використання спецтехніки).

3) Метод розширення спектра (часова область).

Даний метод майже ідентичний методу приховування даних у нерухомих зображеннях шляхом розширення спектра. Секретне повідомлення розподіляється по частотах несучого сигналу рівномірно, так щоб співвідношення сигнал(повідомлення)/шум у каналі було дуже низьким і не виникло підозр щодо наявності повідомлення. Сигнал-контейнер, в даному випадку, обирається набагато більший за секретне повідомлення.

4) Приховування даних із використанням ехо-сигналу.

Даний метод вбудовує повідомлення у аудіосигнал-контейнер шляхом введення у нього ехо-сигналу. Дані приховуються зміною параметрів ехо-сигналу: початкової амплітуди, швидкості затухання та зсуву. Коли зсув між оригінальним сигналом та ехо-сигналом зменшується, починаючи з певного значення,

Метод вбудовування на рівні коефіцієнтів – біти прихованого повідомлення вбудовуються в коефіцієнти ДКП. Враховуючи, що використовуються алгоритми стиснення, основною проблемою стає накопичення зсуву та помилок. Для зменшення внесених змін використовують додатковий спеціальний сигнал. В зв'язку з обмеженням бітової швидкості при вбудовуванні змінюється лише 10-12% коефіцієнтів ДКП. При використанні даного методу приховується інформація зберігається при фільтруванні, зашумленні (адитивним шумом) і дискретизації.

Метод вбудовування інформації на рівні бітової площини - відрізняється високою пропускну здатністю і легкими обчисленнями. Але є й істотний недолік: інформація, вбудована таким чином, може бути легко видалена. При повторному накладенні послідовності біт якість відео погіршиться, а приховується інформація буде знищена.

Метод вбудовування інформації за рахунок енергетичної різниці між коефіцієнтами - в основі лежить диференціальне вбудовування енергії. Цей метод може використовуватись для багатьох алгоритмів стиснення, не тільки для MPEG. Інформація вбудовується шляхом видалення декількох коефіцієнтів ДКП [3].

18. Висновки

Стеганографічні системи захисту інформаційних потоків під час їх зберігання та передачі займають провідні позиції у процесах забезпечення інформаційної безпеки.

Проведено аналіз існуючих стеганографічних методів. Визначено основні поняття цифрової та комп'ютерної стеганографії. Доведено, що цифрова стеганографія використовує методи приховування контейнера у дані, які мають аналогову природу. Показано, що комп'ютерна стеганографія вивчає способи приховування інформації за рахунок певних властивостей файлових систем, файлів різних форматів, виконуваних файлів. Представлено структурну схему та математичну модель типової стеганосистеми. Проаналізовано питання стійкості стеганосистем залежно від розміру та класу обраного контейнера. Визначено показники оцінки якості стеганосистем та введено детальну класифікацію стеганографічних методів за форматом контейнера.

Література: 1. Юдін О.К., Конахович Г.Ф., Корченко О.Г. Захист інформації в мережах передачі даних: Підручник. К.: Видавництво ТОВ НВП «ІНТЕРСЕРВІС», 2009. 2. Конахович Г. Ф., Пузыренко А. Ю. Компьютерная стеганография //Теория и практика/Киев: МК-Пресс. 2006. 3. Моденова О. В. Стеганография и стегоанализ в видеофайлах //Прикладная дискретная математика. Приложение. 2010. № 3.

Надійшла до редколегії 10.09.2015

Юдін Олександр Костянтинович, доктор технічних наук, професор, директор інституту комп'ютерних інформаційних технологій Національного авіаційного університету. Наукові інтереси: комплексні системи захисту інфор-

мації. Захоплення та хобі: волейбол, морські прогулянки, серфінг. Адреса: Україна, Київ, пр. Космонавта Комарова, 1, тел. 097-707-77-37.

Зюбіна Руслана, викладач кафедри комплексних систем захисту інформації Національного авіаційного університету. Наукові інтереси: комплексні системи захисту інформації. Захоплення та хобі: волейбол, морські прогулянки, серфінг. Адреса: Україна, Київ, пр. Космонавта Комарова, 1, тел. 097-707-77-37.

Фролов Олег, здобувач кафедри комплексних систем захисту інформації Національного авіаційного університету. Наукові інтереси: комплексні системи захисту інформації. Захоплення та хобі: волейбол, морські прогулянки, серфінг. Адреса: Україна, Київ, пр. Космонавта Комарова, 1, тел. 097-707-77-37.

Yudin Alexander, Doctor of Technical Sciences, professor, Director of the Institute of Computer Information Technologies, The National Aviation University, Kyiv, Ukraine. Scientific interests: complex information security system. Interests and hobbies: volleyball, boating, surfing. Address: Kosmonavta Komarova ave.1, Kyiv, Ukraine, 097-707-77-37.

Zubina Ruslana, lecturer of the Department of complex information security systems, The National Aviation University, Kyiv, Ukraine. Scientific interests: complex information security system. Interests and hobbies: volleyball, boating, surfing. Address: Kosmonavta Komarova ave.1, Kyiv, Ukraine, 097-707-77-37.

Frolov Oleg, aspirant of the Department of complex information security systems, The National Aviation University, Kyiv, Ukraine. Scientific interests: complex information security system. Interests and hobbies: volleyball, boating, surfing. Address: Kosmonavta Komarova ave.1, Kyiv, Ukraine, 097-707-77-37.



ПСЕВДОНОРМАЛИЗОВАННЫЕ КВАЗИ-PHI-ФУНКЦИИ ДЛЯ МНОГОГРАННИКОВ

ПАНКРАТОВ А.В., РОМАНОВА Т.Е.,
СТОЯН Ю.Е.

Предлагаются конструктивные средства математического моделирования для задач оптимальной упаковки в общем случае невыпуклых многогранников. В целях аналитического описания ограничений на минимально и максимально допустимые расстояния между многогранниками, допускающими непрерывные повороты и трансляции, строятся псевдонормализованные квази-phi-функции.

Ключевые слова – невыпуклые многогранники, непрерывные вращения, непересечение, допустимые расстояния, квази-phi-функции.

Введение

Задачи упаковки и раскроя (Cutting and Packing) относятся к классу NP-сложных и являются предметом исследования вычислительной геометрии, а методы их решения – новым направлением теории исследования операций. В данной работе рассматривается класс задач оптимальной упаковки многогранников, который имеет широкий спектр научных и практических применений, в частности, в машиностроении, материаловедении, химической промышленности и других. Многие публикации посвящены данной тематике, в которых, как правило, предлагаются эвристические подходы. Так, в статье Egeblad et al [1] излагается эффективный способ решения задачи упаковки многогранников внутри многогранного контейнера. Основная идея метода заключается в точной одномерной трансляции заданного многогранника в положение, которое минимизирует его объем пересечения со всеми другими многогранниками. Авторы статьи Liu et al [2] предлагают новый эвристический алгоритм НАРЕ3D, основанный на принципе минимальной общей потенциальной энергии для задачи 3D упаковки невыпуклых многогранников в прямоугольном параллелепипеде фиксированной ширины и длины, но переменной высоты.

Одной из важных проблем, которые возникают при математическом моделировании данного класса задач, является аналитическое описание ограничений на заданные минимально и максимально допустимые расстояния между произвольными многогранниками, допускающими непрерывные повороты и транс-

ляции. Как известно, наиболее мощным средством математического моделирования в классе задач упаковки и раскроя является метод phi-функций [7]. В работах в [3, 4] приводятся phi-функции для некоторых видов 3D-объектов, допускающих непрерывные вращения, таких как прямоугольные параллелепипеды и выпуклые многогранники. Однако на данный момент построить phi-функции для произвольных многогранников не удалось. Кроме того, открытым остается вопрос моделирования ограничений на минимально и максимально допустимые расстояния между парой произвольных многогранников.

В данном исследовании в целях аналитического описания обозначенных выше ограничений используется класс квази-phi-функций [5].

Постановка задачи

Пусть имеются два невыпуклых многогранника Q_q и Q_g (рис. 1).

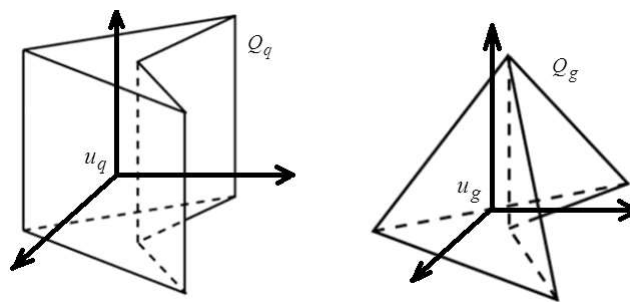


Рис. 1. Невыпуклые многогранники Q_q и Q_g

Положение и ориентация каждого многогранника Q_q и Q_g определяется вектором его переменных параметров размещения $u_q = (v_q, \theta_q)$ и $u_g = (v_g, \theta_g)$ соответственно. Здесь $v = (x, y, z)$ – вектор трансляции, $\theta = (\theta^1, \theta^2, \theta^3)$ – вектор угловых параметров, где $\theta^1, \theta^2, \theta^3$ – углы поворота от оси OX до оси OY , от OY до OZ и от OX до OZ соответственно, относительно неподвижной системы координат.

Многогранник Q , транслированный на вектор v и повернутый на углы $\theta^1, \theta^2, \theta^3$, обозначим как $Q(u) = \{p \in R^3 : p = v + M(\theta) \cdot p^0, \forall p^0 \in Q^0\}$, где Q^0 обозначает нетранслированный и не повернутый многогранник Q , $M(\theta) = M_3(\theta^3) \cdot M_2(\theta^2) \cdot M_1(\theta^1)$ – матрица поворота, где

$$M_1(\theta^1) = \begin{pmatrix} \cos \theta^1 & -\sin \theta^1 & 0 \\ \sin \theta^1 & \cos \theta^1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$M_2(\theta^2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta^2 & -\sin \theta^2 \\ 0 & \sin \theta^2 & \cos \theta^2 \end{pmatrix},$$

$$M_3(\theta^3) = \begin{pmatrix} \cos \theta^3 & 0 & \sin \theta^3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta^3 & 0 & \cos \theta^3 \end{pmatrix}.$$

Полагаем, что невыпуклые многогранники Q_q и Q_g представлены в виде

$$Q_q(u_q) = \bigcup_{i=1}^{n_q} K_i(u_q), \quad Q_g(u_g) = \bigcup_{j=1}^{n_g} K_j(u_g),$$

где $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$ – выпуклые многогранники, заданные вершинами v_k^i , $k=1, \dots, m_i$, и v_k^j , $k=1, \dots, m_j$, в собственных системах координат невыпуклых многогранников Q_q и Q_g , соответственно (рис. 2).

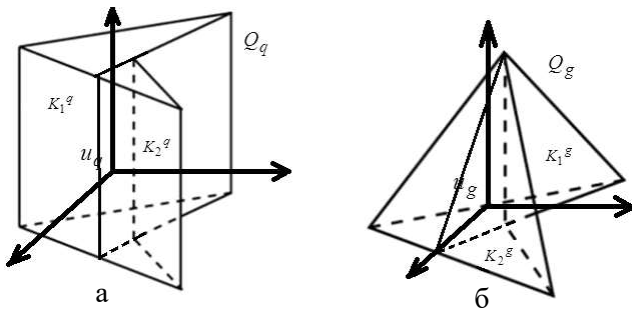


Рис. 2. Пример декомпозиции невыпуклых многогранников Q_q и Q_g : а – $Q_q = K_{q1} \cup K_{q2}$; б – $Q_g = K_{g1} \cup K_{g2}$

Замечание. Задача декомпозиции невыпуклых многогранников на минимальное количество выпуклых многогранников сама по себе является NP-сложной, для решения которой могут быть использованы различные алгоритмы, например, алгоритм, предложенный в [6]. В пределах данного исследования полагаем, что декомпозиция невыпуклых многогранников на выпуклые многогранники – задана.

Как известно [5], квази-phi-функция для выпуклых многоугольников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$ имеет вид

$$\Phi'_{ij}(u_q, u_g, u_p) = \min\{\Phi_i(u_q, u_p), \Phi_j(u_g, u_p)\}, \quad (1)$$

где $\Phi_i(u_q, u_p) = \min_{1 \leq k \leq m_i} \psi_P(p_k^i)$ – phi-функция для $K_i(u_q)$ и полупространства $P(u_p)$,

$\Phi_j(u_g, u_p) = \min_{1 \leq k \leq m_j} (-\psi_P(p_k^j))$ – phi-функция для $K_j(u_g)$ и полупространства $P^*(u_p) = \mathbb{R}^3 \setminus \text{int } P(u_p)$,

$P(u_p) = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : \psi_P = \alpha \cdot x + \beta \cdot y + \gamma \cdot z + \mu_P \leq 0\}$,
РИ, 2015, № 3

$u_p = (\theta_{xP}, \theta_{yP}, \mu_P)$, θ_{xP} и θ_{yP} – соответствующие переменные углы поворота полупространства $P(u_p)$ от оси OY до OZ и от оси OX до OZ в фиксированной системе координат, $\alpha = \sin \theta_{yP}$,

$\beta = -\sin \theta_{xP} \cdot \cos \theta_{yP}$, $\gamma = \cos \theta_{xP} \cdot \cos \theta_{yP}$ (рис. 3).

Отметим, что $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$.

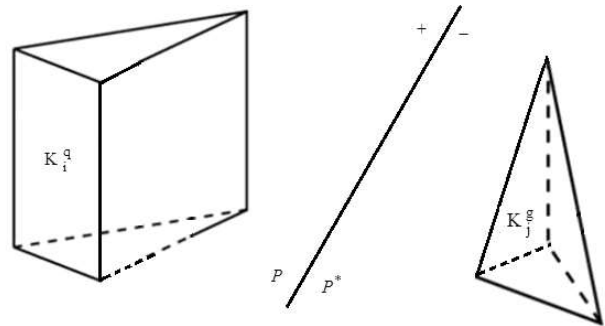


Рис. 3. Многогранники K_i^q , K_j^g и разделяющая их плоскость

Утверждение 1. Функция вида

$$\Phi'_{qg}(u_q, u_g, u') =$$

$$= \min\{\Phi'_{ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i=1, \dots, n_q, j=1, \dots, n_g\} \quad (2)$$

является квази-phi-функцией для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g , где $\Phi'_{ij}(u_q, u_g, u'_{ij})$ – phi-функция для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$ вида (1), $u'_{ij} = u_p$ (см. рис. 1).

Доказательство. Как следует из определения квази-phi-функции [5], функция $\Phi'_{qg}(u_q, u_g, u')$ является квази-phi-функцией для объектов Q_q и Q_g , если функция $\max_{u'} \Phi'_{qg}(u_q, u_g, u')$ является phi-функцией для Q_q и Q_g . Покажем это.

Поскольку в каждой из функций $\Phi'_{ij}(u_q, u_g, u'_{ij})$ дополнительные переменные u'_{ij} являются независимыми для каждой пары (i, j) , $i=1, \dots, n_q, j=1, \dots, n_g$, следовательно,

$$\begin{aligned} \max_{u'} \{\min\{\Phi'_{ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i=1, \dots, n_q, j=1, \dots, n_g\}\} &= \\ = \min\{\max_{u'_{ij}} \Phi'_{ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i=1, \dots, n_q, j=1, \dots, n_g\} &= \\ = \min\{\Phi_{ij}(u_q, u_g), i=1, \dots, n_q, j=1, \dots, n_g\}, \end{aligned}$$

где $\Phi_{ij}(u_q, u_g)$ – phi-функция для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$, а

$\min \{\Phi_{ij}(u_q, u_g), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g\} = \Phi_{qg}(u_q, u_g)$
 – phi-функция для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g . Отсюда следует, что

$$\max_{u'} \Phi'_{qg}(u_q, u_g, u') = \Phi_{qg}(u_q, u_g).$$

Таким образом, функция $\Phi'_{qg}(u_q, u_g, u')$ является квази-phi-функцией для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g , а следовательно, выполняются следующие свойства:

1) $\max_{u'} \Phi'_{qg}(u_q, u_g, u') < 0$,

если $\text{int } Q_q(u_q) \cap \text{int } Q_g(u_g) \neq \emptyset$,

2) $\max_{u'} \Phi'_{qg}(u_q, u_g, u') = 0$,

если $\text{int } Q_q(u_q) \cap \text{int } Q_g(u_g) = \emptyset$

и $\text{fr } Q_q(u_q) \cap \text{fr } Q_g(u_g) \neq \emptyset$,

3) $\max_{u'} \Phi'_{qg}(u_q, u_g, u') > 0$,

если $Q_q(u_q) \cap Q_g(u_g) = \emptyset$.

Используя свойства квази-phi-функций [5], условие непересечения многогранников Q_q и Q_g ($\text{int } Q_q(u_q) \cap \text{int } Q_g(u_g) = \emptyset$) можно описать в виде неравенства $\Phi'_{qg}(u_q, u_g, u') \geq 0$, где $\Phi'_{qg}(u_q, u_g, u')$ определяется формулой (2).

В случае, если между многогранниками Q_q и Q_g задано минимально допустимое расстояние $\rho_{qg}^- > 0$,

то ограничение $\text{dist}(Q_q, Q_g) \geq \rho_{qg}^-$ может быть описано с помощью псевдонормализованной квази-phi-функции $\hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u')$, где $\text{dist}(Q_q, Q_g) = \min_{a \in Q_q, b \in Q_g} \rho(a, b)$, $\rho(a, b)$ – евклидово расстояние между точками a, b .

Пусть $\hat{\Phi}'_{-ij}(u_q, u_g, u'_{ij})$ – псевдонормализованная квази-phi-функция для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$ вида [5]

$$\hat{\Phi}'_{-ij}(u_q, u_g, u'_{ij}) = \Phi'_{ij}(u_q, u_g, u_p) - 0.5\rho_{qg}^-,$$

где функция $\Phi'_{ij}(u_q, u_g, u_p)$ описывается формулой (1), а $u'_{ij} = u_p$.

Пусть $u' = (u'_{ij}, i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g)$.

Утверждение 2. Функция

$$\hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u') = \min \{\hat{\Phi}'_{-ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g\} \quad (3)$$

является псевдонормализованной квази-phi-функцией для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g .

Доказательство. Как следует из определения псевдонормализованной квази-phi-функции [5], функция $\hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u')$ является псевдонормализованной квази-phi-функцией для объектов Q_q и Q_g , если функция $\max_{u'} \hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u')$ является псевдонормализованной phi-функцией для Q_q и Q_g [7]. Покажем это.

Поскольку в каждой из функций $\hat{\Phi}'_{-ij}(u_q, u_g, u'_{ij})$ дополнительные переменные u'_{ij} являются независимыми для каждой пары (i, j) , $i = 1, \dots, n_q$, $j = 1, \dots, n_g$, следовательно,

$$\begin{aligned} \max_{u'} \{\min \{\hat{\Phi}'_{-ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g\}\} &= \\ = \min \{\max_{u'_{ij}} \hat{\Phi}'_{-ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g\} &= \\ = \min \{\hat{\Phi}_{-ij}(u_q, u_g), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g\}, \end{aligned}$$

где $\hat{\Phi}_{-ij}(u_q, u_g)$ – псевдонормализованная phi-функция для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ [7] и $K_j(u_g)$, а $\min \{\hat{\Phi}_{-ij}(u_q, u_g), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g\}$ – псевдонормализованная phi-функция для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g . Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} \max_{u'} \hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u') &= \\ = \min \{\hat{\Phi}_{-ij}(u_q, u_g), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g\} &= \\ = \hat{\Phi}_{-qg}(u_q, u_g). \end{aligned}$$

Таким образом, функция $\hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u')$ является псевдонормализованной квази-phi-функцией для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g , а следовательно, выполняются следующие свойства:

1) $\max_{u'} \hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u') > 0$, если $\text{dist}(Q_q, Q_g) > \rho_{qg}^-$,

2) $\max_{u'} \hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u') = 0$, если $\text{dist}(Q_q, Q_g) = \rho_{qg}^-$,

3) $\max_{u'} \hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u') < 0$, если $\text{dist}(Q_q, Q_g) < \rho_{qg}^-$.

В случае, если между многогранниками Q_q и Q_g задано максимально допустимое расстояние $\rho_{qg}^+ > 0$, то ограничение $\text{dist}(Q_q, Q_g) \geq \rho_{qg}^+$ можно описать с помощью псевдонормализованной квази- ϕ -функции $\widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u')$.

Прежде всего, определим функцию вида

$$\begin{aligned} \widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g, u'_{ij} = (p_i, p_j)) = \\ = \min \{ (\rho_{qg}^+)^2 - \text{dist}^2(p_i, p_j), f_i(p_i), f_j(p_j) \}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\text{dist}^2(p_i, p_j) = (x_{p_j} - x_{p_i})^2 + (y_{p_j} - y_{p_i})^2 + (z_{p_j} - z_{p_i})^2$$

$$f_i(p_i) = \min \{ \chi'_{il}(p_i), l = 1, \dots, t_i \},$$

$$f_j(p_j) = \min \{ \chi'_{jl}(p_j), l = 1, \dots, t_j \},$$

$$p_i = (x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}) \in \mathbb{R}^3, \quad p_j = (x_{p_j}, y_{p_j}, z_{p_j}) \in \mathbb{R}^3,$$

при этом $f_i(p_i) \geq 0$ ($f_j(p_j) \geq 0$), если $p_i \in K_i^q$ ($p_j \in K_j^g$) и $f_i(p_i) < 0$ ($f_j(p_j) < 0$) в противном случае, $\chi'_{il} = 0$ ($\chi'_{jl} = 0$) – уравнения плоскостей, содержащих соответствующие грани $l = 1, 2, \dots, t_i$ ($l = 1, 2, \dots, t_j$) выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$.

Утверждение 3. Функция $\widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g, u'_{ij})$ вида (4) является псевдонормализованной квази- ϕ -функцией для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$.

Доказательство.

Поскольку выполняются свойства

$$1) \max_{u'} \widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g, u') > 0, \text{ если } \text{dist}(K_i^q, K_j^g) < \rho_{qg}^+,$$

$$2) \max_{u'} \widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u') = 0,$$

$$\text{если } \text{dist}(K_i^q, K_j^g) = \rho_{qg}^+,$$

$$3) \max_{u'} \widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u') < 0, \text{ если}$$

$\text{dist}(K_i^q, K_j^g) > \rho_{qg}^+$, то можно утверждать, что функция $\widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g)$ является псевдонормализованной ϕ -функцией для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$, а следовательно, функция $\widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g, u'_{ij})$ вида (4) является псевдонормализованной квази- ϕ -

функцией для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$.

Утверждение 4. Функция

$$\begin{aligned} \widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u') = \max \{ \widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), \\ i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g \} \end{aligned} \quad (5)$$

является псевдонормализованной квази- ϕ -функцией для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g .

Доказательство. Как следует из определения псевдонормализованной квази- ϕ -функции [5], функция $\widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u')$ является псевдонормализованной квази- ϕ -функцией для объектов Q_q и Q_g , если функция $\max_{u'} \widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u')$ является псевдонормализованной ϕ -функцией для объектов Q_q и Q_g [7]. Покажем это.

Поскольку в каждой из функций вида $\widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u')$ дополнительные переменные u'_{ij} являются независимыми для каждой пары (i, j) , $i = 1, \dots, n_q$, $j = 1, \dots, n_g$, следовательно

$$\begin{aligned} \max_{u'} \{ \max \{ \widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g \} \} = \\ = \max \{ \max_{u'_{ij}} \widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g \} = \\ = \max \{ \widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g \}, \end{aligned}$$

где $\widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g)$ – псевдонормализованная ϕ -функция для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$, $\max \{ \widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g \}$ – псевдонормализованная ϕ -функция для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g . Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} \max_{u'} \widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u') = \\ = \max \{ \widehat{\Phi}'_{+ij}(u_q, u_g), i = 1, \dots, n_q, j = 1, \dots, n_g \} = \\ = \widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g). \end{aligned}$$

Таким образом, функция $\widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u')$ является псевдонормализованной ϕ -функцией для невыпуклых многогранников Q_q и Q_g , а следовательно, выполняются свойства:

$$1) \max_{u'} \widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u') > 0, \text{ если } \text{dist}(Q_q, Q_g) < \rho_{qg}^+,$$

$$2) \max_{u'} \widehat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u') = 0, \text{ если } \text{dist}(Q_q, Q_g) = \rho_{qg}^+,$$

3) $\max_{u'} \hat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u') < 0$, если $\text{dist}(Q_q, Q_g) > \rho_{qg}^+$.

Таким образом, используя свойства псевдонормализованных квази- ϕ -функций [5], ограничение на минимально допустимое расстояние между невыпуклыми многогранниками Q_q и Q_g , $\text{dist}(Q_q, Q_g) \geq \rho_{qg}^-$, можно описать в виде неравенства $\hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u') \geq 0$, а ограничение на максимально допустимое расстояние, $\text{dist}(Q_q, Q_g) \leq \rho_{qg}^+$, можно описать в виде неравенства $\hat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u') \geq 0$, где функция $\hat{\Phi}'_{-qg}(u_q, u_g, u')$ определяется формулой (3), а функция $\hat{\Phi}'_{+qg}(u_q, u_g, u')$ имеет вид (5).

Выводы

Используя предложенные в статье свободные от радикалов псевдонормализованные квази- ϕ -функции, можно описать область допустимых решений в задаче оптимальной упаковки произвольных многогранников, допускающих непрерывные вращения, с учетом максимально и минимально допустимых расстояний в виде объединения подобластей, каждая из которых описывается системой неравенств с гладкими функциями.

Следует отметить, что в случае отсутствия ограничений на максимально допустимые расстояния между невыпуклыми многогранниками область допустимых решений описывается одной системой неравенств с гладкими функциями.

Таким образом, математическая модель обозначенной выше задачи может быть представлена в виде задачи нелинейного программирования и реализована с помощью современных локальных и глобальных NLP-solvers, таких как (IPOPT, Baron, LindoGlobal, GloMIQO).

Литература: 1. *Egeblad, J., Nielsen, B.K., Brazil, M.*: Translational packing of arbitrary polytopes. *Comp. Geom.* 42(4). 2009. P. 269–288. 2. *Xiao Liu, Jia-min Liu, An-xi Cao, Zhuang-le Yao*, 2015. HAPE3D – a new constructive algorithm for the 3D irregular packing problem. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering.* 16(5). P. 380–390. 3. *Stoyan, Y., Chugay, A.*: Mathematical modeling of the interaction of non-oriented convex polytopes. *Cyber. and Syst. Anal.* 48 (6). 2012. P. 837–845. 4. *Stoyan Yu., Chugay A.* Construction of radical free ϕ -functions for spheres and non-oriented polytopes. *Rep. of NAS of Ukraine.* 2011. №12. P. 35-40. (In Russian). 5. *Stoyan, Y., Pankratov, A., Romanova, T.*: Quasi- ϕ -functions and optimal packing of ellipses. *J. of Glob. Optim.* (2015) DOI: 10.1007/s10898-015-0331-2. 6. *Belov, Gleb*, 2002. A Modified Algorithm for Convex Decomposition of 3D Polyhedra,” Technical report MATH-NM-03-2002, Institut für Numerische Mathematik, Technische Universität, Dresden, <http://www.math.tu-dresden.de/~belov/cd3/cd3.ps>. 7. *Chernov N., Stoyan Yu., Romanova T.* (2010) Mathematical model and efficient algorithms for object

packing problem. *Comput. Geom.: Theory and Appl.* 43(5). P. 535–553.

Поступила в редколлегию 22.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Шляхов В.В.

Панкратов Александр Викторович, д-р техн. наук, профессор, старший научный сотрудник отдела математического моделирования и оптимального проектирования Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, оптимизация, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61118, Харьков, ул. Деревянка, д.14, кв. 26, тел. +38(067) 6819510.

Романова Татьяна Евгеньевна, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования и оптимального проектирования Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61084, Харьков, ул. Новгородская, д.6а, кв. 31, тел. (057) 7013477.

Стоян Юрий Евгеньевич, аспирант Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование, анализ данных. Адрес: Украина, 61204, Харьков, ул. Профсоюзный бульвар, д.9, кв. 53, тел. +38(063)4244246.

Alexandr V. Pankratov received Doctor of Technical Sciences degree in Mathematical Modeling and Computational Methods (2013) from Institute for Problems in Machinery of National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv). From 2013 he is a senior researcher at the Department of Mathematical Modeling and Optimal Design, Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. His current research interests include mathematical modeling, operational research, computational geometry, optimisation, packing, cutting and covering. Address: Ukraine, 61118, Kharkiv, Derevyanko str., 14, apt. 26, tel.(067)6819510.

Tatiana E. Romanova received Doctor of Technical Sciences degree in Mathematical Modeling and Computational Methods (2003) from Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev). From 2002 he is a senior researcher at the Department of Mathematical Modeling and Optimal Design, Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. From 2005 she is a professor at the Department of Applied Mathematics, Kharkiv National University of Radioelectronics. Her current research interests include mathematical modeling, operational research, computational geometry, optimisation, packing, cutting and covering. Address: Ukraine, 61145, Kharkiv, Novgorodskaya str., 6a, apt. 31, tel.(057)7013477.

Yurij E. Stoyan received Master's degree in System Analysis (2015) from Kharkiv National University of Radioelectronics. He is an aspirant at the Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv). His current research interests include mathematical modeling, operational research, packing and cutting. Address: Ukraine, 61145, Kharkiv, str. Profsoyuznyi bulvar, 9, apt. 53, tel. +38(063)4244246.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПАКОВКИ ГОМОТЕТИЧЕСКИХ ОДИНАКОВО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЭЛЛИпсоИДОВ

ХЛУД О.М., СУББОТА И.А., РОМАНОВА Т.Е.

Рассматривается задача упаковки гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов в контейнере минимального объема. В качестве контейнера выбирается прямоугольный параллелепипед или эллипсоид. Строится математическая модель в виде задачи нелинейного программирования с использованием *phi*-функций. Предлагается эффективный алгоритм решения, использующий гомотетические преобразования эллипсоидов и оптимизационную процедуру, которая позволяет сократить вычислительные ресурсы. Приводятся результаты численных экспериментов.

Ключевые слова – упаковка, гомотетичные эллипсоиды, *phi*-функции, математическая модель, нелинейная оптимизация

Введение

Задачи упаковки и раскроя (Cutting and Packing) относятся к классу NP-сложных и являются предметом исследования вычислительной геометрии, а методы их решения – новым направлением теории исследования операций.

Несмотря на то, что задача упаковки шаров давно является предметом теоретических и практических исследований, интерес к изучению задачи упаковки эллипсоидов возрос лишь в последние несколько лет. Этот класс задач имеет широкий спектр научных и практических применений. В частности, при разработке высокопрочных керамических материалов, выращивании кристаллов, моделировании структуры жидкостей, кристаллов и стекла, моделировании движения и прессования сыпучих веществ, в термодинамике при переходе жидкостей в кристаллическую форму, а также в современной биологии при моделировании размещения хромосом в ядрах клеточных клеток.

Многие публикации посвящены решению данного класса задач (см., например, [1-4]).

В этой работе рассматривается задача упаковки заданного набора гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов в контейнере минимального объема. Предлагаются конструктивные средства математического моделирования (с использованием метода *phi*-функций), учитывающие особенности задачи, и эффективные методы поиска допустимых и локально-оптимальных решений.

1. Постановка задачи

Имеется набор гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов E_i , $i \in I_N = \{1, 2, \dots, N\}$, заданных полуосями a_i , b_i , c_i в собственной системе координат $O_i x y z$. Полагаем, что начало собственной системы координат E_i находится в центре его симметрии. Положение E_i в пространстве R^3 определяется переменным вектором трансляции $v_i = (x_i, y_i, z_i) \in R^3$, где R^3 – евклидово пространство.

В качестве контейнера Ω , характеризующегося вектором переменных метрических характеристик p , рассматривается либо прямоугольный параллелепипед P переменной длины A , ширины B и высоты C , т.е. $p = (A, B, C)$, либо эллипсоид E , заданных полуосями A , B , C в фиксированной системе координат $Oxyz$ с переменным коэффициентом гомотетии λ , т.е. $p = (\lambda)$.

В зависимости от вида контейнера рассматриваются следующие функции цели: $F = A \cdot B \cdot C$, если $\Omega \equiv P$; $F = \lambda$, если $\Omega \equiv E$.

Задача. Упаковать набор одинаково ориентированных гомотетичных эллипсоидов $\{E_i(u_i), i \in I_N\}$, в контейнер Ω так, чтобы функция цели F достигала своего минимального значения.

2. Математическая модель

Основными ограничениями поставленной задачи являются:

– непересечение эллипсоидов, т.е.

$$\text{int } E_i(v_i) \cap \text{int } E_j(v_j) = \emptyset, \quad i < j \in I_N, \quad (1)$$

– включение эллипсоида в область размещения, т.е.

$$E_i(v_i) \subset \Omega \Leftrightarrow \text{int } E_i(v_i) \cap \text{int } \Omega^* = \emptyset, \quad i \in I_N, \quad (2)$$

где $\Omega^* = R^3 \setminus \text{int } \Omega$.

Как известно [5], конструктивным средством математического моделирования ограничений (1), (2) является метод *phi*-функций Стояна [6]. В терминах *phi*-функций ограничение (1) имеет вид $\Phi_{ij}(v_i, v_j) \geq 0$, где

$$\Phi_{ij}(v_i, v_j) = \frac{(x_j - x_i)^2}{(a_i + a_j)^2} + \frac{(y_j - y_i)^2}{(b_i + b_j)^2} + \frac{(z_j - z_i)^2}{(c_i + c_j)^2} - 1 \quad (3)$$

– *phi*-функция для эллипсоидов $E_i(v_i)$ и $E_j(v_j)$, а ограничение (2) описывается неравенством

$\Phi_i(v_i) \geq 0$, где $\Phi_i(v_i)$ – phi-функция для эллипсоида $E_i(v_i)$ и объекта Ω^* . При этом:

если $\Omega \equiv P$, то

$$\Phi_i(v_i) = \min_{k=1, \dots, 6} \chi_k(v_i), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \chi_1(v_i) &= -x_i + A - a_i, & \chi_2(v_i) &= -y_i + B - b_i, \\ \chi_3(v_i) &= -z_i + C - c_i, & \chi_4(v_i) &= x_i + A - a_i, \\ \chi_5(v_i) &= y_i + B - b_i, & \chi_6(v_i) &= z_i + C - c_i; \end{aligned}$$

если $\Omega \equiv E$, то

$$\Phi_i(v_i) = 1 - \frac{(x_i)^2}{(\lambda A - a_i)^2} - \frac{(y_i)^2}{(\lambda B - b_i)^2} - \frac{(z_i)^2}{(\lambda C - c_i)^2}, \quad (5)$$

при условии, что E_i и E гомотетичны.

Математическая модель поставленной задачи может быть представлена так:

$$\min F(u), \text{ s.t. } u \in W, \quad (6)$$

$$W = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij}(v_i, v_j) \geq 0, \Phi_i(v_i) \geq 0, \zeta \geq 0\}, \quad (7)$$

где $u = (p, v_1, \dots, v_N)$ – вектор переменных, $p = (A, B, C)$, если $\Omega \equiv P$, $p = (\lambda)$, если $\Omega \equiv E$, R^σ – арифметическое евклидово пространство размерности σ , $\zeta \geq 0$ – система дополнительных ограничений на метрические характеристики контейнера Ω .

Задача (1)-(2) является многоэкстремальной задачей нелинейного программирования, где целевая функция линейна или квадратична, а множество допустимых решений задается с использованием квадратичных функций (3), (5) и кусочно-линейных функций (4).

3. Метод решения

Для поиска локальных минимумов задачи (6)-(7) используется подход, в основе которого – метод мультистарта и оптимизационная процедура, включающая поиск допустимых стартовых точек и локальную оптимизацию, которая является развитием алгоритмов, предложенных в статьях [7, 8]. В качестве локально-оптимального решения выбирается наилучший из полученных локальных экстремумов.

3.1. Пошаговый алгоритм

Полагаем, что стартовые размеры контейнера Ω_0 достаточно большие и гарантируют размещение в нем эллипсоидов E_i . Для контейнера $\Omega \equiv P$ в качестве стартовых параметров выбираем A_0, B_0, C_0 , а для $\Omega \equiv E$ выбираем λ_0 . При этом, не теряя общности, полагаем, что $a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_{N-1} \geq a_N$.

Пусть коэффициенты гомотетии λ_i эллипсоидов E_i , $i \in I_N$, являются переменными. Тогда $u = (v, \lambda) \in R^\sigma$ – вектор переменных, где $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_N) \in R^N$.

Шаг 1. Выбираем точку $u^{0(1)} = (v^0, \lambda^0)$, где $v_i^0 = (x_i^0, y_i^0, z_i^0) \in \Omega_0$ выбирается случайно, $\lambda^0 = (\lambda_1^0, \dots, \lambda_N^0)$, $\lambda_i^0 = 0$, $i \in I_N$.

В качестве стартовой точки для дальнейшей оптимизации выбираем $u^{0(1)}$ и переходим к шагу 2.

Шаг 2. Решаем задачу

$$\max_{u \in W' \subset R^\sigma} \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i, \quad (8)$$

$$W' = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij}(u) \geq 0, \Phi_i(u) \geq 0,$$

$$0 \leq \lambda_i \leq 1, j > i, i \in I_N\}. \quad (9)$$

В результате ее решения получаем точку глобального максимума $u^{0(2)} = (v^{0(2)}, \lambda^{0(2)})$.

В качестве стартовой точки для дальнейшей оптимизации выбираем $u^{0(2)}$ и переходим к шагу 3.

Шаг 3. Решаем задачу (5)-(6). В результате решения получаем точку локального минимума $u^{0(3)} = (p^{0(3)}, v^{0(3)})$.

Шаг 4. В качестве стартовой точки для дальнейшей оптимизации выбираем точку $u^{0(3)} = (v^{0(3)}, \lambda^{0(3)})$ при фиксированных размерах контейнера. Решаем вспомогательную задачу вида

$$\max_{u \in W'' \subset R^\sigma} \sum_{i=1}^N (a_i \lambda_i)^2, \quad (10)$$

$$W'' = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij}(u) \geq 0, \Phi_i(u) \geq 0,$$

$$a^- \leq a_i \lambda_i \leq a^+, i < j = 1, \dots, N\}, \quad (11)$$

$$a^- = \min \{a_i, i \in I_N\}, \quad a^+ = \max \{a_i, i \in I_N\}.$$

В результате решения задачи (10)-(11) получаем точку локального максимума $u^{0(4)} = (v^{0(4)}, \lambda^{0(4)})$.

Шаг 5. Ранжируем по убыванию $\tilde{a}_i = \lambda_i^{0(4)} a_i$, $i \in I_N$.

Формируем последовательность $(i_1, i_2, \dots, i_{N-1}, i_N)$, такую, что $\tilde{a}_{i_1} \geq \tilde{a}_{i_2} \geq \dots \geq \tilde{a}_{i_{N-1}} \geq \tilde{a}_{i_N}$.

Осуществляем сравнение a_i и \tilde{a}_{i_j} : если $\lambda_i^{0(4)} \geq 1$, то полагаем $\lambda_{i_j}^{0(5)} = 1$, если $\lambda_i^{0(4)} < 1$, то полагаем

$\lambda_{ij}^{0(5)} = \lambda_i^{0(4)}$. Формируем точку $u^{0(5)} = (v^{0(5)}, \lambda^{0(5)})$ и переходим к следующему шагу.

Шаг 6. Стартуя из точки $u^{0(5)} = (v^{0(5)}, \lambda^{0(5)})$, решаем задачу (8)-(9). В результате решения получаем точку глобального максимума $u^{0(6)} = (v^{0(6)}, \theta^{0(6)}, \lambda^{0(6)})$. В противном случае переходим к шагу 1.

Стартуя из точки $u^{0(6)}$, решаем задачу (6)-(7) и получаем точку локального минимума $u^{(6)} = (p^{(6)}, v^{(6)})$.

Шаг 7. Генерируем случайно точку q_1 . Если $q_1 \notin E_i, i \in I_N, q_1 \in \Omega$, то в качестве параметров размещения дополнительного эллипсоида с полуосями $a_{q_1} = a_1, b_{q_1} = b_1, c_{q_1} = c_1$ и коэффициентом гомотетии $\lambda_{q_1}^0 = \varepsilon$ выбираем точку q_1 .

Стартуя из точки $u^{0(7)} = (v^{(6)}, v_{q_1}^0, \lambda_{q_1}^0)$, при фиксированных размерах контейнера решаем следующую вспомогательную задачу:

$$\max_{u \in W \subset R^\sigma} a_{q_1} \lambda_{q_1}, \quad (12)$$

$$W_\lambda = \{u \in R^\sigma : \chi(u) \geq 0, 0 \leq \lambda_{q_1} \leq 1\}, \quad (13)$$

где $u = (v, v_{q_1}, \lambda_{q_1}) \in R^\sigma, v = (v_1, \dots, v_N), \chi(u) = \min \{\Phi_\tau(u), \Phi_l(u), \tau = 1, \dots, m, l \in I_N\}, m = 0.5 \cdot N \cdot (N+1)$.

В результате решения задачи (12)-(13) получаем точку локального максимума $u^{0(7)} = (v^{0(7)}, v_{q_1}^{0(7)}, \lambda_{q_1}^{0(7)})$.

Осуществляем поиск $a_j \leq \lambda_{q_1} a_{q_1}, b_j \leq \lambda_{q_1} b_{q_1}, j \in I_N$. Если такой эллипсоид E_j существует, то принимаем $v_j = v_{q_1}$ по аналогии с алгоритмом, предложенным в работе [7].

Формируем точку: $u^{(7)} = (p^{(6)}, v^{(7)})$. Стартуя из точки $u^{(7)} = (p^{(6)}, v^{(7)})$, решаем задачу (6)-(7). Получаем точку локального минимума $u^{*(7)} = (p^{*(7)}, v^{*(7)})$, причем $u^* = u^{*(7)} = (p^*, v^*, \theta^*)$.

В целях минимизации числа нелинейных неравенств, формирующих область допустимых решений в задачах нелинейного программирования вида (6)-(7), предлагаем алгоритм, который позволяет значительно сократить вычислительные ресурсы (время и память).

3.2. Алгоритм локальной оптимизации с преобразованием области допустимых решений

В основе алгоритма лежит оптимизационная процедура LOFRT, предложенная в [9] для задачи оптимального размещения эллипсов, и состоит в следующем.

Пусть $u^{(0)} \in W$ – допустимая точка. Около каждого эллипсоида E_i описывается сфера S_i радиуса $a_i, i \in I_N$. Для каждой сферы S_i строится «индивидуальный» кубический контейнер $\Omega_i \supset S_i \supset E_i$, длина стороны которого составляет $2 \cdot (a_i + \varepsilon), i \in I_N$. При этом S_i, E_i и Ω_i имеют один и тот же центр (x_i^0, y_i^0, z_i^0) , а стороны Ω_i параллельны соответствующим сторонам Ω . Выбирается $\varepsilon = \sum_{i=1}^N b_i / N$. Далее фиксируется положение каждого индивидуального контейнера Ω_i (рис.1). Каждый эллипсоид E_i может размещаться только внутри индивидуального контейнера Ω_i .

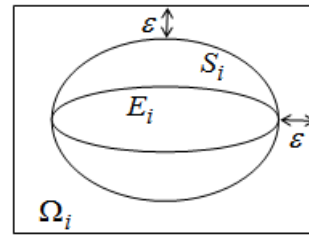


Рис. 1. Формирование индивидуального контейнера

Далее определяется система дополнительных ограничений на вектор трансляции v_i для каждого эллипсоида E_i в виде $\Phi^{S_i \Omega_i^*} \geq 0, i \in I_N$, где

$$\Phi^{S_i \Omega_i^*} = \min \{-x_i + x_i^0 + \varepsilon, -y_i + y_i^0 + \varepsilon, -z_i + z_i^0 + \varepsilon, x_i - x_i^0 + \varepsilon, y_i - y_i^0 + \varepsilon, z_i - z_i^0 + \varepsilon\}$$

– phi-функция для S_i и $\Omega_i^* = R^3 \setminus \text{int } \Omega_{li}$.

Заметим, что неравенство $\Phi^{S_i \Omega_i^*} \geq 0$ эквивалентно системе линейных неравенств $-x_i + x_i^0 + \varepsilon \geq 0, -y_i + y_i^0 + \varepsilon \geq 0, -z_i + z_i^0 + \varepsilon \geq 0, x_i - x_i^0 + \varepsilon \geq 0, y_i - y_i^0 + \varepsilon \geq 0, z_i - z_i^0 + \varepsilon \geq 0$.

Очевидно, что если контейнеры Ω_i и Ω_j не имеют общих внутренних точек, т.е. $\Phi^{\Omega_i \Omega_j} \geq 0$, тогда не следует накладывать ограничение на непересечение эллипсоидов E_i и E_j . Например, для эллипсоидов E_1 и E_7, E_4 и E_8, E_1 и E_8 (рис. 2).

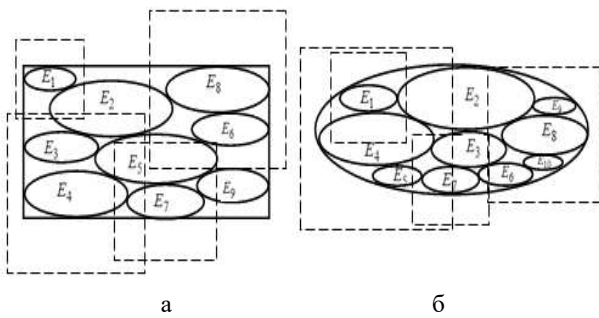


Рис. 2. Размещение эллипсоидов E_i и их индивидуальных контейнеров Ω_i : а – для $\Omega \equiv P$, б – $\Omega \equiv E$

Далее формируется область допустимых решений

$$W_1 = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij} \geq 0, (i, j) \in \Xi_1, \Phi_i \geq 0, i \in \Xi_2,$$

$$\Phi^{S_i \Omega_i^*} \geq 0, i \in I_N, l \geq l^0 - \varepsilon, w \geq w^0 - \varepsilon, h \geq h^0 - \varepsilon\},$$

$$\Xi_1 = \{(i, j) : \Phi^{\Omega_i \Omega_j} < 0\}, \quad \Xi_2 = \{i : \Phi^{\Omega^* \Omega_i} < 0\}.$$

Другими словами, из системы, которая описывает область W , исключаем Φ -неравенства для тех пар эллипсоидов, у которых индивидуальные контейнеры не пересекаются. При этом добавляем вспомогательные неравенства $\Phi^{S_i \Omega_i^*} \geq 0$, описывающие условие включения S_i в соответствующий индивидуальный контейнер Ω_i , $i \in I_N$.

Затем осуществляем поиск точки локального минимума $u_{w_1}^*$ для подзадачи вида

$$\min_{u_{w_1} \in W_1 \subset R^\sigma} F(u_{w_1}).$$

Точка $u_{w_1}^*$ является стартовой точкой $u^{(1)}$ на второй итерации оптимизационной процедуры. На данном этапе вновь определяются все пары эллипсоидов с непересекающимися индивидуальными контейнерами, формируется соответствующая подобласть W_2 (аналогично W_1) и вычисляется точка локального минимума $u_{w_2}^* \in W_2$, которая используется в качестве стартовой точки $u^{(2)}$ на третьей итерации, и т.д.

В общем случае, на k -м шаге, стартуя из точки $u^{(k-1)}$, решается подзадача вида

$$\min_{u_{w_k} \in W_k \subset R^\sigma} F(u_{w_k}), \quad (14)$$

$$W_k = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij}^k \geq 0, (i, j) \in \Xi_{k1}, \Phi_i^k \geq 0, i \in \Xi_{k2}, \Phi^{S_i \Omega_i^*} \geq 0, i \in I_N, l \geq l_{w_k}^* - \varepsilon, w \geq w_{w_k}^* - \varepsilon, h \geq h_{w_k}^* - \varepsilon\},$$

$$\Xi_{k1} = \{(i, j) : \Phi^{\Omega_{ki} \Omega_{kj}} < 0, i > j \in I_N\},$$

$$\Xi_{k2} = \{i : \Phi^{\Omega_{ki} \Omega^*} < 0, i \in I_N\}. \quad (15)$$

Итерационная процедура заканчивается, когда

$$F(u_{w_k}^*) = F(u_{w_{k+1}}^*).$$

Точка $u^* = u^{(k)*} = u_{w_k}^* \in R^\sigma$ является точкой локального минимума задачи (1)-(2), где $u_{w_k}^* \in R^\sigma$ является точкой локального минимума на последней итерации.

Таким образом, для $O(n^2)$ пар эллипсоидов в контейнере LOFRT процедура позволяет осуществлять проверку Φ -функций, в общем случае, только для $O(n)$ пар эллипсоидов (это зависит от размеров эллипсоидов и величины ε).

Параметр ε обеспечивает баланс между количеством неравенств в каждой подзадаче нелинейного программирования (14)-(15) и числом подзадач, которые необходимо решить для поиска локально-оптимального решения задачи (6)-(7).

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет свести задачу (6)-(7) с количеством неравенств $O(n^2)$ к последовательности задач с количеством неравенств $O(n)$. Это приводит к значительному сокращению вычислительных ресурсов при решении задач нелинейного программирования.

4. Численные эксперименты

Чтобы продемонстрировать эффективность предлагаемого подхода, приведем ряд примеров с использованием описанного выше алгоритма. Эксперименты проводились на компьютере Intel(R) Core(TM) i7-3630QM. Для поиска локальных минимумов использовался solver FindArgMin пакета Wolfram Mathematica 9.

Во всех примерах осуществляется поиск 10 локальных минимумов.

В первых двух примерах рассматривается $N=20$ эллипсоидов, имеющих следующие размеры:

$$(a_1, b_1, c_1) = (30, 10, 10), (a_2, b_2, c_2) = (9, 3, 3),$$

$$(a_3, b_3, c_3) = (7.5, 2.5, 2.5), \{(a_i, b_i, c_i) = (6, 2, 2),$$

$$i = 4, \dots, 11\}, \{(a_i, b_i, c_i) = (3, 1, 1), i = 12, \dots, 20\}.$$

Пример 1. Размещение эллипсоидов в контейнере-параллелепипеде, соответствующее точке локального минимума u^* , приведено на рис. 3. Контейнер имеет объем $F(u^*) = 3213.92$.

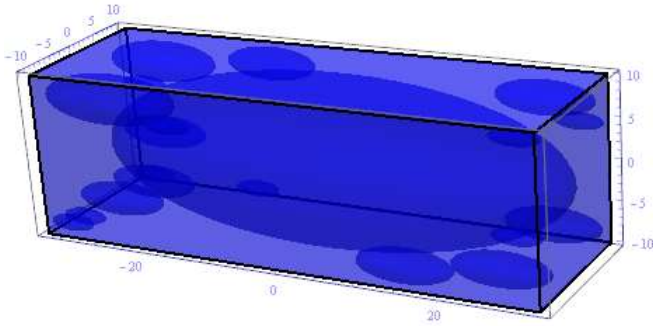


Рис. 3. Локально-оптимальное размещение эллипсоидов для примера 1

Пример 2. Размещение эллипсоидов в контейнере-эллипсоиде, соответствующее точке локального минимума u^* , приведено на рис. 4. Контейнер имеет коэффициент гомотетии $F(u^*) = 0,32099$.

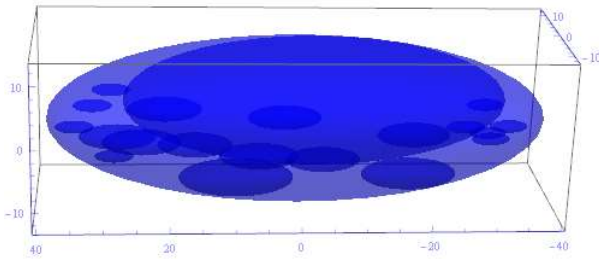


Рис. 4. Локально-оптимальное размещение эллипсоидов для примера 2

Далее рассматривается упаковка $N=50$ эллипсоидов, имеющих следующие размеры:

$$\begin{aligned} & (a_1, b_1, c_1) = (60, 20, 20), (a_2, b_2, c_2) = (30, 10, 10), \\ & (a_3, b_3, c_3) = (18, 6, 6), \{(a_i, b_i, c_i) = (10.5, 3.5, 3.5), \\ & i = 4, \dots, 8\}, \{(a_i, b_i, c_i) = (9, 3, 3), i = 8, \dots, 13\}, \\ & \{(a_i, b_i, c_i) = (8.25, 2.75, 2.75), i = 14, \dots, 17\}, \\ & \{(a_i, b_i, c_i) = (7.5, 2.5, 2.5), i = 18, \dots, 24\}, \\ & \{(a_i, b_i, c_i) = (6, 2, 2), i = 25, \dots, 40\}, \\ & \{(a_i, b_i, c_i) = (3, 1, 1), i = 41, \dots, 50\}. \end{aligned}$$

Пример 3. Размещение эллипсоидов в контейнере $\Omega \equiv P$, соответствующее точке локального минимума u^* , приведено на рис. 5. Контейнер имеет объем $F(u^*) = 33\,874.5$.

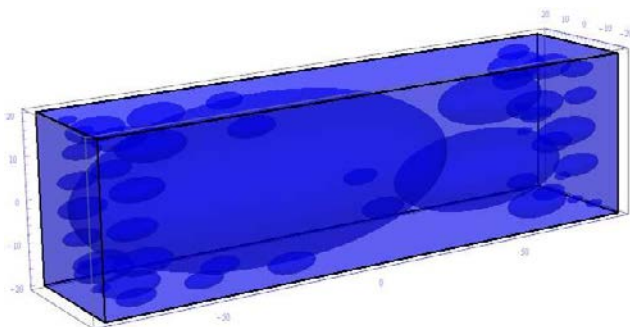


Рис. 5. Локально-оптимальное размещение эллипсоидов для примера 3

Использование LOFRT процедуры позволило значительно сократить время решения задачи. В частности, для примера 3 время решения без использования алгоритма – 13 часов, с его применением – 5 часов.

Пример 4. Размещение эллипсоидов в контейнере-эллипсоиде, соответствующее точке локального минимума u^* , приведено на рис. 6. Контейнер имеет коэффициент гомотетии $F(u^*) = 0,45775$.

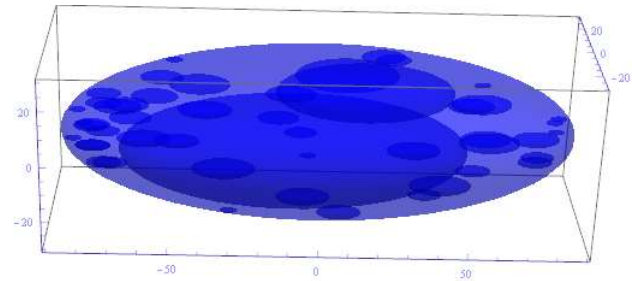


Рис. 6. Локально-оптимальное размещение эллипсоидов для примера 4

Пример 5. Рассматривается упаковка $N=50$ эллипсоидов, имеющих следующие размеры:

$$\begin{aligned} & \{(a_i, b_i, c_i) = (30, 10, 10), i = 1, 2\}, (a_3, b_3, c_3) = (18, 6, 6), \\ & \{(a_i, b_i, c_i) = (10.5, 3.5, 3.5), i = 4, \dots, 8\}, \{(a_i, b_i, c_i) = \\ & = (9, 3, 3), i = 8, \dots, 13\}, \{(a_i, b_i, c_i) = \\ & = (8.25, 2.75, 2.75), i = 14, \dots, 17\}, \{(a_i, b_i, c_i) = \\ & = (7.5, 2.5, 2.5), i = 18, \dots, 24\}, \\ & \{(a_i, b_i, c_i) = (6, 2, 2), \\ & i = 25, \dots, 40\}, \{(a_i, b_i, c_i) = (3, 1, 1), i = 41, \dots, 50\}. \end{aligned}$$

Размещение эллипсоидов в $\Omega \equiv P$, соответствующее точке локального минимума u^* , приведено на рис. 7. Контейнер имеет объем $F(u^*) = 8030.25$.

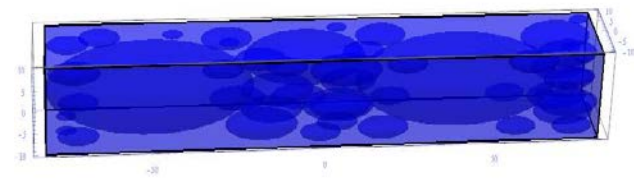


Рис. 7. Локально-оптимальное размещение эллипсоидов для примера 5

Использование алгоритма LOFRT позволило уменьшить время решения задачи для примера 5 на 10 часов (время решения без использования алгоритма – 18 часов, с его применением – 8 часов).

Пример 6. Рассматривается упаковка 75 гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов, имеющих следующие размеры:

$$\begin{aligned} & \{(a_i, b_i, c_i) = (10.5, 3.5, 3.5), i = 1, \dots, 15\}, \\ & \{(a_i, b_i, c_i) = (9, 3, 3), i = 16, \dots, 30\}, \end{aligned}$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (7.5, 2.5, 2.5), i = 31, \dots, 45\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (6, 2, 2), i = 46, \dots, 60\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (3, 1, 1), i = 61, \dots, 75\}.$$

Контейнер имеет объем $F(u^*) = 4825,16$.

Выводы

Благодаря предложенным в работе средствам описания основных ограничений размещения с применением метода ϕ -функций, удалось представить задачу оптимальной упаковки гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов в виде задачи нелинейного программирования. Предложен алгоритм поиска локально-оптимальных решений для задачи упаковки гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов, основанных на методе мултистарта и специальной оптимизационной процедуре. С использованием описанного в работе метода можно получить локально-оптимальные решения для задачи упаковки эллипсоидов в контейнере, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда или эллипсоида.

Эффективность алгоритма подтверждается результатами для тестовых примеров.

Предложенные в работе алгоритмы могут быть использованы для построения стартовых точек в задаче поиска оптимальных упаковок гомотетичных эллипсоидов, допускающих непрерывные повороты.

Литература: 1. *Uhler C., Wright S. J.* Packing Ellipsoids with Overlap. *SIAM Review*, 55(4):671-706. 2013. 2. *Kallrath J.* Packing ellipsoids into volume-minimizing rectangular boxes. *Journal of Global Optimization*. DOI:10.1007/s10898-015-0348-6. 3. *Pankratov A., Romanova T., Khlud O.* Quasi- ϕ -functions in packing of ellipsoids. *Radioelectronics & Informatics*, 68:37-42. 2015. 4. *Lubachevsky B. D., Stillinger F. H.* Geometric properties of random disk packings. *Journal of Statistical Physics*, 60(5-6):561-583. 1990. 5. *Bennell J.A., Oliveira J.F.* A tutorial in irregular shape packing problem. *Journal of the Operational Research Society*. 2009. 60:93-105. 6. *Chernov N., Stoyan Yu., Romanova T.* Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem // *Computational Geometry: Theory and Applications*. 2010. Vol. 43, № 5. P. 533-553. 7. *Стецюк П.І., Романова Т.Є., Субота І.О.* NLP-задача упаковки гомотетичних еліпсів у прямокутний контейнер // *Теорія оптимальних рішень*. 2014. С. 139-146. 8. *Stoyan Yu.G.* A mathematical model and a solution method for the problem of placing various-sized circles into a strip / *Yu.G. Stoyan, G.N. Yaskov* // *European Journal of Operational Research*. 2004. Vol. 156. P. 590-600. 9. *Stoyan Y, Pankratov A, Romanova T.* Quasi- ϕ -functions and optimal packing of ellipses. *Journal of Global Optimization*. 2015. DOI:10.1007/s10898-015-0331-2.

Поступила в редколлегию 23.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. Гиль Н.И.

Хлуд Ольга Михайловна, аспирантка Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61204, Харьков, пр-т Л.Свободы, д.36а, кв. 126, тел. +38(098)6166783.

Суббота Ирина Александровна, канд. техн. наук, преподаватель ХНУРЭ. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61183, Харьков, ул. Дружбы Народов, д.241, кв. 45, тел. +38(097) 250 36 17.

Романова Татьяна Евгеньевна, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования и оптимального проектирования Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков. Научные интересы: исследование операций, математическое моделирование, геометрическое проектирование. Адрес: Украина, 61084, Харьков, ул. Новгородская, д.6а, кв. 31, тел. (057) 7013477.

Olga M. Khlud received Master's degree in System Analysis (2015) from Kharkiv National University of Radioelectronics. She is an aspirant at the Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv). Her current research interests include mathematical modeling, operational research, packing and cutting. Address: Ukraine, 61204, Kharkiv, L.Svobody av, 36a, apt. 126, tel. +38(098)6166783

Irina A. Subota received Candidate of Technical Sciences degree in Mathematical Modeling and Computational Methods (2015) from Institute for Problems in Machinery of National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv). From 2015 she is a teacher at the Department of System Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics. Her current research interests include mathematical modeling, operational research, packing and cutting. Address: Ukraine, 61183, Kharkiv, str. Druzhby Narodov, 241, apt. 45, tel. +38(097) 250 36 17.

Tatiana E. Romanova received Doctor of Technical Sciences degree in Mathematical Modeling and Computational Methods (2003) from Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev). From 2002 he is a senior researcher at the Department of Mathematical Modeling and Optimal Design, Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. From 2005 she is a professor at the Department of Applied Mathematics, Kharkiv National University of Radioelectronics. Her current research interests include mathematical modeling, operational research, computational geometry, optimisation, packing, cutting and covering. Address: Ukraine, 61145, Kharkiv, Novgorodskaya str., 6a, apt. 31, tel.(057)7013477.



ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ НА ЦИКЛИЧЕСКИХ ПЕРЕСТАНОВКАХ НА ОСНОВЕ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА

ГРЕБЕННИК И.В., БАРАНОВ А.В.,
ЧЕРНАЯ О.С., ГОРБАЧЕВА Е.Е.

Предлагается решение задачи оптимизации линейной функции с линейными ограничениями на множестве циклических перестановок. Для этого применяется метод, основанный на идеологии случайного поиска. Вспомогательную задачу оптимизации линейной функции без ограничений на множестве циклических перестановок предлагается решать эвристическим методом, используя стратегию метода ветвей и границ.

Ключевые слова: комбинаторная оптимизация, линейная функция, перестановки, случайный поиск, метод ветвей и границ.

Keywords: combinatorial optimization, linear function, permutations, random search, branch and bound method.

Введение

Появление и развитие теории и методов решения задач линейной оптимизации направлено на решение широкого спектра проблем, возникающих в различных научных и прикладных задачах. Кроме того, технология решения задач линейного программирования играет значительную роль в создании алгоритмов для решения задач математического программирования других типов, в частности, задач комбинаторной оптимизации [1, 2].

Математические модели многих задач могут быть исследованы с помощью моделей и методов комбинаторной оптимизации, переменными в которых являются элементы классических комбинаторных множеств, среди них множества перестановок, сочетаний, размещений и другие [1-5].

Введение в комбинаторные оптимизационные модели дополнительных ограничений на переменные приводит к появлению классов задач комбинаторной оптимизации на подмножествах классических комбинаторных множеств. Одним из таких подмножеств является множество циклических перестановок как подмножество множества перестановок [7-9].

Существующие подходы к решению задач оптимизации на комбинаторных множествах делятся на две основные группы: методы отсечения и комбинаторные методы [1, 2, 10, 11]. Среди них метод комбина-

торного отсечения для задач оптимизации на евклидовых комбинаторных множествах, которые совпадают с множеством вершин своей выпуклой оболочки [5, 8]. Одним из наиболее распространенных точных комбинаторных методов является метод ветвей и границ [1]. Для решения задач комбинаторной оптимизации большой размерности часто используют методы, основанные на случайном поиске [2, 12].

Для повышения эффективности применения известных методов комбинаторной оптимизации целесообразно использовать при их реализации свойства комбинаторных множеств, описывающих области допустимых решений задач оптимизации [8, 9].

В данной работе для решения задач оптимизации на множестве циклических перестановок реализуется идеология случайного поиска на основе использования свойств циклических перестановок и аналитического решения систем линейных неравенств как ограничений на переменные.

Целью настоящей работы является решение задач оптимизации линейных функций на множестве циклических перестановок с линейными ограничениями.

1. Основные понятия и постановка задачи

Определение [11]. Линейное упорядочение элементов некоторого порождающего множества $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ называется перестановкой $\pi = (\pi(a_1), \pi(a_2), \dots, \pi(a_n)) = (a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_n}) = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ или, если необходимо подчеркнуть тот факт, что она содержит n элементов, n -перестановкой.

Множество перестановок, порожденное элементами $a_1 < a_2 < \dots < a_n$, обозначим P_n .

Рассмотрим некоторую перестановку $\pi = (\pi(a_1), \pi(a_2), \dots, \pi(a_n)) \in P_n$ и её элемент $\pi(a_i) = a_j$, $\forall i, j \in J_n$. Тогда можно записать: $\pi(a_j) = \pi(\pi(a_i)) = \pi^2(a_i)$. Обобщенно эту формулу можно представить в таком виде: $\pi^{k-1}(a_j) = \pi(\pi^{k-2}(a_j)) = \pi^k(a_i)$, $\forall i, j \in J_n$, $k \leq n$.

Таким образом [10], если для некоторого $l \geq 1$ имеем $\pi^l(a_i) = a_i$, $i \in J_n$, и элементы $a_i, \pi(a_i), \pi^2(a_i), \dots, \pi^{l-1}(a_i)$ все различны, то последовательность $(a_i, \pi(a_i), \pi^2(a_i), \dots, \pi^{l-1}(a_i))$ называется циклом длины l .

Определение [10]. Циклической называется такая перестановка π из n элементов, которая содержит единственный цикл длины n , т.е. $\pi^n(a_i) = a_i$, $\forall i \in J_n$. Такие перестановки будем обозначать π_c .

Обозначим P_n^C — множество циклических перестановок без повторений из n действительных чисел $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ [10, 11].

Отметим, что множества перестановок P_n и циклических перестановок P_n^C являются евклидовыми комбинаторными множествами, или ϵ -множествами [3, 4].

Исследуем задачу комбинаторной оптимизации в следующей постановке: минимизировать линейную функцию с линейными ограничениями на множестве циклических перестановок:

$$L(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i \rightarrow \min ; \quad (1)$$

$$Cp \leq d ; \quad (2)$$

$$p \in P_n^C , \quad (3)$$

где $C = [C_{ji}]_{m \times n}$, $d \in R^n$, $\alpha_i \in R$, $p_i \geq 0$; P_n^C — множество циклических перестановок без повторений из n действительных чисел.

Осуществим отображение множеств перестановок P_n и циклических перестановок P_n^C в арифметическое евклидово пространство R^n . Согласно [3, 4] указанное отображение (называемое погружением) зададим в виде:

$$f : P \rightarrow R^n , \quad \forall p = (p_1, p_2, \dots, p_n) \in P ,$$

$$x = f(\pi) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in E \subset R^n , \quad x_i = p_i , \quad i \in J_n .$$

В результате погружения f каждому множеству P_n , P_n^C поставим во взаимнооднозначное соответствие множество $E \subset R^n$: $E_n = f(P_n)$, $E_n^C = f(P_n^C)$.

Используя погружение комбинаторных множеств P_n , P_n^C в евклидово пространство, сформулируем задачу оптимизации, эквивалентную задаче (1)-(3):

$$L(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \rightarrow \min ; \quad (4)$$

$$Cx \leq d ; \quad (5)$$

$$x \in E_n^C \subset R^n , \quad (6)$$

где $C = [C_{ji}]_{m \times n}$, $d \in R^n$, $\alpha_i \in R$, $x_i \geq 0$; E_n^C — образ множества циклических перестановок в евклидовом пространстве.

2. Решение задачи на основе случайного поиска

Для решения задачи (4)–(6) используем подход, основанный на идеологии случайного поиска, свойствах перестановок, погруженных в евклидово про-

странство, и аналитическом решении систем линейных неравенств, описывающих ограничения задачи. Подобный подход ранее рассматривался для решения задачи оптимизации линейной функции на множестве перестановок P_n с линейными ограничениями [8].

Осуществим модификацию этого подхода для решения задачи (4)–(6) на циклических перестановках. Рассмотрим выпуклую оболочку множества E_n — перестановочный многогранник $\Pi_n = \text{conv}E_n$.

Так как любая циклическая перестановка принадлежит множеству перестановок P_n , следовательно, все циклические перестановки являются вершинами перестановочного многогранника Π_n .

Следуя работе [8], построим n -мерный симплекс $T_n \subset R^n$ [12], содержащий многогранник Π_n . Пусть симплекс T_n описывается системой неравенств $C_1 x \leq d_1$, где C_1 — матрица коэффициентов размерности $(n+1) \times n$, $d_1 \in R^{n+1}$. Так как многогранник Π_n полностью содержится в симплексе T_n , то при добавлении в систему ограничений задачи (4)–(6) линейных неравенств, задающих симплекс, все допустимые решения будут сохранены. Объединим (5) с неравенствами $C_1 x \leq d_1$ в систему линейных неравенств вида $W^0 x \leq v^0$, где $W^0 = [w_{ij}^0]$ — $(m+n+1) \times n$ -матрица, $v^0 \in R^{m+n+1}$. В результате можно сформулировать задачу оптимизации, эквивалентную (4)–(6):

$$L(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \rightarrow \min ; \quad (7)$$

$$W^0 x \leq v^0 ; \quad (8)$$

$$x_i \geq 0 ; \quad (9)$$

$$x \in E_n^C \subset R^n . \quad (10)$$

Рассмотрим стратегию решения задачи (7)–(10) [8]. Следуя идеологии случайного поиска, зададим некоторое количество серий испытаний M и количество испытаний в каждой серии m .

В каждом испытании в рамках одной серии находится решение системы линейных ограничений-неравенств. Согласно [13], общая формула неотрицательных решений системы (8)–(9) определяется выражением:

$$z = \frac{\xi_1 z^1 + \xi_2 z^2 + \dots + \xi_l z^l}{\xi_1 z_{N+1}^1 + \xi_2 z_{N+1}^2 + \dots + \xi_l z_{N+1}^l} ,$$

где z^1, z^2, \dots, z^l — найденные фундаментальные решения следующей вспомогательной системы линейных неравенств:

$$\begin{cases} W^0 x - v^0 x_{n+1} \leq 0 \\ -x_i \leq 0 \end{cases}; \quad (11)$$

$z_{n+1}^1, z_{n+1}^2, \dots, z_{n+1}^1$ – их последние координаты; $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_1$ – произвольные действительные числа, удовлетворяющие условию: $\xi_1 z_{n+1}^1 + \xi_2 z_{n+1}^2 + \dots + \xi_1 z_{n+1}^1 \geq 0$.

Далее случайным образом генерируются значения действительных чисел $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_1$, удовлетворяющих условию $\xi_1 z_{n+1}^1 + \xi_2 z_{n+1}^2 + \dots + \xi_1 z_{n+1}^1 \geq 0$. Исходя из написанного выше, получим $z(i)$ – решение, удовлетворяющее системе (11). Найдем точку множества E_n^C , ближайшую к полученному решению $z(i)$. Для этого определим

$$x_i = \arg \min_{x \in E_n^C} \|x - z(i)\|^2. \quad (12)$$

Если $x_i \in E_n^C$ не удовлетворяет системе неравенств (11), переходим к следующему испытанию.

В противном случае x_i сравнивается с предыдущими приближениями к решению задачи (7)–(10) и в случае, если в точке x_i функция цели принимает значение лучше, чем в предыдущих испытаниях, считаем x_i новым приближением к решению задачи (7)–(10).

Обозначим $\bar{x} = x_i$. Будем считать \bar{x} текущим приближением к решению, а $L(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{x}_i$ – верхней оценкой решения задачи (7)–(10). Добавим к системе (8) линейное неравенство:

$$\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n \leq \bar{d}, \quad (13)$$

где $\bar{d} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{x}_i$.

В результате получим систему линейных неравенств $W^1 x \leq v^1$. Найдем в системе $W^1 x \leq v^1$ неравенство с такой же, как в (13), левой частью: $\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n \leq \tilde{d}$. Сравним \tilde{d} и \bar{d} . Если $\tilde{d} < \bar{d}$, заменим в системе $W^1 x \leq v^1$ неравенство новым неравенством (13). Это приведет к сокращению области, описываемой системой неравенств. Обозначим $\bar{d} = \tilde{d}$. Продолжим процесс решения.

3. Решение вспомогательной задачи на множестве циклических перестановок

Рассмотрим решение вспомогательной задачи (12).

Для множества перестановок решение данной задачи сводится к нахождению безусловного минимума линейной функции и имеет следующий вид [3]:

$$x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = \arg \min_{x \in E_n} \sum_{j=1}^n c_j x_j, \quad (14)$$

где $c_j \in R^1$, $\forall j \in J_n$, $x_{m_i}^* = a_i$, $\forall i \in J_n$, а последовательность $\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ такова, что $c_{m_1} \geq c_{m_2} \geq \dots \geq c_{m_n}$.

Поскольку множество циклических перестановок является подмножеством множества перестановок, то для любого $x \in E_n^C$ задача (12) сводится к оптимизации линейной функции.

Для множества E_n^C задача нахождения $\min_{x \in E_n^C} \left(\sum_{j=1}^n x_j z(i)_j \right)$

не может быть решена на основе упорядочения элементов, и её предлагается решать с помощью метода ветвей и границ [9].

Основными составляющими метода ветвей и границ являются правило ветвления и правило выбора [1].

При решении данной задачи ветвление на каждом шаге алгоритма, т. е. генерация дочерних вершин, основано на фиксации различных порождающих элементов из числа еще не занятых относительно i -го коэффициента целевой функции, соответствующего данному уровню дерева.

Построение оценки для каждой вершины основано на подсчете произведений уже зафиксированных порождающих элементов на соответствующие коэффициенты функции цели и на перемножении оставшихся порождающих элементов на свободные коэффициенты целевой функции согласно (14).

С помощью этого алгоритма возможно получение точного решения исходной задачи. Но так как при решении (7)–(10) вспомогательную задачу необходимо решать много раз в рамках каждой серии экспериментов, для экономии вычислительных ресурсов был разработан эвристический подход, использующий некоторые шаги метода ветвей и границ.

Решение задачи о поиске эвристического решения состоит из двух этапов. Первый этап – поиск решения по методу ветвей и границ до определённого уровня k , задаваемого пользователем. Второй этап – дотраивание набора зафиксированных порождающих элементов до циклической перестановки случайным образом.

В результате получается некоторое эвристическое решение задачи оптимизации линейной функции на циклических перестановках. Полученное решение зависит от размерности n , уровня k , на котором происходит остановка построения дерева, и от коэффициентов целевой функции. Так, при уровне остановки k , близком к n , эвристическое решение может совпадать с решением, полученным методом ветвей и

границ. Чем меньше k и чем больше разность $n - k$, тем меньше вершин дерева будет пройдено перед случайным построением циклической перестановки и тем менее вероятно получение решения вспомогательной задачи (12), близкого к точному.

4. Использование параллельных вычислений

Описанная стратегия оптимизации линейной функции с линейными ограничениями на множестве циклических перестановок хорошо работает для решения задач относительно небольших размерностей. Но с ростом размерности n исходной задачи наблюдаются значительные затраты времени, необходимые для решения. Особенности принятой стратегии решения задачи дают возможность выполнить распараллеливание вычислений.

При решении задачи (7)-(10) вычисления можно ускорить путем параллельного решения вспомогательных задач вида (12) для случайно сгенерированных точек в рамках каждой серии испытаний. Количество испытаний m в каждой серии можно выбрать пропорциональным количеству процессоров.

Таким образом, стратегия решения задачи (7)-(10) с использованием параллельных вычислений выглядит следующим образом:

- 1) построение симплекса, содержащего в себе перестановочный многогранник;
- 2) формирование системы ограничений с учетом исходных данных;
- 3) одновременная генерация нескольких точек внутри области решений;
- 4) параллельное нахождение для каждой точки ближайшей вершины перестановочного многогранника с помощью метода ветвей и границ.
- 5) выбор из полученных решений наилучшего, обновление системы ограничений.

При оценке эффективности параллельных вычислений используют законы Амдала и Густафсона, для того чтобы рассчитать максимально возможное ускорение параллельного выполнения программы по сравнению с последовательным [14].

Рассмотрим S – ускорение, которое может быть получено на компьютере при данных значениях. Для ускорения, согласно закону Амдала, существует следующая оценка:

$$S < \frac{1}{f + \frac{(1-f)}{p}},$$

где f – доля операций, которые нужно выполнить последовательно; p – число процессоров.

Так же можно рассчитывать f в процентах, как количество серийного кода, которое может быть распараллелено. В таком случае оценка S может быть не столь точна, но её расчет значительно упрощается.

Анализ предложенной стратегии решения показывает, что при использовании параллельных вычислений доля серийного кода, который необходимо выполнить последовательно, будет составлять приблизительно 75%.

Тогда ускорение S можно оценить следующим образом:

$$S < \frac{1}{0,75 + \frac{(1-0,75)}{4}} = \frac{1}{0,75 + 0,0625} = 1,23.$$

5. Результаты вычислительных экспериментов

Изложенный метод оптимизации линейных функций на циклических перестановках с линейными ограничениями реализован программно. Случайным образом генерировались исходные данные задач: коэффициенты функции цели и ограничений. Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе решались задачи размерности до 8 переменных, разработанной модификацией метода случайного поиска, которые затем сравнивались с решениями, полученными полным перебором. Случайным образом генерировались коэффициенты двух линейных ограничений и коэффициенты целевой функции. Коэффициенты целевой функции генерировались в интервале [10; 100].

Для нахождения решения использовалось количество серий, равное 5, каждая серия состояла из 10 экспериментальных точек. Рассчитывалась относительная погрешность для задач, в которых результаты решения разработанным методом и методом полного перебора не совпадают. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Размерность задачи	Число совпавших решений	Число не совпавших решений	Относительная погрешность	Ср. время решения, сек.
3	10	0	0	0,14
4	5	5	0,077	0,269
5	3	7	0,128	0,439
6	4	6	0,072	0,734
7	3	7	0,084	1,527
8	0	10	0,134	3,402

На втором этапе решались задачи большей размерности. В таких задачах для получения нижней оценки минимума вычислялись две оценки [9] следующего вида:

$$E_1 = \left| \frac{Est - Rnd}{Rnd} \right|, \quad E_2 = \left| \frac{Est - Rnd}{Est} \right|,$$

где Est – минимум функции цели на циклических перестановках без учета линейных ограничений; Rnd – результат решения задачи методом случайного поиска. Результаты соответствующих вычислительных экспериментов приведены в табл. 2.

Для задач размерности выше 15 вспомогательная задача (8) решалась эвристически. Для каждой размерности задачи указан уровень дерева k , на котором останавливалось ветвление.

Таблица 2

Размерность задачи	k	Количество задач	Средняя оценка E_1	Средняя оценка E_2	Время решения, сек.
15	10	10	0,256	0,255	18,19
20	15	10	0,127	0,122	225,9
25	15	3	1,716	0,44	809,17

Для решения задач, результаты которых представлены в табл. 1 и 2, использовалось количество серий, равное 5, в каждой из серий проводилось по 10 экспериментов. Таким образом, для решения одной задачи поиска минимума линейной функции на множестве циклических перестановок с ограничениями необходимо было решить 50 вспомогательных задач. Для сокращения временных и технических ресурсов, необходимых для решения одной задачи, были проведены эксперименты, в которых количество серий экспериментов было уменьшено до 2, а в каждой серии проводилось по 15 экспериментов. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Размерность задачи	k	Количество задач	Средняя оценка E_1	Средняя оценка E_2	Время решения, сек.
25	15	7	0,1652	0,203	821,14
30	15	3	0,227	0,308	1805,86
35	15	1	0,219	0,2819	11215,516
40	20	1	0,305	0,379	33112,95

Были проведены также эксперименты по оценке эффективности использования параллельных вычислений при решении задачи (4)-(7). Реальным ускорением параллельного алгоритма будет отношение времени выполнения лучшего последовательного алгоритма ко времени выполнения параллельного алгоритма:

$$S = \frac{T_1}{T_p}, \text{ где } T_1 - \text{ время выполнения последовательно}$$

го алгоритма; T_p – время выполнения на p процессорах.

Для оценки масштабируемости параллельного алгоритма используется понятие коэффициента эффективности распараллеливания:

$$E = \frac{S}{p}.$$

Таблица 4

Размерность задачи	Время решения T_1 , сек.	Время решения $T_p = T_4$, сек.	$S = \frac{T_1}{T_p}$	$E = \frac{S}{p}$
15	493,7	281,5	1,75	0,4375
20	4782,9	3297,5	1,45	0,3625
25	62559,9	31688,3	1,97	0,4925

Отметим, что реальное ускорение, полученное благодаря использованию параллельных вычислений, больше, чем теоретическая оценка по закону Амдала. Это связано с неточной грубой оценкой f .

Выводы

Предложен метод решения задач комбинаторной оптимизации с линейной целевой функцией и линейными ограничениями на множестве циклических перестановок, использующий схему случайного поиска, свойства циклических перестановок, погруженных в евклидово пространство, и аналитическое решение систем линейных неравенств, описывающих ограничения задачи.

Решение вспомогательной задачи комбинаторной оптимизации на множестве циклических перестановок без ограничений выполнено с использованием метода ветвей и границ. Следует отметить, что применение метода ветвей и границ приводит к экспоненциальному росту трудоемкости при увеличении размерности задачи. Кроме того, наблюдается существенная зависимость трудоемкости решения как от способа ветвления, так и от способа вычисления оценок.

Для решения проблем, связанных с трудоемкостью решения задач комбинаторной оптимизации предложенным методом, были задействованы следующие модификации предложенного метода:

- 1) Модификация с поиском эвристического решения вспомогательной задачи о нахождении минимума нормы разности.
- 2) Модификация с параллельным вычислением вспомогательной задачи для нескольких точек из допустимой области.

Применение модификаций позволяет снизить вычислительные затраты при решении задач большей размерности. Эффективность предложенных усовершенствований продемонстрирована проведенными вычислительными экспериментами.

Литература: 1. Сергиенко, И. В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации / И. В. Сергиенко. К.: Наук. думка, 1988. 472 с. 2. Емец О. А. Комбинаторная оптимизация на размещениях / Емец О. А., Барболина Т. Н. К.: Наук. думка, 2008. 159 с. 3. Стоян, Ю.Г. Теорія і методи евклідової комбінаторної оптимізації / Ю.Г. Стоян, О.О. Ємець. К.: Інститут системних досліджень освіти, 1993. 188 с. 4. Стоян, Ю.Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. / Ю.Г. Стоян, С.В. Яковлев. К.: Наук.

думка, 1986. 268 с. **5. Емец О.А.** Решение линейных задач оптимизации на размещениях методом отсечения / О.А. Емец, Т.Н.Барболина // Кибернетика и системный анализ. 2003. №6. **6. Валуйская О.А.** О минимизации линейной функции на вершинах перестановочного многогранника с учетом линейных ограничений / О.А. Валуйская, С.В. Яковлев // Доп. НАНУ. 1999. № 11. С. 103–107. **7. Гребенник И.В.** Решение некоторых задач условной оптимизации линейных функций на перестановочном многограннике. / И.В. Гребенник // Радиоэлектроника и информатика. 1999. № 1. С. 55–59. **8. Гребенник И.В., Баранов А.В.** Оптимизация линейных функций с линейными ограничениями на комбинаторных множествах на основе случайного поиска // Искусств. интеллект. 2007. № 1. С. 132–137. **9. Гребенник И. В.** Оптимизация линейной функции на множестве циклических перестановок / Гребенник, И. В., Литвиненко, А. С., Титова, О. С. Бионика Интеллекта. 2012. №2(79). С.8-12. **10. Стенли, Р.** Перечислительная комбинаторика: Пер. с англ. А. И. Барвинка. М.: Мир, 1990. 440 с. **11. Vona M.** Combinatorics of permutations Chapman & Hall/CRC, 2004. 337 с. **12. Реклейтис Г.** Оптимизация в технике / Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.: Пер. с англ. В. Я. Алтаева. М.: Мир, 1986. 348 с. **13. Черников С.Н.** Линейные неравенства / С.Н. Черников. М.: Наука, 1968. 488 с. **14. Quinn M.J.** Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. New York: NY: McGraw-Hill, 2004.

Поступила в редколлегию 18.09.2015

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Новожилова М.В.

Гребенник Игорь Валериевич, д-р техн.-наук, профессор кафедры СТ (системотехники) ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, пр. Ленина, 14, тел. +38 (057) 702-10-06.

Баранов Алексей Васильевич, канд. техн. наук, кафедра СТ (системотехники) ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, пр. Ленина, 14, тел. +38 (057) 702-10-06.

Чёрная Ольга Сергеевна, ассистент кафедры СТ (системотехники) ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, пр. Ленина, 14, тел. +38 (057) 702-10-06.

Горбачева Алена Евгеньевна, аспирантка кафедры СТ (системотехники) ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, пр. Ленина, 14, тел. +38 (057) 702-10-06.

Grebennik Igor Valerievich, Ph.D., Professor, Department of SE (Systems Engineering) Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: Ukraine, 61166, 14 Lenin ave., mob. +38 (057) 702-10-06.

Baranov Alexei Vasil'evich, Ph.D., Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: Ukraine, 61166, 14 Lenin ave., mob. +38 (057) 702-10-06.

Chyornaya Olga Sergeevna, assistant chair of SE (Systems Engineering), Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: Ukraine, 61166, 14 Lenin ave., mob. +38 (057) 702-10-06.

Gorbacheva Alyona Evgen'evna, graduate student SE (Systems Engineering), Kharkiv National University of Radio Electronics. Address: Ukraine, 61166, 14 Lenin ave., mob. +38 (057) 702-10-06.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА



УДК004:519.713

РОЗУМНИЙ КІБЕР-УНІВЕРСИТЕТ – CLOUD-MOBILE СЕРВІСИ УПРАВЛІННЯ НАУКОВО-ОСВІТНИМИ ПРОЦЕСАМИ

**ХАХАНОВ В.І., ЧУМАЧЕНКО С.В.,
ЛИТВИНОВА Є.І., МІЩЕНКО О.С.**

Пропонується кіберфізична система Smart Cyber University (CyUni), яка характеризується: наявністю оцифрованого метричного простору регуляторних правил, точним моніторингом і активним кіберуправлінням науково-освітніми процесами, автоматичним генеруванням оперативних акторних впливів, незалежним від керівників прийняттям кібер-рішень з управління фінансовими, часовими та кадровими ресурсами, повним виключенням паперових носіїв з виробничих процесів. Вирішуються завдання метричного оцінювання студентів, науковців, викладачів, структурних підрозділів, науки і освіти університету для оперативного і стратегічного кіберуправління ресурсами з метою досягнення затребуваної міжнародним ринком якості науково-освітніх сервісів. Розглядаються питання масштабування сервісів кіберуправління стосовно вищої школи з метою суттєвого зниження державних витрат на апарат управління, підвищення ефективності науково-освітніх процесів шляхом повного викорінення корупції, укрупнення університетів, кіберстимулювання конструктивних вчених і професорів, що створюють ринково затребувану продукцію. Запропоновано моделі дізайн-взаємодії демократичних правил і кіберуправління в процесах прийняття рішень для державних університетів і організацій.

1. Проблематика дослідження

Проблема, на вирішення якої спрямовано проект. Реалізація проекту дозволить вирішити проблему суттєвого підвищення рівня життя працівників вищої школи та усунення корупції шляхом впровадження кіберсервісів цифрового моніторингу та прозорого управління ресурсами, підрозділами та науково-освітніми процесами, що забезпечить приплив зовнішніх інвестицій та підвищення якості наукових досліджень і випускників. Рішення проблеми комплексного розвитку університету (рівень споживання, інвестиційна привабливість, експорт продукції) пов'язано з інтеграцією технологій big data, cloud computing, mobile services і cyber physical systems на основі використання сучасних платформ computing services, пропонованих компаніями IBM, Google.

Об'єкт дослідження – науково-освітні процеси та організаційні структури вищої школи, покликані готувати кваліфіковані кадри (бакалавр, магістр, доктор філософії, доктор наук) для внутрішнього і міжнародного ринку праці.

Предмет дослідження – університет як кіберфізична система, що складається з семи взаємопов'язаних компонентів (Відносини, Roadmap, Управління, Інфраструктура, Кадри, Ресурси, Продукція – випускники та наукові досягнення), що реалізують науково-освітні процеси.

2. Стан досліджень

2.1. *Аналіз результатів, отриманих авторами.* Роботи, опубліковані авторами проекту з даної тематики [11-41], присвячені вирішенню питань:

1) Створення неарифметичних метрик і мультипроцесорів для паралельного аналізу великих даних в кіберпросторі за допомогою тільки логічних операцій [11-13,15,16, 28-34,36-38].

2) Адаптація квантових структур даних і методів для підвищення швидкодії віртуальних процесорів для пошуку інформації та прийняття рішень [11,17,18,26,27].

3) Реалізація кіберфізичних систем активного моніторингу та управління фізичними та соціальними об'єктами і процесами без участі людини [14,15,19-25,35,39-41]. Результати досліджень опубліковані в рейтингових журналах і монографіях, особисто доповідалися проф. Хахановим В.І. на конференціях і в університетах: США, Великобританії, Німеччини, Франції, Італії, Польщі, Чорногорії, Іспанії, Ірану, Румунії, Росії, Білорусії, Естонії та України. Є десятки телевізійних виступів Хаханова В.І. з даної тематики, розміщені на Youtube. Число публікацій керівника проекту в IEEE Xplore library за темою дорівнює 37 з 82 робіт. Автори проекту протягом 5 останніх років створили відому в світі технологічну культуру аналізу та синтезу компонентів кіберпростору для активного управління фізичними процесами без участі людини в межах існуючих світових тенденцій, пов'язаних з IoT, Embedded Micro Systems (EU grant), Virtual Computing (виконана д/б НДР «Персональний віртуальний кіберкомп'ютер та інфраструктура аналізу кіберпростору» № 0112U000209), Cyber Physical Systems (виконується д/б НДР 0115U-000712 з хмарного управління транспортом), Cloud and Mobile Services and Computing (створена лабораторія для студентів з відповідних курсів). Спроможність досліджень в даних сегментах підтверджено десятками публікацій у рейтингових журналах і прем'єр-конференціях, включаючи 2 статті в журналі «Електронне моделювання» (2015) та виступи на конгресі в Нью-Йорку (2015), Чорногорії (2015) та Польщі (2015).

2.2. *Аналіз результатів, отриманих іншими вітчизняними та закордонними вченими.* Аналіз досліджень в області створення кіберфізичних сервісів [1-10] свідчить про практичну відсутність на внутрішнь-

ому (зовнішньому) ринку науки і освіти системного розуміння хмарних кіберсервісів, що використовують метричні відношення, які регулюють правила не тільки цифрового моніторингу [1,5-7], але й активного human-free кіберуправління науково-освітніми процесами [8-10] для знищення корупції, залучення зовнішніх інвестицій, підвищення продуктивності праці, рівня життя вчених і професорів. Така біла пляма в наукових дослідженнях існує, незважаючи на високий рівень ринкової привабливості CyUni, що становить близько 1,5 млрд гривень на внутрішньому і близько 5 млрд на зовнішньому ринку. Це пов'язано з труднощами дізрапторного розуміння процесу кіберуправління соціальними групами без участі людини. Однак з'являються публікації [2-4], що все більше розглядають фізичні та віртуальні процеси як компоненти єдиної кібер екосистеми (cloud services + fog networks), що народжується на планеті.

Інтегрально слід зазначити, що сьогодні існує виражена ринкова тенденція [<http://www.ieeebigdata.org/Proceedings of 2015 New York IEEE SERVICES / BigData Congress CLOUD / ICWS / SCC / MS>] переходу від використання програмних додатків до сервісів, про що свідчать матеріали конгресу, де виступали провідні на ринку гравці, які представлені компаніями та університетами: IBM, Google, Amazon, NASA, MIT, Berkeley, Oxford, Purdue. Сервіс-орієнтовані технології диференціюються на такі платформи та принципи: 1) Entity relationship modeling, 2) Failure-driven evolution, 3) Operational model does not work anymore - leveraging service-oriented platform, 4) Domain specific data is a big data structure, 5) Multiple machine learning for parallelization, 6) Packaging computers as a services, 7) IP address to the POD which migrates like car, 8) IP address for services, 9) Integration of big data, cloud computing, mobile services and cyber physical systems. З окремих додатків, сервісів і сенсорів формується кіберфізичний простір (екосистема), яка містить три виражених компоненти: хмарні сервіси, туманні (fog) мережі, сенсорні і актуаторні фізичні пристрої (mobile, pads, pods, lap tops), які взаємодіють між собою в реальному часі. Основна ідея всіх провідних компаній простежується в напрямку відмови від пасивної концепції ІТ-моніторингу з поступовим переходом до активної фази управління фізичними та соціальними процесами і явищами на основі IoT-культури.

3. Мета, основні завдання та їх актуальність

3.1. *Ідеї та робочі гіпотези проекту.* Замість віджилих інформаційних технологій – Internet of Things. Замість пасивного інформаційного моніторингу – human-free активне управління в оцифрованому кіберфізичному просторі. Важко влити в людину нові знання, але легко (ще важче) завантажити в нього нову метрику бачення дійсності. Мова йде про оцифрування наукових та освітніх процесів для створення кіберфізичних систем не тільки моніторингу, в чому ми досягли успіху, але й управління, де суспільство ніяк не може розлучитися з тисячолітньою легендою

про прихід нового доброго царя, який буде правити справедливо. У реальності виходить, що кожен наступний керівник гірший, ніж усі попередні. Тому майбутнє людства пов'язане з ідеєю створення human-free «хмарного» кіберуправління соціальними інститутами, спрямованого на реалізацію відкритого і об'єктивного регулювання оцифрованими процесами, де замість корумпованого керівника виступає неупереджена кіберсистема. Природно, кому як не вченим зайнятися розробкою таких сервісів для cloud-управління науково-освітніми процесами в межах реалізації розумного кіберуніверситету. Факт, оцінка, дія – формат циклу кіберсистеми управління, пов'язаної з процесами моніторингу, вимірювання та управління, який заснований на постулаті: «Немає виміру – немає управління».

3.2. *Мета і завдання, на вирішення яких спрямовано проект.* Мета CyUni-проекту – підвищення якості освітніх послуг та наукових досягнень вищої школи за рахунок створення метричної системи відношень, яка регулює правила цифрового моніторингу та активного хмарного кіберуправління науково-освітніми процесами, що дає можливість знищити корупцію, залучити зовнішні інвестиції, істотно підвищити продуктивність праці, рівень життя конструктивних вчених і професорів, що створюють ринково затребувану продукцію.

Створити масштабовану модель цифрового кіберуніверситету означає вирішити такі завдання:

1) Оцифрувати і специфікувати усі дев'ять процесів і компонентів, включаючи, в першу чергу, систему відношень для прийняття кібер-рішень. Це означає, що не повинні видаватися документи, де регуляторні впливу (моніторинг і управління) не мають логічного чи цифрового значення, якого не можна виміряти. Система відношень визначається як взаємопов'язана сукупність регуляторних впливів (накази, положення, статuti, закони і традиції), що формує основи взаємодії, оперативного та стратегічного моніторингу та управління науково-освітніми процесами, кадрами, інфраструктурою, фінансовими та часовими ресурсами, спрямованими на створення зовнішнього іміджу і внутрішнього морально-етичного клімату з метою досягнення європейського рівня: наукових досліджень, підготовлених фахівців та якості життя співробітників.

2) Створити метрики відношень (компетенцій) процесів і компонентів на основі інтегрування досвіду вимірювання університетів державними та міжнародними організаціями. Метрика відношень – оцифрована сукупність регуляторних впливів (накази, положення, статuti, традиції і закони), що формує основи взаємодії оперативного та стратегічного цифрового моніторингу та кібер-управління оцифрованими науково-освітніми процесами, кадрами, інфраструктурою, фінансовими і часовими ресурсами, спрямованого на створення зовнішнього іміджу і внутрішнього морально-етичного клімату з метою досягнення євро-

пейського рівня: наукових досліджень, підготовлених фахівців та якості життя співробітників.

3) Розробити логіко-цифрові моделі науково-освітніх процесів і компонентів університету для створення сервісів адекватного моделювання структурних або функціональних змін. Інтегрувати функціональності в кіберфізичний сервіс аналітики і прогнозування станів університету на основі активізації істотних змінних. Ринкова потреба в моделюванні кіберфізичних систем призводить до створення інтернет-чипів, що мають адресний кіберпростір і високу швидкодію за рахунок розпаралелювання обчислювальних процесів та інтегрування кращих на ринку програмно-апаратних рішень у вигляді IP-core. Тут використовуються логічні квантові [1] схеми моніторингу та управління без участі людини на основі розумних кіберфізичних структур даних, що оперують логічними і чисельними змінними ресурсів, часу, грошей, сировини та якості продукції. Квант функціональності - функція від кінцевого числа змінних, що створюють простір станів цифрового кіберуніверситету, заданих в інтервалі дійсних чисел між логічним нулем і одиницею, яка формує рівень якості процесів або явищ. Природно, що метрикопридатність законів, статутів, наказів та положень стає головною умовою народження і становлення цифрового простору соціально-метричних відношень, що специфікують кібер-сервіси моніторингу та управління державними структурами.

4) Інтегрувати у кіберсистему цифровий підпис, електронний ключ, електронне голосування і мобільне опитування, впровадити в практику цифрові накази й журнали обліку роботи студентів. Як наслідок, повністю виключити паперові носії у всіх сферах діяльності університету (наука, освіта, зв'язок із зовнішнім світом, дисертації, книги, методичні матеріали, регуляторні документи).

3.3. Обґрунтування актуальності та/або доцільності виконання завдань, виходячи із: стану досліджень проблематики і тематики; ідей та робочих гіпотез проекту. Світові процеси, що пов'язані з наукою і освітою, мають сьогодні такі основні тренди: 1) укрупнення університетів до рівня 15-25 тисяч студентів, які стають помітними на ринку освіти; 2) повсюдне впровадження МООС-технологій, що надають рівні права безкоштовної елітної освіти всім жителям планети; 3) віртуальна і фізична мобільність студентів, що забезпечує високий рівень знань від кращих університетів світу і швидко соціальну адаптацію майбутнього фахівця до технологій і різних культур сучасного виробництва; 4) комп'ютерне тестування знань і умінь, що виключає корупційні відносини між викладачем і студентом; 5) накопичувальна кіберсистема компетенцій викладача і студента, що довічно супроводжує (моніторинг і управління) їх творчу активність в особистому віртуальному кабінеті; 6) цифрове кіберуправління усіма науково-освітніми процесами в університетах, що виключає паперові носії і ручне регулювання інфраструктурою, ресурсами, кадрами і студентами.

4. Підхід, методи, засоби та особливості досліджень за проектом

4.1. *Визначення підходу щодо проведення досліджень, обґрунтування його новизни.* Підхід характеризується дізрапторною зміною парадигми пасивного ІТ-моніторингу активним ІоТ-керуванням фізичними процесами на основі використання Big Data аналітики. Створення кіберфізичної системи CyUni моніторингу та управління засновано на використанні автоматної моделі Хаффмена, особливістю якої є використання хмарних сервісів як механізму управління, а туманних мереж (fog networks) - як механізму виконання.

4.2. *Нові або оновлені методи та засоби, методика та методологія досліджень, що створюватимуться авторами у ході виконання проекту.*

Методи прийняття рішень кіберсистемою орієнтовані на аналіз великих даних за допомогою фільтрів метричних відношень, що виключають безпосередню участь чиновника, який виконує декоративну функцію. Методи обчислень використовують мультипроцесори на основі застосування квантових функціональних примітивів, що працюють за неарифметичною метрикою вимірювання об'єктів у кіберпросторі. Цифровий кіберпростір науки і освіти є платформою для створення масштабованих human-free хмарних кіберсервісів. Оцифровування фізичних і віртуальних компонентів науково-освітніх процесів є необхідною умовою кіберфізичного моніторингу та управління університетом. Для цього слід згенерувати метрики компетенцій для вимірювання якості системоутворюючих компонентів університету: 1) Відносини. 2) Roadmap. 3) Управління. 4) Інфраструктура. 5) Кадри. 6) Ресурси. 7) Продукція (випускники та наукові досягнення). 8) Наука. 9) Освіта. Кожна метрика повинна оперувати змінними, що формують простір вимірювання, які можуть бути як булевими (лінгвістичними), так і чисельними, нормованими в інтервалі (0,1). Багатозначність градації інтервалу існування параметра метрики між нулем і одиницею залежить від сервісів, що надаються споживачеві кіберфізичних систем: 1) Прийняття рішення – (так чи ні). 2) Оцінки процесів або об'єктів для керівника (добре, погано, відмінно, задовільно) завжди потребують коментарі. 3) Безперервний інтервал дійсних чисел від 0 до 1 точно визначає якість однотипних процесів або явищ і ранжує їх відповідно за заданою метрикою компетенцій. Недоліком скалярної інтегральної оцінки є неможливість дешифрування значень всіх складових параметрів метрики за критерієм якості. Тому, поряд з інтегральним показником, необхідно зберігати всі значення структурних змінних, які використовуються для адекватного аналізу системних процесів і явищ. Практично всі локальні і глобальні параметри, використовувані для формування інтегральних показників якості університетів світу, добре відомі фахівцям. Однак не існує сьогодні сервісу, здатного прогнозувати зміни в системних компонентах університету шляхом моделювання змін вхідних або внутрішніх змінних. У

технічній галузі системи імітації та тренажери є невід'ємною частиною експлуатації і ремонту складних виробів (літаки, автомобілі, атомні станції). Необхідні аналогічні системи і в науковій освітній сфері людської діяльності.

4.3. *Особливості структури та складових проведення досліджень.* Всі структурні розв'язки при створенні CyUni є новими. Кіберфізична Структура CyUni розглядається як human-free структура online моніторингу та cloud-driven управління науковими та освітніми оцифрованими процесами на основі метрикопридатних законодавчих актів держави, статуту, положень і наказів університету, стимулюючих залучення інвестицій шляхом виконання актуальних наукових досліджень і підготовки затребуваних ринком фахівців з академічними та вченими ступенями для досягнення високої якості життя співробітників. Узагальнена автоматна структура кіберуніверситету розкладається на сервіси, обслуговуючі процеси (наука, освіта) та об'єкти (студент, професор, кафедра). Хмарні кібердодатки, орієнтовані на активний супровід студентів, являють собою корисні мобільні сервіси, що доставляються кожному з них за допомогою гаджетів у режимі online. Такими є: 1) Інтегральний рейтинг студента на момент запиту або оцінки при здачі іспитів студентами. 2) Формування індивідуального плану навчання залежно від рівня компетенцій студента. 3) Online-генерування документів, що сертифікують якість студента, включаючи приведення освітніх сертифікатів до ECTS-стандарту. 4) Online-інформування студента про всі, які стосуються його, заходи і документи в минулому, сьогоденні і майбутньому (розклад занять і зміни, наукові та волонтерські заходи, виставлені екзаменаційні оцінки та зміни в рейтингах, накази та положення). Аналогічні сервіси надаються співробітникам університету та керівництву, відмінності яких полягають в активному управлінні кадрами та ресурсами без участі чиновників.

5. Наукова новизна наведених положень та їх перевага над існуючими

1) Запропоновано кіберфізичну систему Cyber University (CyUni), яка характеризується: наявністю оцифрованого метричного простору регуляторних правил, точним моніторингом і активним кіберуправлінням науково-освітніми процесами, автоматичним генеруванням оперативних актуаторних впливів, незалежним від керівників прийняттям кібер-рішень з управління фінансовими, часовими і кадровими ресурсами, повним виключенням паперових носіїв з виробничих процесів.

2) Створено метрики і моделі цифрового оцінювання студентів, науковців, викладачів, структурних підрозділів, науки і освіти університету, які характеризуються відсутністю арифметичних операцій, мінімальним набором логічних команд, паралельним виконанням процедур пошуку і прийняття рішень на основі квантових структур даних, необхідних для істотного підвищення швидкодії проектування кіберсервісів

оперативного і стратегічного human-free управління ресурсами з метою досягнення затребуваної міжнародним ринком якості науково-освітніх сервісів.

3) Запропонована метрика компетенцій як спосіб вимірювання відстані між об'єктами або процесами на основі вектора параметрів, що формує простір у формі матриці компетенцій людини або соціальної групи у реальному часі, яка відрізняється від аналогів моделлю інтегральної діяльності та умінь людини (соціальної групи) на заданій метриці в часовому інтервалі, що дає можливість враховувати науково-освітню активність співробітника або студента для його стимулювання та оперативного управління.

4) У межах даної структури SyUni запропонована модель human-free кіберуправління соціально-значущими процесами і ресурсами (кадри і фінанси), яка характеризується хмарними сервісами розподілу державних замовлень і фінансів між структурними підрозділами на основі змагання матриць їх компетенцій за заданими метриками, а також розподіл кадрових вакансій шляхом порівняння інтегральних матриць компетенцій претендентів, що дає можливість уникнути суб'єктивних помилок при прийнятті важливих рішень.

5) Розроблено моделі масштабування сервісів кіберуправління стосовно вищої школи, які характеризуються автономним цифровим моніторингом і активним кіберуправлінням процесами без участі людини з метою істотного зниження державних витрат на апарат управління, підвищення ефективності науково-освітніх процесів шляхом повного викоринення корупції, укрупнення університетів, кіберстимулювання конструктивних вчених і професорів, що створюють ринково затребувану продукцію.

6) Запропоновано нові моделі дізрапторної взаємодії демократичних правил і кіберуправління, які характеризуються циклічною взаємодією демократичних принципів формування експертних груп для вироблення регуляторних правил і кіберуправлінням ресурсами в реальному часі без участі чиновників, що дозволяє виключити помилки в процесах прийняття рішень для державних університетів та організацій, а також повністю усунути корупцію.

Всі створювані метрики і моделі є науково-обґрунтованими і доведеними. Корисними методичними і технічними напрацюваннями на основі практичного досвіду будуть нові моделі дізрапторної взаємодії демократичних правил і кіберуправління в процесах прийняття рішень для державних університетів і організацій.

6. Практична цінність результатів для економіки та суспільства

Цінність результатів для соціально-економічної системи України:

1) Ринкова привабливість CyUni-сервісу визначається тенденцією глобального проникнення в державні науково-освітні структури кіберсервісів, що спрямовані на ініціювання конструктивної активності науково-

педагогічних кадрів, здатної підвищити продуктивність праці вчених, як мінімум, у два рази.

2) Кіберсистема human-free управління виробничими процесами та ресурсами, що масштабована своїми регуляторними впливами до рівня всіх державних структур та організацій, тотально знищить корумповані відношення, що забезпечить економічний ефект за рахунок підвищення продуктивності праці співробітників державного сектора, який сумірний з іншим бюджетом країни.

3) Моральна сторона ефекту від впровадження кіберсистеми пов'язана з реанімацією довіри населення до державних організацій і структур, які назавжди втраять функціональність розподілу ресурсів і посад, делегуючи дані повноваження неупередженому кіберсервісу.

Соціальний ефект від використання результатів проекту:

1) Істотне зниження сумарних непродуктивних державних витрат на навчально-освітні процеси вищої школи, що усуваються кіберсервісами моніторингу та управління, у розмірі 1245 млн гривень.

2) Отримання прибутку від впровадження кіберсервісів управління за рахунок прямого фінансування праці вчених на основі точного моніторингу їх результатів, що дозволить протягом перших трьох років експлуатації СуUnі підвищити продуктивність праці співробітників вищої школи, спрямованої на створення ринково затребуваної продукції, як мінімум в 2 рази.

Цінність очікуваних результатів для світової та вітчизняної науки:

1) Завдяки впровадженню СуUnі університетська наука вперше реально матиме можливість стати продуктивною силою внаслідок виключення чиновника з процесів авторитарного керування всіма видами ресурсів.

2) Ринкова привабливість хмарних сервісів кіберуправління науковими дослідженнями та освітніми процесами в масштабах планети – не менше 5 млрд доларів.

Цінність результатів для підготовки фахівців: 1) запропонована соціально-значуща модель human-free моніторингу та кіберуправління державними структурами, яка дозволяє позбавити авторитарного керівника функціональності суб'єктивного регулювання ресурсами; 2) розроблено метрики оцінювання науково-освітньої активності науково-педагогічних кадрів та студентів для створення кіберсервісів, моніторингу та управління виробничими процесами у межах кіберфізичної системи розумного університету.

Інформаційно-аналітичні матеріали, рекомендації, розробки, пропозиції тощо, що можуть бути передані для використання на підставі укладання госпо-

дарчих договорів і грантових угод, продажу ліцензій тощо:

1) Кібердемократична модель обрання керівників державних установ, що орієнтоване на повне викоренення корупції у країні.

2) Методологія управління державними структурами (університети, підприємства) на основі оригінальних метрик компетенцій, що дозволяють здійснювати моніторинг та управління ресурсами й кадрами, що дає повністю викоренити корупцію).

3) Хмарний сервіс управління вищою школою, який надає можливість вимірювати конструктивну активність усіх університетів та керувати науковими освітніми процесами у відповідності з досягненнями.

7. Фінансове обґрунтування витрат для виконання проекту

Економічне обґрунтування ринкової привабливості проекту.

Ринкова привабливість СуUnі-сервісу визначається тенденцією глобального проникнення в державні науково-освітні структури кіберсервісів, спрямованих на ініціювання конструктивної активності науково-педагогічних кадрів, здатної підвищити продуктивність праці вчених, як мінімум, у два рази.

Враховуючи наявність в країні 300 університетів і 1,5 млн студентів, яких навчають 150 тис. працівників вищої школи, можна зробити такі розрахунки ринкової привабливості проекту, що усуває прямі непродуктивні річні витрати.

1) Корупційний бюджет «студент-викладач»:

$$1\ 500\ 000 \times 0,5 \times 1000 = 750\ 000\ 000 \text{ гривень.}$$

2) Втрати бюджетних коштів при корумпованому перерозподілі фінансів на наукові дослідження:

$$300\ 000\ 000 \times 0,25 = 75\ 000\ 000 \text{ гривень.}$$

3) Втрати бюджетних коштів на високі накладні витрати при виконанні наукових досліджень:

$$300\ 000\ 000 \times 0,25 = 75\ 000\ 000 \text{ гривень.}$$

4) Втрати бюджетних коштів на утримання апарату управління та непродуктивних відділів:

$$150\ 000 \times 0,1 \times 1500 \times 12 = 270\ 000\ 000 \text{ гривень.}$$

5) Паперовий документообіг: 50 пачок x 50 відділів x 100 гривень x 300 = 75 000 000 гривень.

Таким чином, тільки сумарні непродуктивні витрати на навчально-освітні процеси вищої школи, що усуваються кіберсервісами моніторингу та управління, дорівнюють 1245 млн гривень. Однак основний ефект від впровадження кіберсервісів управління пов'язаний з прямим фінансуванням праці конструктивних вчених на основі точного моніторингу їх результатів. Це дозволить протягом перших трьох років експлуатації СуUnі підвищити продуктивність праці співробітників вищої школи, спрямованої на створення ринково затребуваної продукції, як мінімум в 2 рази.

Завдяки впровадженню СуУні університетська наука реально має можливість стати продуктивною силою внаслідок виключення чиновника з процесів авторитарного керування всіма видами ресурсів. Ринкова привабливість хмарних сервісів кіберуправління науковими дослідженнями та освітніми процесами в масштабах планети - не менше 5 млрд доларів.

Література:

1. *Ahmed, S.H., Gwanghyeon Kim, Dongkyun Kim.* Cyber Physical System: Architecture, applications and research challenges. *Wireless Days, 2013 IFIP Conference: 13-15 Nov. 2013.* P. 1 – 5. 2. *Hoang, DatDac, Hye-Young Paik, and Chaekyu Kim.* “Serviceoriented middleware architectures for cyber-physical systems.” *International Journal of Computer Science and Network Security.* 2012. P. 79-87. 3. *Wu, Fang-Jing, Yu-Fen Kao, and Yu-Chee Tseng.* “From wireless sensor networks towards cyber physical systems.” *Pervasive and Mobile Computing.* 2011. P. 397-413. 4. *Sanislav, Teodora, and Liviu Miclea.* “Cyber-Physical Systems-Concept, Challenges and Research Areas.” *Journal of Control Engineering and Applied Informatics.* 2012. P. 28-33. 5. *Tan, Ying, Steve Goddard, and Lance C. Perez.* Prototype architecture for cyber-physical systems.” *ACM SIGBED.* 2008. P. 1-2. 6. *Wan, J., Yan, H., Liu, Q., Zhou, K., Lu, R. and Li, D.* (2012) “Enabling cyber-physical systems with machine-to-machine technologies”, *Int. J. Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, Vol. 9, No. 3/4. P.1-9. 7. *Insup Lee, Sokolsky. O.* “Health Cyber Physical Systems, “in 47th ACM/IEEE Design Automation Conference, Anaheim, 2010. P.13-18. 8. *Cheolgi Kim, Mu Sun, Sibin Mohan, Heechul Yun, Lui Sha, Tarek F. Abdelzaher.* “A Framework for the Safe Interoperability of Health Devices in the Presence of Network Failures. *Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Stockholm, 2010.* P. 149-158. 9. *Yizheng Wang, Lefei Li, Liuqing Yang.* *Cyber-Physical Social Systems. Intelligent Human Resource Planning System in a Large Petrochemical Enterprise.* *Intelligent Systems, IEEE.* Volume: 28. Issue 4. 2013. P. 102–106. 10. *Zhong Liu; Dong-Sheng Yang; Ding Wen; Wei-Ming Zhang; Wenji Mao.* *Cyber-Physical-Social Systems for Command and Control.* *Intelligent Systems, IEEE.* Volume: 26. Issue. 4. 2011. P. 92 – 96. 11. *El-Tawab, S.; Olariu, S.; Almalag, M. Friend.* A cyber-physical system for traffic flow related information aggregation and dissemination. *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2012 IEEE International Symposium.* 2012. P. 1-6. 12. *Леонид Черняк.* Киберфизические системы на старте // «Открытые системы», 2014. № 2. С. 1-5. 13. <http://controlengrussia.com/programmnye-sredstva/vstraivaemye-sistemy-upravleniya>. 14. *Ariane Hellinger, Heinrich Seeger.* *Cyber-Physical Systems. Driving force for innovation in mobility, health, energy and production.* *Acatech: 2011.* 47 p. 15. *Hahanov V., Mischenko A., Michele Mercaldi, Andrea D’Oria, Davide Murru, Hai-Ning Liang, Ka Lok Man, Eng Gee Lim.* Internet of things: a practical implementation based on a wireless sensor network approach // *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium.* – Kharkov, Ukraine. – 14-17 September, 2012. – P. 486 - 488. 16. *Hahanov V., Hahanova I., Guz O., Abbas M.A.* Quantum models for data structures and computing // *International Conference on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET).* 2012. P. 291. 17. *Бондаренко М.Ф., Хаханов В.И., Энглезі І.П., Лобур М.В., Чумаченко*

С.В., Литвинова Е.И., Гузь О.А. Перспективные технологии XXI века «Облако мониторинга и управления дорожным движением – зеленая волна». Украина, Одесса. – 2013. – 149 с. 18. *Хаханов В.И., Энглезі І.П., Литвинова Е.И., Чумаченко С.В., Гузь О.А., Хаханова А.В.* Облачная инфраструктура мониторинга и управления дорожным движением // *Радиоэлектронні і комп’ютерні системи.* – 2013. – №5. – С. 106-111. 19. *Хаханов В.И., Меликян В.Ш., Саатчян А.Г., Шахов Д.В.* «Зеленая волна» - облако мониторинга и управления дорожным движением // *Вестник «Информационные технологии, электроника, радиотехника».* Армения. 2013. Вып. 16 (№1). – С. 53-60. 20. *Хаханов В. И., Чумаченко С. В., Литвинова Е. И., Мищенко А.С.* Развитие киберпространства и информационная безопасность // *Радиоэлектроника, информатика, управління.* 2013. № 1. С. 151-157. 21. *Hahanov V.I., Guz O.A., Ziarmant A.N., Ngene Christopher Umerah, Arefjev A.* Cloud Traffic Control System // *Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium. Rostov-on-Don, Russia. 27-30 September, 2013.* P.72-76. 22. *Hahanov V., Gharibi W., Lobur M., Litvinova E., Chumachenko S., Saatchyan A., Guz O., Filippenko O., Poletaykin A., Shakhov D.* Cloud «Green Wave traffic monitoring and control» // *Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції CADSM 2013 «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці».* Львів – Поляна. 19-23 лютого, 2013. С.120-126. 23. *Hahanov V.I., Chumachenko S.V., Litvinova E.I., Dahiri F., Dementiev S.* Intellection Traffic Control on Cloud // *HPC – UA Conference «Parallel and Distributed Computing Systems».* Kharkiv. March 13-14, 2013. P. 130-142. 24. *Хаханов В.И., Энглезі І.П., Гузь О.А., Полетайкин А.Н.* Современные инфраструктурные средства управления дорожным движением в крупных городах // *Матеріали 3 Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху».* ХНАДУ. 2013. С. 208-210.

Надійшла до редколегії 21.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Харченко В.С.

Хаханов Володимир Іванович, декан факультету КІУ ХНУРЕ, д-р техн. наук, професор кафедри АПОТ ХНУРЕ, IEEE Senior Member, IEEE Computer Society Golden Core Member. Наукові інтереси: технічна діагностика цифрових систем, мереж і програмних продуктів. Захоплення: баскетбол, футбол, гірські лижі. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Леніна, 14, тел. +380 57 70-21-326. E-mail: hahanov@icloud.com.

Чумаченко Світлана Вікторівна, д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою АПОТ ХНУРЕ. Наукові інтереси: математичне моделювання, теорія рядів, методи дискретної оптимізації. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Леніна, 14, тел. + 3805770-21-326, e-mail: ri@kture.kharkov.ua.

Литвинова Євгенія Іванівна, д-р техн. наук, професор кафедри АПОТ ХНУРЕ, заст. декана факультету КІУ ХНУРЕ, IEEE Member. Наукові інтереси: технічна діагностика цифрових систем, мереж і програмних продуктів. Захоплення: музика. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Леніна, 14, тел. + 3805770-21-326. E-mail: kiu@kture.kharkov.ua.

Мищенко Олександр Сергійович, аспірант кафедри АПОТ ХНУРЕ. Наукові інтереси: хмарні технології, web-програмування. Захоплення: подорожі. Адреса: Україна, 61166, Харків, пр. Леніна, 14, тел. +380 57 70-21-326, E-mail: santific@gmail.com.



СТРУКТУРНИЙ ПІДХІД ДО ПОШУКУ ПРИРОДНО-МОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

КИСЛЕНКО Ю.І., СЕРГЕСЬВ Д.С.

Розглядаються можливості використання структурованого представлення природно-мовної інформації для покращення якості роботи пошуку у великому корпусі текстових даних, яким зокрема є мережа Інтернет. Як квант знань пропонується використовувати базову семантико-синтаксичну структуру, що постає похідною від структурно-функціонального рівня нейроорганізації зорового тракту. Теоретично обґрунтовуються переваги використання такої бази знань та приклади деяких прикладних проблем, вирішення яких може бути полегшене.

Ключові слова: база знань, пошук, інтернет, базова семантико-синтаксична структура, природно-мовна інформація, квант знань.

Keywords: knowledge base, search, Internet, basic semantic-syntactic structure, natural language information, quantum of knowledge.

1. Вступ

Питання текстового пошуку в мережі Інтернет вже не перший рік залишається однією з найбільш популярних тем для теоретичних досліджень та постійним об'єктом втілення прикладних інновацій. Це не дивно, враховуючи, що Інтернет бурхливо розвивається, а перед розробниками пошукових систем кожного дня постають нові виклики. Але, незважаючи на величезні зусилля та ресурси, що витрачаються на покращення релевантності пошуку, результати цих витрат наразі складно назвати задовільними [8]. На жаль, переважна більшість рішень щодо вдосконалення роботи пошукових систем дають досить невеликий приріст якості, оскільки приймають їх, в основному, через відсутність кращих пропозицій [5]. Основною причиною такого стану справ можемо справедливо назвати відносно молодий вік як самої мережі Інтернет, так і відповідних технологій пошуку. Хоча розвиток все-світньої мережі розпочався близько 30 років тому, досі не можемо вважати його закінченим — а підходи, згідно з якими вона працює, не змінювалися з самого початку її існування. Ситуація дещо ускладнюється ще й тим, що технології веб-пошуку сильно залежать від досягнень у багатьох незалежних галузях науки, які за всі ці роки теж не стояли на місці. Як приклад наведемо представлення природно-мовного тексту як ізольованого об'єкта, без урахування процесів його синтезу — у наш час такий підхід вже вважається дещо наївним, все частіше зустрічається

подання природної мови як самостійної структури збереження і передачі даних. І якщо такі розбіжності були допустимими на початку історії комп'ютерних технологій, то зараз, коли обсяг даних сягає сотень петабайт, вони є досить помітною перешкодою на шляху подальшого розвитку пошукових систем.

2. Постановка задачі

Для початку окреслимо ті задачі, які лежали в основі ідеології класичних пошукових систем (КПС) і які не вирішуються в повній мірі їх сучасними представниками.

Перше й найбільш очевидне, що спадає на думку — це можливість обробки природно-мовних (ПМ) запитів. Замість передбачених фантастами й теоретиками ХХ сторіччя пошукових систем, з якими користувач спілкується як з живою людиною — маємо користувача, що формує свій запит згідно з формальними системами правил пошукової системи.

Друга, не менш важлива, задача — це формування «загальної бази знань», тобто такої системи, яка б давала можливість знайти відповідь на будь-яке питання, або впевнитися, що ця відповідь людству не відома. На жаль, характерною рисою КПС є неминуча втрата інформації — риса, що є невід'ємною частиною будь-яких систем, які оперують не точними числами, а статистичними даними. Навіть якщо на кожному етапі роботи системи втрачається лише невелика частка інформації, це вже позбавляє усю систему детермінованості, тобто зменшує її надійність та погіршує якість результатів пошуку. Адже немає ніякої гарантії, що саме той результат, який шукав користувач, не було пропущено через недосконалість системи.

Можемо впевнено казати, що ці дві проблеми мають спільний корінь, а саме — відсутність моделі структурованого представлення природно-мовного повідомлення. Така модель автоматично вирішила б як проблему детермінованості результатів пошуку, так і проблему синтезу-аналізу природно-мовного повідомлення.

Дійсно, вирішенню цієї проблеми присвячено багато досліджень, і в результаті деяких з них навіть з'явилися дієздатні продукти — в тому числі такі гіганти як *Wordnet* та *Wolfram Alpha*. Були і спроби інтегрувати структуровані дані у результати текстового пошуку КПС [7, 10]. Ці системи працюють в певній мірі успішно, але в основі їх лежать виключно штучні структури, що не розраховані на всеосяжне охоплення всієї множини ПМ структур. Відповідно, якість їх роботи з наповненням бази катастрофічно падає, що сильно обмежує сферу їх можливого використання. Більш того, деякі з проблем КПС так само актуальні і для структурованих БЗ на основі штучних структур, у чому зможемо переконаватися пізніше.

У роботах [2,6] запропоновано новий інтегральний підхід до моделювання мовленнєвої діяльності, в основі якого лежать сучасні досягнення у багатьох суміжних напрямках, зокрема нейрофізіології, психо-

логії та кібернетики. Дана стаття присвячена аналізу можливості використання цього підходу для покращення якості роботи текстового пошуку у мережі Інтернет.

3. Теоретичний аспект

Почнемо з визначення термінології, що буде використовуватись надалі в цьому тексті.

Індивідуальна мовна система (ІМС) — це модель мовленнєвої діяльності людини, побудована на принципах, запропонованих Л. Щербою [3]. Модель ІМС (рис. 1) складається з двох структурних частин — лінгвістичного процесора (ЛП), який виконує функції синтезу та аналізу природно-мовних повідомлень, та бази знань (БЗ), яка містить дані про навколишній світ у впорядкованому вигляді.

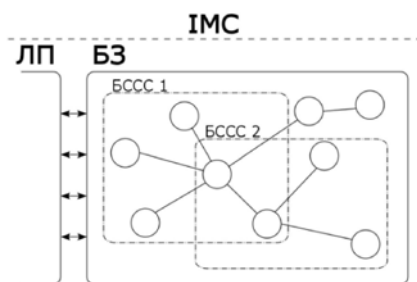


Рис. 1. Індивідуальна мовна система та її складові

Найменшою частиною (квантом знань) у моделі БЗ є БССС – структуроване представлення однієї ситуації зовнішнього світу, що існує в триєдності часу, простору та дії. Кожна така структура формується з елементів: об'єкти (*Obj*), суб'єкти (*Subj*) та дія (*Mov*), що доповнюються атрибутами *Attr* та мірою атрибута *Attr(Attr)* (рис. 2).

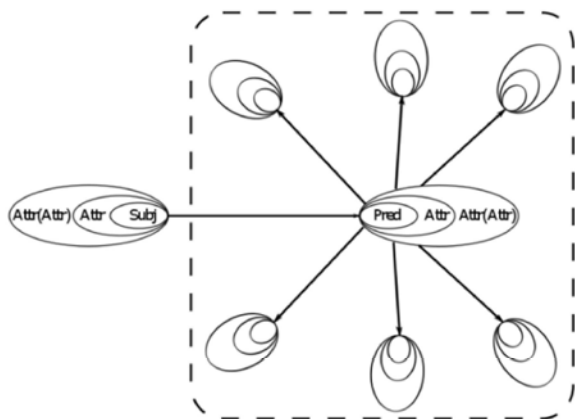


Рис. 2. Структура БССС

Структура БССС не суперечить канонам класичної лінгвістики; більш того, спираючись на досягнення досліджень нейрофізіологів, узагальнених Семіром Зекі [9], можемо засвідчити, що структура окремого повідомлення постає похідною від структурно-функціонального рівня нейроорганізації зорового тракту [2]. Головні етапи формування такої структури гарно простежуються в дослідженнях процесу опанування дитиною мовного ладу [1]. Головний висновок запро-

понованого бачення структурної організації мовного повідомлення досить чіткої та категоричній – довільний текст, як множина окремих повідомлень, формується з окремих стандартних структур, визначених на моно/поліпредикатному рівнях, отже, окремим квантом знань на мовному рівні постає базова семантико-синтаксична структура.

Таким чином, природно-мовна база знань (ІМБЗ) представлена відповідною частиною ІМС — БЗ, тобто сукупністю квантів знань (окремих БССС), пов'язаних між собою на семантичному рівні. Мережа БССС, у свою чергу, використовує мережу слів, що є текстовими ярликами об'єктів та процесів реального світу. Зазначимо також, що запропонована модель даних викликає цілком обгрунтовані асоціації зі способом збереження знань у нейромережі людини — нейронами (або їх ансамблями), пов'язаними системою асоціативних зв'язків.

Звісно, для повноцінного використання цієї моделі ІМС у пошукових системах необхідно за допомогою ЛП заповнити ІМБЗ з бази вхідних текстів. Така задача виглядає поки що досить складною, оскільки до реалізації ЛП ще далеко; утім, розробка повноцінного ЛП є окремою темою для дослідження. Для створення базового прототипу БЗ достатньо і досить простої емуляції ЛП. Наприклад, ЛП, здатний відокремлювати *Obj/Subj* та ідентифікувати *Attr*, дозволить частково виділити моделі БССС на як завгодно великому корпусі вхідних даних. Крім того, оскільки складові БССС добре розкладаються по майже незалежних рівнях, подальше вдосконалення моделі може бути виконано на основі вже заповненої бази, без спотворення або оновлення вже внесених даних.

Маючи уявлення про ІМС, ІМБЗ та БССС, можемо тепер приступити до розгляду конкретних проблем КПС — тих випадків, коли інтуїтивно правильний запит обробляється некоректно (не таким чином, як на нього реагував би живий співрозмовник). Задача полягає в тому, щоб визначити: по-перше, наскільки ці проблеми актуальні — наскільки якісно вони вирішуються на рівні КПС; по-друге, чи можливе їх вирішення засобами ІМБЗ.

4. Структура речення та слова

Природно-мовна інформація — це досить складний об'єкт дослідження; особливо сильно це впливає на задачі синтезу та аналізу природно-мовного повідомлення. Оскільки для пошуку необхідно проаналізувати запит користувача та порівняти його з інформацією у БЗ, проблеми виникають уже на найнижчих рівнях мовної організації – абзац, речення, слово. Хоча в основі ідеології КПС передбачена саме обробка ПМІ на структурному рівні, часто вони не можуть в достатній мірі адекватно розпізнати структуру запиту. Розглянемо це на прикладах.

Так, якщо у пошуковому запиті представлено словоформу, яка є омоформом (належить до різних слів з різним значенням — наприклад, «три» як чисель-

ник та «три» як форма дієслова «терти»), в ідеальному випадку повинна відбуватись однозначна ідентифікація і словоформи, і слова, до якого вона в даному випадку належить (рис. 3). У КПС взагалі відсутня можливість вказати форму слова у запиті, тобто інформація про частини мови може бути виділена (з певною ймовірністю) тільки за допомогою аналізу запиту. Якщо запит складається з кількох слів, результати пошуку так само можуть бути спотворені, навіть якщо запит – це повноцінна ПМ конструкція, частини якої пов'язані семантичними зв'язками.

У БЗ кожна словоформа входить у лексему — сукупність усіх можливих словоформ даного слова. Це дає змогу не тільки вказати, до якого саме слова відноситься дана словоформа у контексті запиту (і, відповідно, виконати пошук саме за цим словом), але й вказати її роль у реченні. Приклад подібної неоднозначності представлено на рис. 3. Звісно, так само можна й автоматично визначити роль слова, але це більше не є єдиним доступним способом. На класичному прикладі неоднозначності «души прекрасные порывы» визначити ролі слів можливо виключно в ручному режимі.

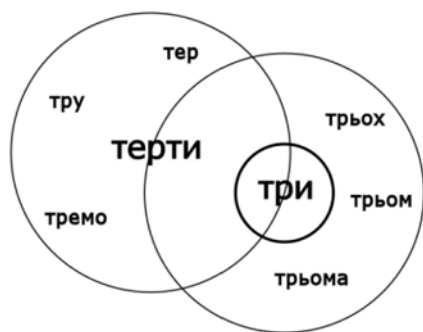


Рис. 3. Нерівнозначний перетин лексем на прикладі словоформи «терти»

Власне, пошукові запити, що складаються з кількох слів, варті окремого розгляду. Як правило, такі запити формують повноцінне ПМ повідомлення, а отже, при їх обробці мають значення не лише форми слів, але й їх порядок та знаки пунктуації. У КПС для цих цілей повсюдно використовується оператор «лапки», що відповідає пошуку за точним порядком слів, але при цьому ніяк не враховуються знаки пунктуації. Отримані таким чином результати, хоча й не є зовсім некоректними, містять велику кількість нерелевантних записів.

Розглянемо пошук за запитом «зробити згодом» (слова у запиті явно пов'язані). У результатах присутні не лише релевантний «Його успіх не тільки дозволив зробити згодом кілька тематичних продовжень», а й очевидно зайві: «Однак, ми заборонили це зробити. Згодом виявилось, ... » та «Що і як ми можемо для цього зробити — згодом». Як бачимо, тут ігноруються не тільки знаки пунктуації, але й сама структура

речення взагалі («... зробити. Згодом ...» — два слова з запиту явно належать до різних речень).

У ПМБЗ вхідний текст зберігається таким чином, що усі знаки пунктуації (а також інші елементи тексту, що не містять смислового навантаження — вставні слова, вигуки тощо) зберігаються у їх початковому вигляді. Більш того, розділені за змістом окремі речення трансформуються у окремі БССС, тобто помилки з належністю різних частин запиту до різних БССС взагалі ліквідуються.

Зазначимо, що Google повертає 830,000 документів, де зустрічаються обидва слова «зробити» та «згодом». Це, за мірками сучасних БЗ — порівняно мала кількість запитів, тобто для подальшого уточнення результатів пошуку вже не є критичною швидкодія аналізатора.

5. Смыслові (семантичні) зв'язки

Від структурних проблем, які вирішуються на рівні структури об'єкта, перейдемо до проблем семантики — більш складних випадків обробки ПМІ. Ці проблеми за своєю природою скоріше філософські, ніж технічні, але вони впливають на роботу пошукових систем в тій же — якщо не більшій — мірі. В широкому сенсі семантичні проблеми — це проблеми неточного відображення засобами природної мови відповідного явища або об'єкта реального світу. Більш формально, семантичні проблеми пошукових систем — це такі випадки, коли в запиті не міститься достатньо інформації для виконання якісного пошуку (тобто, для адекватної обробки запиту необхідно мати певний рівень базових знань). Власне, задача зводиться до вибору окремої БССС з усього лексично-семантичного оточення її складових, як це показано на рис. 4.

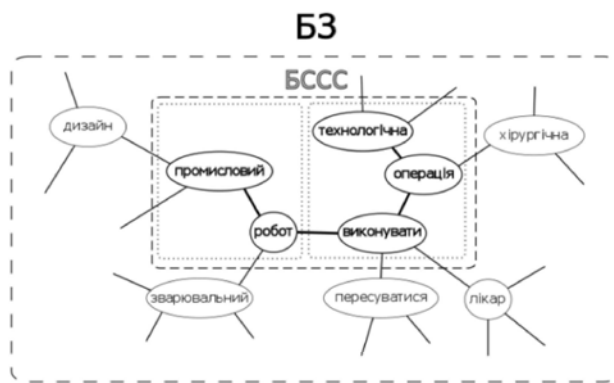


Рис. 4. Окрема БССС та семантичне оточення її складових

Першим за популярністю серед них є, безсумнівно, питання обробки синонімів — тобто такої ситуації, коли під час пошуку необхідно враховувати не лише саме слово, але й можливі варіанти його заміни (синоніми). Тут слід згадати розподіл синонімів на абсолютні (ті, які завжди мають подібні значення, як-то «обман» та «омана») та контекстні (ті, які мають

спільне значення тільки за певних умов або обмежень). З абсолютними синонімами КПС наразі працюють з використанням статистичних методів — хоча й не ідеально, але досить успішно. Робота ж з контекстними синонімами у КПС представлена слабо. Це пояснюється тим, що для коректної обробки контекстних синонімів треба спочатку коректно враховувати контекст, а питання виділення контексту у КПС фактично не реалізовано.

У ПМБЗ контекстні синоніми визначаються на рівні субструктури або структури — через подібність БССС. Іншими словами, можемо вважати слова контекстними синонімами, якщо вони з'являються в одній й тій самій ролі у одній й тій самій структурі. Такий підхід дозволяє досить точно підтвердити, що деякі слова є синонімами в даному контексті, або ж показати, що використання їх як синонімів за даних умов недопустимо. Також зазначимо, що такий підхід дозволяє використовувати нові, набуті значення слів — наприклад, сленг або усталені помилки. Так, суто сленгове слово «*гуглити*», що означає «шукати в пошуковій системі *Google*», або більш широко «шукати в інтернеті», використовувалося задовго до першої його появи у словниках. Оскільки сценарії його використання переважно збігаються з використанням «шукати» в контексті «шукати в інтернеті», у ПМБЗ ці слова були б контекстними синонімами. Водночас, результати зі словом «нишпорити», яке також є синонімом до «шукати», були б серед останніх, оскільки його сценарії використання значно відрізняються. Інший приклад наведено на рис. 5, хоча слова «йти» та «крокувати» є синонімами, заміна їх допустима лише в одному випадку з двох представлених.

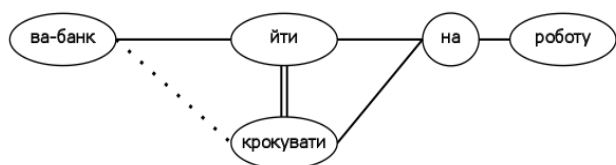


Рис. 5. Контекстна синонімія на прикладі слів «йти» та «крокувати»

Розкривши проблему синонімів, не можемо оминути й зворотній випадок — проблему багатозначних слів: одне й те ж саме слово, що може мати різні значення залежно від контексту. Зазначимо, що тут маються на увазі не тільки й не стільки омографи (різні словоформи різних слів, що мають однакове написання), а саме слова, які змінюють смислове навантаження залежно від контексту їх використання. Прикладом цього є слово «*поле*» — «електромагнітне поле» у фізиці, «засіяне поле» у сільському господарстві, «поле дослідження» в науці тощо.

Багато в чому ця ситуація подібна до аналізу запиту, що складається з кількох слів. Так само в результаті не враховується порядок та роль слів у реченні, але до цього додається ще й спотворення значення слова.

Дійсно, при пошуку за запитом «*поле дослідження*» отримуємо як релевантний результат «Понятійно-термінологічне *поле дослідження*», так і нерелевантний «Українські офісні працівники готові змінити роботу в офісі на город чи *поле — дослідження*». На даному прикладі ця проблема проявляється так само, як і при звичайному складному запиті — тільки у появі зайвих результатів. Але, на відміну від складного запиту, при семантичному спотворенні набагато складніше визначити, наскільки результат відповідає початковому задуму користувача — адже в багатьох випадках, особливо коли це стосується спеціалізованої термінології, різні значення слова можуть бути досить близькі за смисловим навантаженням.

Як було вказано вище, у ПМБЗ в такому випадку можемо визначити контекст або вручну, або за допомогою автоматичного аналізу запиту. Саме у випадку багатозначних слів дуже доречним виглядає використання такого потужного аспекту ПМІ як *когнітивний зворотній зв'язок*. Ідея його використання полягає у тому, що за оточенням слова передбачаються можливі варіанти закінчення запиту; таким чином, використання правильно побудованого запиту дозволяє істотно зменшити кількість релевантних результатів. Так, пошук за запитом «*король*» поверне дуже велику кількість результатів, тобто практично не буде корисним. Уточнення «*король Франції*» не тільки додасть до запиту новий елемент «*Франція*», але і визначить структурні (члени речення, частини мови) й навіть семантичні («*король*» як титул) зв'язки між ними. Уточнення «*король Франції у XIV сторіччі*» обмежить поле пошуку декількома сутностями (королями Франції з 1400 до 1500 років) і пов'язаними з ними результатами.

Ще раз окремо зазначимо, що обчислювальна складність кожного уточнення буде падати зі зростанням складності запиту, оскільки фактично від пошуку слова у БЗ фокус буде переходити до пошуку структури у ПМБЗ за повною відповідністю. Так, навіть на матеріалах пошуку у *Google* бачимо, що при переході від запиту «*поле*» (майже 90 000 000 результатів) через «*поле дослідження*» (близько 3 000 000 результатів) до «*поле наукового дослідження*» (1 000 000 результатів) — всього за 3 ітерації — кількість результатів зменшується майже на 2 порядки (у 90 разів).

В останню чергу розглянемо технічні проблеми КПС — тобто ті проблеми, які зумовлені не стільки складністю природної мови як об'єкта досліджень, скільки особливостями реалізації КПС у їх сучасному вигляді.

По-перше, ще раз підкреслимо характерний недолік усіх систем, що працюють з ключовими словами: недостатнє охоплення вхідних матеріалів. Очевидно, що при створенні індексу над документом пошукові роботи обробляють лише малий відсоток його змісту — це зумовлено самим визначенням індексу. Отже, велика частина вхідних даних просто ігнорується, в результаті чого при роботі з пошуковими системами

доводиться орієнтуватися саме на популярні ключові слова, а якість пошуку прямо залежить від якості алгоритму побудови індексу.

По-друге, КПС у більшості випадків повертають неймовірно велику кількість результатів, в той час як доля релевантних серед них дуже мала. Як правило, запит загального характеру повертає мільйони результатів, спеціалізований запит – тисячі, а більша частина релевантних знаходиться на перших 10..20 сторінках (еквівалент 100-200 позицій), і навіть з них лише 10-15% дійсно дають відповідь на запит.

Цю проблему частково вирішує уточнення запиту, але, як правило, ця операція використовується досить рідко — адже при уточненні кожного разу втрачається певна частина значущої інформації, і ця втрата є мультиплікативною. Іншими словами, користувачі намагаються змінити формулювання свого запиту замість використання функції пошуку у знайденому.

І, нарешті, знову повернемося до використання ключових слів. Хоча сама по собі ця технологія не є чимось поганим, її повсюдне використання у текстовому пошуку призвело до вкрай негативних наслідків. Замість адаптації пошукових систем до природно-мовних запитів користувача бачимо адаптацію користувачів до запропонованої мови введення запитів; замість покращення рейтингу документа шляхом розміщення нової або актуальної інформації бачимо «накрутку» штучних показників пошукових систем; замість використання потужної мови пошукових запитів бачимо спроби через довгі ланцюжки посередників вийти до першоджерела шуканих даних [4]. Хоча пошуком у такому вигляді цілком можливо користуватись, питання про його якість та оптимальність, кажучи обережно, залишається відкритим.

6. Висновки

Незважаючи на те, що тематика текстового пошуку у великих базах природно-мовних даних (однією з яких є мережа Інтернет) вже багато років є популярним напрямком досліджень, якість відповідних систем залишається не дуже задовільною. Більшість класичних пошукових систем, так само як і найбільш популярні бази структурованої природно-мовної інформації, досі мають істотні недоліки як на рівні архітектури, так і на рівні реалізації.

Використання запропонованого Л. Щербою підходу з чіткою ідентифікацією функціонального навантаження ІМС через складові ЛП/ПМБЗ з формально визначеною структурною організацією кванта знань – БССС дозволяє вже на етапі моделювання вирішити деякі проблеми класичних пошукових систем. Хоча цей підхід все ще потребує як більш детального теоретичного вивчення, так і експериментальної перевірки, видається очевидним, що спроби надалі покращувати тільки кількісні показники роботи пошукових систем вичерпали свій потенціал, і поява докорінно нових підходів у цій галузі – це лише питання часу.

Наразі неможливо сказати, наскільки якісно практична реалізація ІМС буде вирішувати усі освітлені у даній статті проблеми, але вже можемо впевнено стверджувати, що використання навіть окремих її елементів у пошукових системах може позитивно вплинути на якість їх роботи, а сама модель ІМС є досить цікавим і перспективним полем для подальших досліджень.

Література: 1. *Гвоздев А.Н.* От первых слов до первого класса / Александр Гвоздев. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1981. 2. *Кисленко Ю.І.* Архітектура мови (лінгвістичне забезпечення інтелектуальних інтегрованих систем) : Учбовий посібник. К.: Віпол, 1998. 343 с. 3. *Щерба Л.В.* Языковая система и речевая деятельность. Л.: Наука, 1974. 4. *Hulscher C.* Web search behavior of Internet experts and newbies / C. Hulscher, G. Strube. // Computer Networks. 2000. №33. P. 337–346. 5. *Hsinchun C.* Internet Categorization and Search: A Self-Organizing Approach / C. Hsinchun, C. Schuffels, R. Orwig // Journal of Visual Communication and Image Representation, Special Issue on Digital Libraries. 1996. №7. P. 88–102. 6. *Kyslenko Y.* Cognitive architecture of speech activity and modelling thereof / Y. Kyslenko, D. Sergeiev // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2015. №12. P. 134–143. 7. *Kruse P.* Clever Search: A WordNet Based Wrapper for Internet Search Engines / P.Kruse, A. Naujoks, M. Kunze, D. Roesner // Proceedings of 2nd GermaNet Workshop 2005. 2005. 8. *Tirri H.* Search in vain, challenges for Internet search / Tirri. // Computer. 2003. №36. P. 115–116. 9. *Zeki S.* A visual image in mind and brain: Collection of papers / Semir Zeki. // The World of Science. 1992. №11. P. 33–41. 10. Google Knowledge Graph [Електронний ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia. 2012. Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Knowledge_Graph.

Кисленко Юрій Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри технічної кібернетики ФІОТ НТУУ «КПІ». Наукові інтереси: сенсорика біологічних та технічних систем, робототехніка, штучний інтелект, інформаційні природно-мовні технології. Адреса: Україна, 03187, Київ, вул. Теремківська, 11, кв 13. Тел. +38(097)522-35-22, email: y.i.kislenko@gmail.com

Сергєєв Данило Сергійович, аспірант кафедри технічної кібернетики ФІОТ НТУУ «КПІ». Наукові інтереси: інформаційні природно-мовні технології, бази знань, об'єктно-орієнтовані бази даних. Адреса: Україна, 02192, Київ, вул. Космічна, 12, кв. 16. Тел. +38(095)402-97-40, email: d.sergeiev@gmail.com

Kyslenko Yuri Ivanovich, Ph.D., associate professor at the Department of Technical Cybernetics, FICT NTUU «KPI». Research interests: sensorics of biological and technical systems, robotics, artificial intelligence, natural language information technology. Address: Ukraine, 03187, Kiev, Teremkovskaya str. 11, apt. 13, tel. +38(097)522-35-22, email: y.i.kislenko@gmail.com

Sergeiev Danylo Sergiyovich, postgraduate student at the Department of Technical Cybernetics, FICT NTUU «KPI». Research interests: natural language information technology, knowledge bases, object-oriented databases. Address: Ukraine, 02192, Kiev, Kosmichnastr. 12 apt. 16. tel. +38(095)402-97-40, email: d.sergeiev@gmail.com

ВПЛИВ ТУРБУЛЕНТНОГО ОТОЧЕННЯ НА ПРОЕКТ РЕДЕВЕЛОПМЕНТА

ВЕНГРИНА О.С., ДОЛГОВА Н.Г.

Досліджуються чинники дальнього та ближнього оточення проекту редевелопмента. Розглядається вплив турбулентності на успіх проекту та визначаються основні показники турбулентності: ступінь дії сили і відносна тривалість впливу турбулентності. Будується модель взаємовпливу оточення в процесі взаємодії з проектом, яка дозволяє імітувати ситуації виникнення турбулентності в оточенні проекту редевелопмента.

Ключові слова: проект редевелопмента, оточення проекту, турбулентність оточення, графова модель.

Key words: redevelopment, project's environment, environment's turbulence, graph model.

Вступ

Генеральне планування розвитку міських територій, яке необхідне для підвищення ефективності використання земельних ресурсів, в даний час здійснюється шляхом реалізації масштабних проектів редевелопмента.

Укрупнення проектів та динамічні зміни зовнішнього оточення, починаючи з передінвестиційної стадії реалізації проектів, створюють додаткові фактори невизначеності, що набуває в цілому форму турбулентності.

При управлінні проектами редевелопмента зі змінами в оточенні проекту в кожен момент часу можна спостерігати явище турбулентності в матеріальних, фінансових, людських, нематеріальних та інформаційних потоках ресурсів самого проекту.

На сьогоднішній день визначення ступеня впливу турбулентності є актуальним, оскільки зміни в потоках можуть призвести до непередбачуваних результатів, від зниження показників економічної ефективності до припинення реалізації проекту.

Розвиваючи визначення [1], під проектом редевелопмента будемо розуміти складну економіко-технічну систему, яка передбачає якісне і / або кількісне змінення параметрів деякого існуючого об'єкта нерухомості та зміну значень характеристик елементів оточення проекту в задані терміни з метою найбільш ефективного його використання, в результаті чого виробляється новий товар з більшою ринковою вартістю.

Визначення характеру оточення проекту редевелопмента має велике значення, тому що, по-перше, ідея проекту народжується під впливом значення параметрів його оточення, по-друге, вже на початковому етапі реалізації проекту параметри чинників оточення також змінюються.

При реалізації проекту редевелопмента відбувається трансформація економічного, соціального, фінансового та іншого оточення, в якому реалізується проект. Таке оточення проекту пов'язане з постійними змінами, що носять динамічний, слабопрогнозований, тобто турбулентний характер.

В роботі [2] С.Д. Бушуєв адаптував поняття «турбулентність» в теорії управління проектами. На його думку, турбулентність в управлінні проектами – це явище, яке спостерігається, в основному, в оточенні проектів.

На відміну від інвестиційно-будівельних проектів та проектів девелопмента об'єкт проекту редевелопмента на момент його ініціації існує, відповідно створює своє оточення, яке в свою чергу взаємодіє з зовнішнім оточенням.

Для визначення впливу кожного елемента зовнішнього оточення виникає необхідність скористатися підходом [2] та побудувати графову модель взаємовпливу оточення в процесі взаємодії з проектом редевелопмента.

Таким чином, метою даного дослідження є побудова графової моделі в задачі визначення впливу дальнього та ближнього оточення на проект редевелопмента.

1. Аналіз попередніх досліджень

Теорія управління проектами активно розвивається українськими та зарубіжними вченими [2, 4-9, 12]. Підвищенню ефективності управління проектами в різних сферах сприяє впровадження нових моделей і методів, які базуються на законах проектного менеджменту. На результат проекту впливає система, яка складається з команди проекту та його турбулентного оточення [4, 8, 9].

Застосування підходу моделювання взаємовпливу оточення проекту в процесі взаємодії з проектом, що використовується для імітації ситуацій виявлення турбулентності в проектах, розглянуто в роботі [2].

Модель гармонізації цінностей програм розвитку організацій в умовах турбулентного оточення та процесу, що формують систему управління цінністю в розвитку організацій, представлено в роботі [7].

Основні джерела турбулентності, з урахуванням властивостей зовнішнього і внутрішнього оточення лізингових проектів, і ступінь їх впливу на процеси управління проектами даного класу розглянуті в [10].

Механізм управління фінансовим ресурсом програми розвитку територіальної системи техногенної безпеки в умовах турбулентного оточення представлено в роботі [3].

Класифікація турбуленцій в системах управління розвитком фінансового сектора та модель оцінок впливу турбуленцій на систему в очікуванні другої хвилі світової кризи запропонована в [5, 6].

В роботі [11] отримала розвиток раніше розроблена математична модель процесу ідентифікації конфігурації проекту шляхом врахування чинника турбулентності проектного оточення, для чого був застосований метод динамічного програмування. Зроблено висновки про практичне застосування цієї моделі для стабільних по своїй конфігурації проектів.

У попередніх публікаціях запропоновано математичні моделі та методи, які дозволяють описати і визначити ступінь впливу різних джерел турбулентності в проектах фінансового сектора та соціальних проектів, але питання впливу турбулентного оточення в галузі будівництва залишається не розкритим. Проект редевелопмента є економіко-технічною системою, яка з моменту ініціації до завершення інтерпретована в складні територіальні системи вищого порядку: містобудівна, інвестиційна, бюджетна та інші. Для проектів редевелопмента характерна велика кількість джерел турбулентності. Визначення ступеня і сили їх впливу є важливим і актуальним напрямком дослідження.

2. Виклад основного матеріалу

Причини виникнення турбулентності проекту редевелопмента:

- зміна політичної ситуації;
- зміни в законодавстві;
- зміна економічної ситуації;
- зміни в суспільстві та ін.

Всі проекти реалізуються в оточенні, включаючи і проект редевелопмента. Оточення має вплив на проект за різними складовими дальнього та ближнього оточення (рис. 1). Під оточенням проекту редевелопмента будемо розуміти такі елементи оточення, що породжують сукупність сил дальнього та ближнього оточення, які сприяють чи заважають досягненню успіху проекту.



Рис.1. Дальнє і ближнє оточення проектів редевелопмента

Оцінка впливу турбулентності дальнього та ближнього оточення в проектах редевелопмента відбувається

найчастіше на основі управління очікуваннями зацікавлених сторін та моделювання поведінки оточення, його проблем та викликів. Враховуючи, що зацікавлені сторони та оточення мають різноманітні цілі, аналіз впливу виконати інколи неможливо. Але якщо провести сегментацію зацікавлених сторін і формалізувати оточення та виявити джерело впливу, то можна побудувати відповідну модель.

Вплив кожного з елементів оточення було оцінено чисельно і представлено в табл. 1.

Таблиця 1
Вплив зовнішнього оточення на проект редевелопмента (ступінь дії сили турбулентності (Fs))

№	Букв. позн.	Джерела турбулентності	Ступінь дії сили турбулентності (Fs)
1	2	3	4
Дальнє оточення			
1	P	Політика	0,74
2	Ec	Економіка	0,90
3	S	Суспільство	0,34
4	L	Закони та право	0,74
5	NiT	Наука і техніка	0,50
6	Cult	Культура	0,12
7	NiE	Природа та екологія	0,24
8	U	Містобудівельна політика	0,74
Ближнє оточення			
9	M	Ринок нерухомості	0,90
10	G	Генплан району забудови	0,14
11	R	Конкуренція	0,42
12	C	Підрядники	0,50
13	E	Інженерні мережі та споруди	0,12
14	PM	Команда проекту	0,80

Вплив турбулентних збурень на проект залежить від таких показників [2]: сила турбулентності – це міра дії вихору турбулентності, який викликає зміну стану характеристик успіху проекту або його деформацію; відносна тривалість турбулентності – період дії явища турбулентності по відношенню до життєвого циклу проекту (фази), який змінюється залежно від умов оточення.

Проект редевелопмента є динамічною системою. Зазначені елементи динамічної системи, тобто складові ближнього та дальнього оточення, що впливають на проект, змінюються в часі і просторі. Процеси, що відбуваються в такій системі, виявляються подібними до явища турбулентності. Для визначення наслідків впливу турбулентних збурень на проект редевелопмента скористаємося підходом, прийнятим в [2, 10]. Отже, згідно з [2], основними показниками турбулентності є сила турбулентності (Fs), що визначає ступінь впливу оточення на успіх проекту, і відносна тривалість впливу турбулентності (Ft).

Для визначення, яке з джерел турбулентності є більш критичним для проекту редевелопмента, необхідно визначити коефіцієнт впливу всіх факторів оточення на проект в умовах турбулентності. Згідно з [2, 10] коефіцієнт впливу характеризує відношення величини сили і відносної тривалості турбулентності, які є безрозмірними величинами.

На основі експертної оцінки ступінь дії сили та тривалості турбулентності [2] для кожного з джерел турбулентних збурень відображається у вигляді функції приналежності нечітких множин (табл. 2-4).

Таблиця 2

Вплив зовнішнього оточення на проект редевелопмента (відносна тривалість турбулентності, Ft)

№	Букв. позн.	Джерела турбулентності	Відносна тривалість турбулентності (Ft)
1	2	3	4
Дальнє оточення			
1	P	Політика	0,9
2	Ec	Економіка	1,0
3	S	Суспільство	0,8
4	L	Закони та право	0,9
5	NiT	Наука і техніка	1,0
6	Cult	Культура	0,5
7	NiE	Природа та екологія	0,7
8	U	Містобудівельна політика	0,9
Ближнє оточення			
9	M	Ринок нерухомості	1,0
10	G	Генплан району забудови	0,5
11	R	Конкуренція	0,9
12	C	Підрядники	1,0
13	E	Інженерні мережі та споруди	0,5
14	PM	Команда проекту	1,0

За отриманими даними побудовано пелюсткову діаграму (рис. 2).

В результаті проведених досліджень, використовуючи виділені зони впливу [2], можна зробити висновок, що в критичній зоні (0,7-0,8) по відношенню до успіху проекту редевелопмента знаходяться такі складові оточення: «Команда проекту», «Містобудівна політика», «Політика», «Закони та право». Найбільший вплив турбулентності знаходиться в закритичній зоні (0,9-1) – «Економіка», «Ринок нерухомості», а такі елементи як: «Суспільство», «Наука і техніка», «Конкуренція», «Підрядники» знаходяться у докритичній зоні (0,3-0,6). Найменший вплив надають складові оточення, які потрапили до зони нечутливості (0-0,2): «Природа та екологія», «Культура», «Генплан району забудови», «Інженерні мережі та споруди».

Таблиця 3

Вплив зовнішнього оточення на проект редевелопмента (коефіцієнт впливу (β))

№	Букв. позн.	Джерела турбулентності	Коефіцієнт впливу (β)
1	2	3	4
Дальнє оточення			
1	P	Політика	0,9
2	Ec	Економіка	0,3
3	S	Суспільство	0,7
4	L	Закони та право	0,5
5	NiT	Наука і техніка	0,1
6	Cult	Культура	0,2
7	NiE	Природа та екологія	0,7
8	U	Містобудівельна політика	0,7
Ближнє оточення			
9	M	Ринок нерухомості	0,9
10	G	Генплан району забудови	0,1
11	R	Конкуренція	0,4
12	C	Підрядники	0,5
13	E	Інженерні мережі та споруди	0,1
14	PM	Команда проекту	0,8

Таблиця 4

Система оцінки коефіцієнта впливу турбулентності

Значення шкали	Опис значення
0,0	Турбулентність не впливає
0,1	Низший ступінь турбулентності
0,2	Низький ступінь турбулентності
0,3	Ступінь впливу турбулентності нижче середнього
0,4	Середня стійкість до турбулентності
0,5	Вище середнього ступеня впливу турбулентності
0,6	Менш високий ступінь турбулентності
0,7	Високий ступінь турбулентності
0,8	Більш високий ступінь турбулентності
0,9	Дуже високий ступінь турбулентності
1,0	Найвищий ступінь турбулентності

Після визначення складових оточення проекту редевелопмента була побудована матриця впливу зовнішнього оточення на успіх проекту, в якій відображається нормування впливу кожного з елементів оточення, починаючи від 0 (вплив не проявляється) і до 1 (вплив максимальний).

Використовуючи підхід [2], побудуємо графову модель взаємовпливу елементів оточення в процесі взаємодії з проектом редевелопмента.

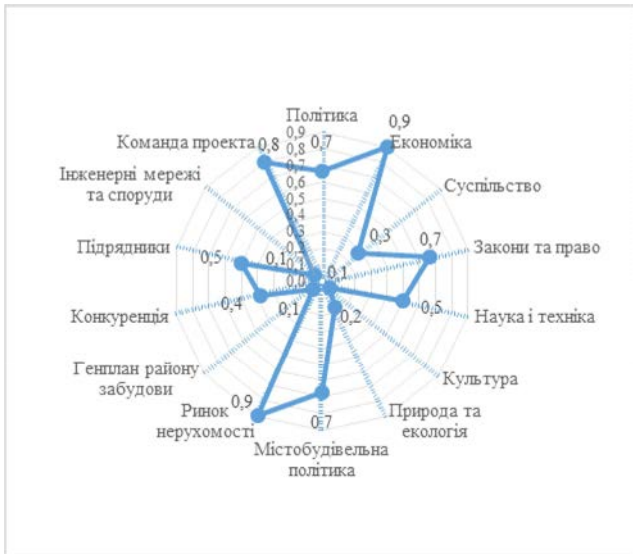


Рис. 2. Вплив оточення на проект редевелопмента

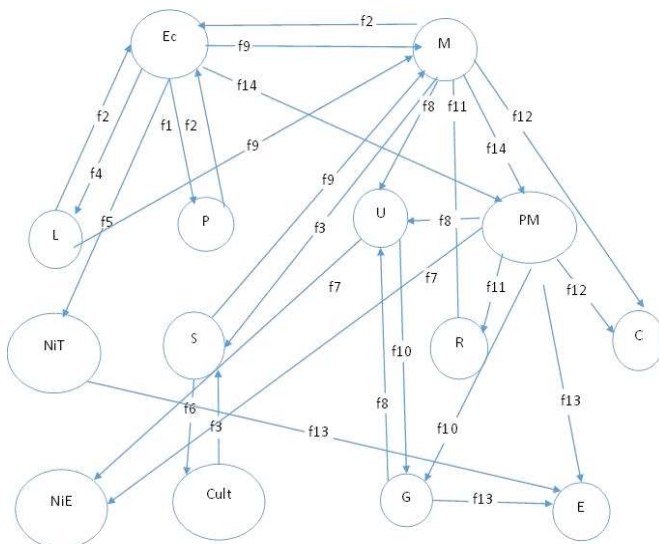


Рис. 3. Модель взаємовпливу оточення в процесі взаємодії з проектом редевелопмента

Дана модель є орієнтований граф (рис. 3), де вузли графа – це елементи оточення проекту P, Ec, S, L, NiT, Cult, NiE, U, M, G, R, C, E, PM (див. буквене позначення, табл. 1), функціональні зв'язки – це вирази: $P = f_1(Ec)$, $Ec = f_2(P, L, M)$, $S = f_3(M, Cult)$, $L = f_4(Ec)$, $NiT = f_5(Ec)$, $Cult = f_6(S)$, $NiE = f_7(PM, U)$, $U = f_8(M, PM, G)$, $M = f_9(S, L, Ec)$, $G = f_{10}(PM, U)$, $R = f_{11}(M, PM)$, $C = f_{12}(M, PM)$, $E = f_{13}(PM, NiT, G)$, $PM = f_{14}(M, Ec)$.

Таким чином, інтегрований вплив дальнього та ближнього оточення на проект представлений моделлю:

$$Y = \langle P, Ec, S, L, NiT, Cult, NiE, U, M, G, R, C, E, PM \rangle,$$

а структура системи – $\langle f_1, f_2, f_3 \dots f_{14} \rangle$. Модель дозволяє визначити ступені взаємовпливу складових зовнішнього оточення у процесі здійснення проекту редевелопмента.

3. Висновки

Виділено основні елементи оточення проекту та розглянуто реалізацію проекту редевелопмента в турбулентному оточенні на основі проектного підходу. Даний підхід дозволив визначити та оцінити численно вплив елементів оточення та побудувати графову модель взаємовпливу оточення в процесі взаємодії з проектом редевелопмента.

В подальшому слід розрахувати сумарний вплив елементів оточення на певний вузол графа та потенціал протидії впливу оточення.

Література: 1. *Бондаренко Е.С.* Проект редевелопмента: форми продукта, особливості етапів життєвого цикла / Е.С. Бондаренко, М.В. Новожилова // Коммунальное хозяйство городов. 2014. Вып. 116. С. 12-16. 2. *Бушуев С.Д., Бушуева Н.С., Бабаев И.А.* Креативные технологи управления проектами и программами: Монография. К.: «Саммит-Книга», 2010. 768 с. 3. *Новожилова М.В.* Управление финансовым ресурсом программы развития системы техногенной безопасности в условиях турбулентного оточення / М.В. Новожилова, В.М. Попов // Коммунальное хозяйство городов. 2015. Вып. 123. С. 31-36. 4. *Гогунский В.Д.* Обоснование закона о конкурентных свойствах проектов / В.Д. Гогунский, С.В. Руденко, П.А. Тесленко // Управление развитием складных систем. 2011. №8. С.13-15. 5. *Бушуева Н.С.* Проактивные управления программами развития финансовых учреждений в условиях турбулентного оточення / Н.С. Бушуева, Р.Ф. Ярошенко, Т.О. Ярошенко // Управление развитием складных систем. 2011. №7. С.16-19. 6. *Ярошенко Р.Ф.* Турбулентность в управлении программами развития финансовых учреждений / Р.Ф. Ярошенко, Т.О. Ярошенко // Управление развитием складных систем. 2011. №7. С.73-75. 7. *Бушуев С.Д.* Модель гармонизации ценностей программ развития организаций в условиях турбулентности окружения / С.Д. Бушуев, Н.С. Бушуева, Р.Ф. Ярошенко // Управление развитием складных систем. 2012. №10. С.9-13. 8. *Колесникова К.В.* Развитие теории проектного управления: обоснования закона К.В. Кошкина щодо завершения проектов / К.В. Колесникова // Управление развитием складных систем. 2013. № 16. С. 38-45. 9. *Колесникова К.В.* Развитие теории проектного управления: обоснования закона инициации проектов / К.В. Колесникова // Управление развитием складных систем. 2014. № 17. С. 24-31. 10. *Бондарь А.В.* Турбулентное окружение лизинговых проектов / А.В. Бондарь // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 1/7(49). С.6-8. 11. *Рудницкий С.И.* Математическая модель процесса идентификации конфигурации проекта в турбулентном окружении / С.И. Рудницкий // Вісник НТУ «ХП». 2015. №1(1110). С.172-178. 12. *Асаул А.Н.* Экономика не-

двизимости / А.Н. Асаул, С.Н. Иванов, М.К. Старовойтов. СПб.: ИПЭВ, 2009. 304 с.

Надійшла до редколегії 22.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Тимофеев В.О.

Венгріна Олена Сергіївна, асистент кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Наукові інтереси: управління проектами у будівництві. Адреса: Україна, 61000, Харків, вул. Сумська, 40, тел.: (057) 706-20-49.

Долгова Наталя Геннадіївна, канд.техн.наук, доцент кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій Харківського національного університету будів-

ництва та архітектури. Наукові інтереси: управління проектами, багатокритеріальна оптимізація. Адреса: Україна, 61000, Харків, вул. Сумська, 40, тел.: (057) 706-20-49.

Elena Vengrina, assistant of the Department of Economic Cybernetics and Information Technologies Kharkov National University of Construction and Architecture. Scientific interests: project's management in the construction. Address: Ukraine, 61001, Kharkiv, Sumskaia street, 40, Tel.: (057) 706-20-49.

Natalya Dolgova, Candidate of Technical Sciences Associate Professor of the Department of Economic Cybernetics and Information Technologies Kharkov National University of Construction and Architecture. Scientific interests: project's management, multicriteria optimization. Address: Ukraine, 61001, Kharkiv, Sumskaia street, 40, Tel.: (057) 706-20-49.

МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕБОРА ДЛЯ РЕИНЖИНИРИНГА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР СИСТЕМ КРУПНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА

БЕСКОРОВАЙНЫЙ В.В., ПОДОЛЯКА К.Е.

Предлагаются модификации метода решения задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга, использующие схемы направленного перебора вариантов по количеству узлов в системе. По результатам экспериментальных исследований получены оценки точности и временной сложности предложенных модификаций метода для решения задачи по критерию минимума затрат.

Ключевые слова: система крупномасштабного мониторинга, структура, топология, реинжиниринг, оптимизация, направленный перебор.

Key words: Large-scale monitoring system, structure, topology, reengineering, optimization, directed search.

Введение

Реинжиниринг систем крупномасштабного мониторинга (СКММ) предполагает решение множества комбинаторных задач структурной, топологической, параметрической и технологической оптимизации [1]. С учетом того, что мощности множеств допустимых технологий функционирования, параметров элементов и связей СКММ незначительны, основную трудность составляют задачи оптимизации их топологических структур. Для их решения используются точные (комбинаторные) и приближенные (в том числе эвристические) методы [2, 3]. Точные методы позволяют гарантированно найти оптимальное решение, однако, ввиду NP-сложности задач, они применимы только для оптимизации простейших систем с небольшим количеством элементов.

Среди приближенных методов, используемых для решения задач топологической оптимизации по критерию минимума затрат, широко распространены методы эволюционного синтеза, основанные на применении генетических алгоритмов (ГА) [4 – 7], и методы, использующие идеи покоординатной оптимизации [8, 9].

Анализ методов локального поиска для решения задач топологической оптимизации представлен в работах [10 – 12].

Для снижения временной сложности и повышения точности приближенных методов структурно-топологической оптимизации применяют:

– предварительное определение множества элементов, на базе которых целесообразно создавать узлы

(анализ матрицы ближайших соседей, анализ минимального стягивающего дерева, анализ стягивающего дерева, связывающего элементы с центром) системы [13 – 15];

– предварительную оценку оптимального количества узлов системы [3, 16, 17];

– предварительную кластеризацию элементов существующей системы или объектов мониторинга (k-means, c-means, k-means++) [18 – 20];

– перезапуск алгоритмов с множеством различных начальных размещений элементов и (или) узлов системы (процедура Multi-start) [21];

– метаэвристики, предполагающие улучшение решения путем временного отхода к худшему варианту, что позволяет выходить из локального оптимума [22, 23].

При этом задачи размещения узлов СКММ решаются по различным критериям, с использованием различных целевых функций, в условиях различной размерности и степени определенности исходных данных, временных и ресурсных ограничений. Это требует разработки множества методов решения задач реинжиниринга топологических структур СКММ, различающихся по показателям точности и сложности и имеющих меньшую временную сложность, чем комбинаторные методы, и большую точность, чем существующие приближенные методы.

Целью работы является модификация метода направленного перебора [24] для снижения временной сложности решения задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых СКММ.

1. Постановка и математическая модель задачи

Задача реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга с радиально-узловой структурой рассматривается в следующей постановке [25]. Задано:

– множество элементов системы $I = \{i\}$, $i = \overline{1, n}$, покрывающих все множество объектов мониторинга;

– существующий вариант топологической структуры системы $a \in S$ (где S – множество допустимых вариантов), задаваемый местами расположения элементов

$I = \{i\}$, $i = \overline{1, n}$, узлов (размещаются на базе элементов), центра (без потери общности будем считать, что он расположен на базе элемента $i = 1$), а также связи между элементами, узлами и центром $x' = [x'_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$ (x'_{ij} – булева переменная, $x'_{ij} = 1$, если между элементами i и j существует непосредственная связь; $x'_{ij} = 0$ – в противном случае);

– затраты на эксплуатацию (созданные или приведенные) центра, элементов, узлов $[c_i]$, $i = \overline{1, n}$ и связей $[c_{ij}]$, $i = \overline{1, n}$.

Необходимо определить наилучший $s^0 \in S$ по показателю затрат $k_1(a, s)$ вариант реинжиниринга топологической структуры СКММ с учетом заданных ограничений на показатели оперативности (времени получения информации) $k_2(s) \leq k_2^*$, надежности $k_3(s) \geq k_3^*$ и живучести $k_4(s) \geq k_4^*$.

Множество допустимых решений задачи определяется условиями:

$$S = \{s\} = \left\{ \begin{array}{l} x = [x_{ij}], \quad x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad x_{11} = 1; \\ \sum_{j=i}^n x_{ij} \geq 1, \quad \forall j = \overline{1, n}; \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n x_{ij} = n + \sum_{i=1}^n x_{ii}; \\ x_{ii} = 1 \rightarrow x_{i1} = 1 \quad \forall i = \overline{1, n}; \\ x_{ii} = 1 \wedge x_{ij} = 1 \rightarrow ij = \arg \min_{1 \leq i' \leq n} c_{i'j} \quad \forall i, j = \overline{1, n}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где S – множество допустимых вариантов; s – вариант топологической структуры; $x = [x_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$ – матрица связей (x_{ij} – булева переменная, $x_{ij} = 1$, если между элементами i и j существует непосредственная связь; $x_{ij} = 0$ – в противном случае; $x_{ii} = 1$, если на базе элемента i размещается узел системы, $x_{ii} = 0$ – в противном случае $i = \overline{1, n}$); n – количество элементов системы; c_{ij} , $i', j = \overline{1, n}$ – стоимость связи между элементами i' и j .

В качестве критерия используется показатель минимума затрат на реинжиниринг [25]:

$$k_1(a, s) = \Delta C = \sum_{i=1}^n [c_i(1 - x'_{ii}) x_{ii} + d_i x'_{ii} x_{ii} + e_i(1 - x_{ii}) x'_{ii} - g_i(1 - x_{ii}) x'_{ii}] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n [c_{ij}(1 - x'_{ij}) x_{ij} + d_{ij} x'_{ij} x_{ij} + e_{ij}(1 - x_{ij}) x'_{ij} - g_{ij}(1 - x_{ij}) x'_{ij}] \rightarrow \min_{s \in S} \quad (2)$$

здесь a – существующий вариант топологической структуры системы, $a \in S$; S – множество допустимых вариантов топологических структур СКММ; c_i – затраты на создание элементов, узлов и центра в новой структуре, $i = \overline{1, n}$; x'_{ij} и x_{ij} – соответственно элементы матриц смежности (связей) между элементами, узлами и центром в существующей $x' = [x'_{ij}]$ и структуре после реинжиниринга $x = [x_{ij}]$ ($x'_{ij} = 1$ или $x_{ij} = 1$, если между элементами i и j существует непосредственная связь; $x'_{ij} = 0$ или $x_{ij} = 0$ – в противном случае); d_i – затраты на модернизацию элемента, узла или центра в новой структуре $i = \overline{1, n}$; e_i

– затраты на демонтаж узлов существующей структуры $i = \overline{1, n}$; g_i – стоимость ресурсов, которые могут быть повторно использованы (или реализованы) после демонтажа оборудования узлов $i = \overline{1, n}$; c_{ij} , e_{ij} , d_{ij} и g_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$ – соответственно стоимость связи, затраты на демонтаж, стоимость модернизации и стоимость ресурсов, которые могут быть повторно использованы для связи между элементами i и j .

Предполагается, что затраты на модернизацию, демонтаж и стоимость повторно использованных ресурсов не превышают затрат на создание новых элементов, узлов, центра и связей между ними:

$$\begin{array}{l} e_i \leq c_i, \quad d_i \leq c_i, \quad g_i \leq c_i, \quad i = \overline{1, n}; \\ e_{ij} \leq c_{ij}, \quad d_{ij} \leq c_{ij}, \quad g_{ij} \leq c_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}. \end{array} \quad (3)$$

Если в результате реинжиниринга образуется топологическая структура, не содержащая узлов и связей ранее существовавшей системы, она потребует максимальных дополнительных затрат ΔC_{\max} . Такая топологическая структура может быть получена путем решения традиционной задачи проектирования. В этом случае функция затрат от количества узлов является унимодальной [24].

В случае реинжиниринга функция затрат от количества узлов может быть многоэкстремальной. Анализ компонентов $k_1(a, s)$ показал, что основные затраты обусловлены затратами на создание и модернизацию связей между элементами системы. Изменение количества узлов в системе, введение дополнительных ограничений приводит к изменению топологической структуры, соответственно, добавлению новых и удалению существующих связей. При этом в процессе реинжиниринга возможны ситуации, когда с изменением количества узлов на каждом шаге используются различные части существующей топологической структуры, что приводит к появлению локальных экстремумов на интервале определения функции $\Delta C(u)$.

Таким образом, для решения задачи реинжиниринга топологических структур СКММ необходимо применение методов, позволяющих получить эффективные решения с учетом многоэкстремальности функции $\Delta C(u)$ (2) в зависимости от количества узлов в системе $1 \leq u \leq n$.

2. Методы решения задачи

Предположим, что для всех анализируемых вариантов топологических структур выполняются ограничения по оперативности $k_2(s) \leq k_2^*$, надежности $k_3(s) \geq k_3^*$ и живучести $k_4(s) \geq k_4^*$.

С учетом многоэкстремальности функции (2) от количества узлов в системе $k_1(u)$ для поиска глобального оптимального решения задачи предлагается исполь-

зовать идею метода, описанного в [24]. Суть ее состоит в определении отрезка $[u_{\min}, u_{\max}]$, который гарантированно содержит оптимальное решение.

В качестве нижней границы количества узлов в системе выберем $u_{\min} = 1$. Для определения верхней границы u_{\max} необходимо найти минимум максимальных дополнительных затрат ΔC_{\max} . С этой целью требуется решить задачу синтеза оптимальной топологии сети (без учета существующей топологии).

Оптимальное решение задачи будем искать на отрезке $[1, u_{\max}]$, изменяя количество узлов в системе по правилу $u := u + 1$.

Таким образом, для решения задачи предложенным методом необходимо решение двух подзадач поиска минимума максимальных дополнительных затрат ΔC_{\max} и поиск минимума функции дополнительных затрат на реинжиниринг. Каждая задача сравнима по сложности с классической задачей структурно-топологического синтеза. С учетом этого временная сложность предлагаемой модификации базового метода имеет порядок $2 \cdot O[t(n)]$, где $t(n)$ – временная сложность метода решения задачи структурно-топологического синтеза.

Точность предложенной модификации базового метода определяется точностью методов решения задач определения количества узлов u и мест их размещения. Общее количество возможных вариантов топологических структур при реинжиниринге СКММ для $1 \leq u \leq n$ составляет:

$$N(n) = \sum_{u=1}^n C_n^u = \sum_{m=1}^n \frac{n!}{u!(n-u)!} = 2^n, \quad (4)$$

где n – количество мест возможного размещения узлов (элементов системы).

Предлагается ряд модификаций метода направленного перебора с применением различных процедур определения мест размещения узлов. В качестве базовой использована комбинаторная процедура, применяющая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов. В качестве альтернативных использованы процедуры на основе методов покоординатной оптимизации (МПО), имитации отжига (Simulated annealing), поиска с запретами (Tabu Search), эволюционного синтеза, кластеризации на основе k-means.

Метод покоординатной оптимизации. Суть метода состоит в улучшении начального варианта путем очередной оптимизации мест возможного размещения для каждого узла при фиксированных размещениях $u-1$ узла. Эта процедура циклически повторяется до достижения локального экстремума целевой функции [26].

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов; количество узлов u ; индекс текущего узла $-j := 1$; значение текущей итерации $-i := 0$; значение счетчика полного прохода по всем точкам l , начальные значения для наилучшего варианта размещения узлов w^0 ; лучшее текущее значение критерия $\Delta C(w_i^1) = \infty$.
2. Сформировать начальное размещение узлов w_i^1 , рассчитать значение критерия $\Delta C(w_i^1)$.
3. Увеличить значение счетчика количества итераций $i := i + 1$; для узла j в w_i^1 изменить место его размещения при фиксированных значениях для $u-1$ узлов.
4. Рассчитать значение критерия (2). Если $\Delta C(w_i^1) \leq \Delta C(w_{i-1}^1)$, присвоить $\Delta C(w^1) := \Delta C(w_i^1)$, $w^0 := w_i^1$ и перейти к шагу 5.
5. Увеличить индекс текущего узла $j := j + 1$. Если $j < u$, перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 6.
6. Если $l = 0$, присвоить $w_i^{l+1} := w_i^1$, $l := l + 1$, $j := 1$, и перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 7.
7. Если $\Delta C(w^l) \leq \Delta C(w^{l-1})$, присвоить $w_i^{l+1} := w_i^1$, $l := l + 1$, $j := 1$ и перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 8.
8. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значений затрат $\Delta C(w^0)$.

Метод имитации отжига. Метод имитирует физический процесс, который происходит при кристаллизации вещества. Основная идея состоит в том, чтобы позволить движение алгоритма в направлении ухудшения решения для ухода из локальных минимумов. Вероятность выполнить такой шаг уменьшается по ходу поиска. Время и точность решения задачи зависят от выбора начального значения «температуры» процесса и функции ее понижения (для решения данной задачи был выбран линейный вид зависимости). В процессе решения задачи необходим расчет значения изменения энергии процесса ΔE , вероятности перехода к полученному значению $p(\Delta E)$, функции понижения температуры T [27].

Изменение энергии перехода определяется как разность значения заданного критерия (2) на текущей и предыдущей итерации по следующей формуле [27]:

$$\Delta E = \Delta C(w_i) - \Delta C(w_{i-1}), \quad (5)$$

где w_{i-1} , w_i – множества мест размещения узлов, определенные на $i-1$ и i -й итерациях.

Вероятность перехода к полученному варианту определяется выражением [27]:

$$p(\Delta E) = e^{-\Delta E/t_i}, \quad (6)$$

где t_i – «температура» процесса на i -й итерации.

Температура понижается в процессе поиска. Таким образом, с одной стороны, при фиксированной температуре чем больше ΔE , тем меньше вероятность перехода от w_{i-1} к w_i , а с другой – чем выше температура, тем больше вероятность принятия худшего решения.

Выбор вида функции понижения температуры во многом определяет свойства процедуры: для линейной функции время счета может оказаться достаточно большим; для степенной функции время счета значительно меньше, но и качество получаемых при этом решений – хуже.

Для дальнейшего исследования была выбрана линейная функция понижения температуры:

$$T(i) = t_1/i, \quad (7)$$

где t_1 – начальная температура процесса; i – номер итерации.

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов; минимальную t_{\min} , максимальную t_{\max} и начальную $t_1 = t_{\max}$ температуры отжига; значение текущей итерации $i := 0$; количество узлов $u := u_{\max}$; количество узлов, выбираемых случайным образом $k := u_{\max}$.
2. Сформировать начальное решение: множество мест размещения узлов w_0 , $w^0 := w_0$; матрицу связей элементов, узлов и центра $x = [x_{ij}]$, $i, j = 1, n$.
3. Проверить условие окончания: если $t_1 \leq t_{\min}$, перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 4.
4. Увеличить значение счетчика итераций $i := i + 1$ и сгенерировать решение $w_i(k)$.
5. Определить изменение энергии процесса ΔE (5).
6. Если $\Delta E \leq 0$, сохранить лучшее решение $w^0 := w_i$ и перейти к шагу 3, в противном случае перейти на шаг 7.
7. Рассчитать вероятность перехода $p(\Delta E)$ (6) и перейти с поученной вероятностью к полученному варианту.
8. Понизить температуру процесса $t_{i+1} := T(i)$ (2), уменьшить значение k и перейти к шагу 3.
9. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значением затрат $\Delta C(w^0)$.

Метод Tabu Search. В основу метода Tabu Search положена процедура анализа матрицы ближайших соседей. Для выхода из локального оптимума используется список запретов, в который входит предыстория поиска. В процессе реализации метода необходимо решение дополнительной задачи – формирование списка «ближайших соседей». Сложность методов решения таких задач оценивается величиной порядка $O[n^2]$. На практике используются различные критерии останковки алгоритма [28]:

- по достижению фиксированного количества итераций;
- по достижению фиксированного количества итераций, когда значение функции не улучшается;
- по достижению заданной точности.

В дальнейшем исследовании было использовано условие останковки алгоритма по достижению заданного количества итераций.

При формировании списка «ближайших соседей» применяются вспомогательные структуры данных, наиболее популярными среди которых являются kd-дерево, R-дерево, X-дерево [29 – 30], и используются дополнительные техники, например Locality-sensitive hashing (LSH).

Для решения задачи был выбран поиск соседей внутри фиксированной окрестности, поэтому в качестве структур данных были выбраны ассоциативные структуры.

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов; список запретов $T := \emptyset$; окрестность поиска «ближайших соседей»; количество выполненных итераций $i := 0$; лучшее текущее значение критерия $\Delta C(w_i^1) = \infty$.
2. Сформировать список «ближайших соседей».
3. Сформировать начальное решение w_0 , $w^0 := w_0$.
4. Если условие останова выполнено, перейти к шагу 8, в противном случае перейти к шагу 5.
5. Сформировать решение w_i на основании матрицы «ближайших соседей» и списка запретов T .
6. Если $\Delta C(w_i) < \Delta C(w_{i-1})$, то $w^0 := w_i$, добавить элементы множества T в список запретов.
7. Увеличить значение счетчика количества итераций $i := i + 1$ и перейти к шагу 4.
8. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значением затрат $\Delta C(w^0)$.

В процессе решения задачи в список запретов вносились вся предыстория поиска.

Эволюционный синтез на основе генетического алгоритма. В алгоритме реализуются процедуры наследования, мутации, отбора, кроссинговера [31]. Каждая хромосома отображает множество мест размещения узлов w_i на итерации i . В качестве гена используется код индекса узла, а в качестве функции приспособленности – критерий (2).

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов, размер популяции хромосом; вероятность мутации p , номер итерации (популяции) $i := 0$; лучшее текущее значение критерия $\Delta C(w_i^1) = \infty$.
2. $i := i + 1$ и сформировать начальную популяцию.
3. Рассчитать значения функции приспособленности (2) для всех хромосом популяции и выбрать лучшую хромосому по минимальному значению функции приспособленности $\Delta C(w_i)$; $w^0 := w_i$.
4. Если $\Delta C(w_{i-1}) > \Delta C(w_i)$, то $w^0 := w_i$ и перейти к шагу 8, в противном случае – к шагу 5.
5. Селекция хромосом.
6. Выполнить операции скрещивания и (с заданной вероятностью) мутации.
7. Сформировать новую популяцию. Перейти к шагу 3.
8. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значением затрат $\Delta C(w^0)$.

Кластеризация методом k-Means. Суть метода k-Means заключается в минимизации суммарного отклонения точек кластеров от их центров. Каждая точка кластера представлена местом возможного размещения узлов, ее координаты определяются координатами элемента. Центроид v является центром масс кластера и определяется по формуле [32]:

$$v_k^j = (1/n_v) \sum_{i=1}^{n_v} x_i^j, \quad (8)$$

где v_k^j – j -я координата k -го центроида, $j = \overline{1, 2}$, $k = \overline{1, u}$; n_v – количество точек в k -м кластере (количество элементов, подключенных к узлу); x_i^j – j -я координата i -й точки кластера.

Алгоритм

1. Задать исходные данные: множество мест возможного размещения узлов, количество кластеров; множество оптимальных мест размещения узлов $w^0 = \emptyset$; значение текущей итерации $i := 0$.
2. $i := i + 1$ и сгенерировать начальное множество центроидов w_0 .

3. Для каждого центроида вычислить расстояния до каждой точки, сформировать кластеры.
4. Вычислить новые центроиды по среднему значению координат всех точек кластеров.
5. Проверить окончание: если $w_i = w_{i-1}$, перейти к шагу 3, в противном случае перейти к шагу 6.
6. Определить лучшее решение w^0 путем определения для каждого кластера точки, ближайшей к центроиду.
7. Окончание работы алгоритма: получено решение w^0 с минимальным из рассмотренных значением затрат $\Delta C(w^0)$.

3. Результаты экспериментальных исследований

Для анализа эффективности предложенных модификаций метода, реализованных с использованием различных процедур размещения u узлов на n элементах, была проведена серия экспериментов. Топологическая структура «существующей» СКММ создавалась путем формирования мест размещения элементов и узлов с использованием генератора случайных чисел и присоединения элементов к узлам по минимуму стоимости (расстояния). Далее проводился реинжиниринг сгенерированной топологической структуры предложенным методом. В качестве базовой использована комбинаторная процедура, применяющая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов. В качестве альтернативных использованы процедуры на основе методов покоординатной оптимизации (COM – coordinatewise optimization method), имитации отжига (SA – Simulated annealing), поиска с запретами (TS – Tabu Search), эволюционного синтеза на основе генетического алгоритма (GA – Genetic algorithm) кластеризации на основе k-Means. Эксперименты проводились на персональном компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i7-4770 (тактовая частота 3.40 ГГц).

Для сравнения точности предложенных модификаций метода использован показатель относительной погрешности $\delta C' = 100 \cdot |\Delta C - \Delta C'| / \Delta C$, где ΔC – значение показателя затрат (2), полученное по методу полного перебора, $\Delta C'$ – значение показателя затрат (2), полученное с использованием предложенной модификации метода. В процессе исследования модификаций метода было решено 60 задач (по 10 задач для $n = 15 \div 40$) и получены оценки их точности и временной сложности (табл. 1, 2).

Рейтинг модификаций метода по показателю точности: покоординатная оптимизация, поиск с запретами, эволюционный синтез на основе генетического алгоритма, имитация отжига, кластеризация на основе k-Means.

Для прогноза оценок погрешностей предложенных модификаций метода по результатам экспериментов проведена аппроксимация данных табл. 1. Функции погрешности для предложенных модификаций метода от размерности $\delta C'(n)$ аппроксимированы полиномами с достоверностью R :

- COM: $\delta C'(n) = 0.1663x + 0.0247$, $R=0.99$;
- SA: $\delta C'(n) = 0.4423x + 2.8387$, $R = 0.96$;
- TS: $\delta C'(n) = 0.7017x - 0.366$, $R = 0.99$;
- GA: $\delta C'(n) = 0.1571x^2 - 0.2126x + 2.224$, $R = 0.96$;
- k - m e a n s : $\delta C'(n) = 0.0225x^2 + 0.8999x + 4.894$, $R = 0.99$.

Таблица 1

Средняя относительная погрешность решения $\delta C'$, %

n	COM	SA	TS	GA	k-means
15	0.18	3.21	0.27	1.85	5.94
20	0.33	3.56	1.02	2.95	6.49
25	0.56	4.66	1.79	3.11	7.96
30	0.71	4.81	2.58	3.61	8.89
35	0.87	4.95	3.11	4.82	9.95
40	0.99	5.39	3.77	6.84	11.08
$\delta \bar{C}'$, %	0.61	4.43	2.09	3.86	8.38

Таблица 2

Среднее время решения задачи t , с

n	COM	SA	TS	GA	k-means
15	0.53	0.07	0.11	0.22	0.10
20	3.02	0.21	0.37	0.71	0.30
25	5.24	0.44	1.37	1.85	0.73
30	11.87	0.83	2.59	3.91	1.54
35	21.34	1.39	5.19	8.14	2.78
40	35.26	2.31	9.78	14.01	4.70
\bar{t}	12.88	0.88	3.24	4.81	1.69

Рейтинг модификаций метода по показателю временной сложности: метод имитация отжига (Simulated annealing), кластеризация на основе k-means, поиск с запретами (Tabu Search), эволюционный синтез на основе генетического алгоритма, покоординатная оптимизация.

Для прогноза времени решения задач с использованием предложенных модификаций метода по результатам экспериментов проведена аппроксимация данных табл. 2. Функции временной сложности для предложенных модификаций метода от размерности $t(n)$ аппроксимированы полиномами с достоверностью R :

- COM:
- $t(n) = 0.1745x^3 - 0.2938x^2 + 1.4809x - 0.6756$, $R = 0.99$;

- SA: $t(n) = 0.0941x^2 - 0.2258x + 0.2423$, $R = 0.99$;
- TS: $t(n) = 0.5016x^2 - 1.6805x + 1.5128$, $R = 0.99$;
- GA: $t(n) = y = 0.7006x^2 - 2.2385x + 2.0225$, $R = 0.99$;
- k-means: $t(n) = 0.2109x^2 - 0.5832x + 0.539$, $R = 0.99$.

Аппроксимации, полученные по данным табл. 1 и 2, позволяют выбирать наиболее подходящую модификацию метода при решении практических задач, исходя из требуемой точности и имеющихся вычислительных и временных ресурсов.

Выводы

Для решения задачи реинжиниринга топологических структур централизованных трехуровневых систем крупномасштабного мониторинга предложено шесть модификаций метода направленного перебора вариантов по количеству узлов в системе. В качестве базовой предложена модификация, использующая полный перебор всевозможных вариантов размещения узлов, а в качестве альтернативных – построенные на основе методов покоординатной оптимизации, имитации отжига, поиска с запретами, эволюционно-го синтеза, кластеризации на основе k-Means.

Получены оценки их точности и временной сложности. При этом базовая модификация метода позволяет получать точное решение и имеет на треть меньшую временную сложность по сравнению с известным методом. Результаты экспериментальных исследований позволили установить их существенное различие по показателям точности и временной сложности. Это позволит выбирать наиболее подходящую модификацию метода при решении практических задач, исходя из требуемой точности и имеющихся вычислительных и временных ресурсов.

Полученные модификации метода направленного перебора могут быть использованы также при решении задач оптимизации информационных, транспортных, логистических систем и систем обслуживания. Их практическое применение позволит сократить сроки решения задач реинжиниринга и (или) затраты на реализацию топологических структур реструктуризуемых систем.

Литература: 1. *Бескорвайный В.В., Подоляка К.Е.* Разработка модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. №4 (76). С. 49–55. 2. *Stitzle T. G.* Local search algorithms for combinatorial problems: analysis, improvements, and new applications. Sankt Augustin: Infix, 1999. 203 p. 3. *Бескорвайный В.В., Соболева Е.В.* Эвристическая процедура для методов оптимизации топологии систем с радиально-узловыми структурами // Системи обробки інформації. 2008. № 7. С. 22–27. 4. *Han L.Z., Zhang J.Q., Yang Y.* Optimal placement of sensors for monitoring systems on suspension bridges using genetic algorithms // Applied Mechanics and Materials. 2014. № 530. P. 320–331. 5. *Wang K., Zhao H., Ding Y., Li T., Hou L., Sun*

- F.* Optimization of air pollutant monitoring stations with constraints using genetic algorithm // *Journal of High Speed Networks*. 2015. № 21(2). P. 141–153. **6.** *Pasandideh S.H.R., Niaki S.T.A.* Genetic application in a facility location problem with random demand within queuing framework // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2012. № 23 (3). P. 651–659. **7.** *Zhang Z., Zhang N., Feng Z.* Multi-satellite control resource scheduling based on ant colony optimization // *Expert Systems with Applications*. 2014. № 41 (6). P. 2816–2823. **8.** *Kolda T.G., Lewis R.M., Torczon V.* Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods // *SIAM review*. 2003. № 45(3). P. 385–482. **9.** *Бескоровайный В.В., Соболева Е.В.* Модификация метода направленного перебора для оптимизации топологии систем с регулярым распределением элементов // *Системы обработки информации*. 2013. №1. С. 12–16. **10.** *Hentenryck P., Michel L.* Constraint-based local search. London: The MIT Press, 2009. 448 p. **11.** *Lourenzo H.R., Martin O.C., Stutzle T.* Iterated local search: Springer, 2003. 448 p. **12.** *Lenstra J.K.* Local search in combinatorial optimization. New Jersey: Princeton University Press, 2003. 515 p. **13.** *Hansen P., Mladenović N.* Variable neighborhood search: Principles and applications // *European journal of operational research*. 2001. № 130 (3). P. 449–467. **14.** *Toksar M.D., Gьner E.* Solving the unconstrained optimization problem by a variable neighborhood search // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2007. № 328(2). P. 1178–1187. **15.** *Бескоровайный В.В., Имангулова З.А.* Алгоритмы оптимизации топологии ИВС на множестве радиально-узловых структур // *Радиоэлектроника и информатика*. 2000. №2. С. 100–104. **16.** *Бескоровайный В.В.* Метод предварительной оценки стоимости территориально распределенных объектов // *Радиоэлектроника и информатика*. 2003. №. 2. С. 104 – 107. **17.** *Бескоровайный В.В., Имангулова З.А., Петрова А.И.* Оптимизация количества и местоположения распределенных центров транспортно-складской системы // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 5. №. 3 (59). С. 24 – 28. **18.** *Kanungo T., Mount D.N., Netanyahu N.S., Piatko C.D., Silvermann R., Wu A.Y.* An Efficient k-Means Clustering Algorithm: Analysis and Implementation // *Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2002. № 24(7). P. 881–892. **19.** *Xu R., Wunsch D.* Survey of clustering algorithms // *IEEE Trans Neural Netw.* 2005. № 16 (3). P. 645–678. **20.** *Bahmani B., Moseley B., Vattani A., Kumar R., Vassilvitskii S.* Scalable k-means++ // *Proceedings of the VLDB Endowment*. 2012. №5 (7). P. 622–633. **21.** *Martin R., Resende M.G.C., Ribeiro C.C.* Multi-start methods for combinatorial optimization // *European Journal of Operational Research*. 2013. Т. 226, № 1. P. 1–8. **22.** *Osman I.H., Kelly J.P.* Meta-Heuristics: Theory & Applications. Massachusetts: Springer US, 1996. 690 p. **23.** *Glover F.A., Kochenberger G.A.* Handbook of metaheuristics. Massachusetts: Springer Science & Business Media, 2010. 648 p. **24.** *Бескоровайный В.В.* Метод структурно-топологической оптимизации для реинжиниринга территориально распределенных объектов // *Системы обработки информации*. 2004. Вип. 4. С. 26 – 33.
- 25.** *Бескоровайный В.В., Подоляка К.Е.* Разработка модели многокритериальной задачи реинжиниринга топологических структур систем крупномасштабного мониторинга // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. №4(76). С. 49 – 55. **26.** *Петров Э.Г., Писклакова В.П., Бескоровайный В.В.* Территориально распределенные системы обслуживания. К: Техника, 1992. 208 с. **27.** *Eglese R.W.* Simulated annealing: a tool for operational research // *European journal of operational research*. 1990. Т. 46, №3. P. 271 – 281. **28.** *Du D.Z., Pardalos P.M.* Handbook of combinatorial optimization. New York: Springer Science & Business Media, 2013. 3409 p. **29.** *Mahapatra R.P., Chakraborty P.S.* Comparative Analysis of Nearest Neighbor Query Processing Techniques // *Procedia Computer Science*. 2015. №. 57. P. 1289–1298. **30.** *Hapala M., Havran V.* Review: Kd-tree Traversal Algorithms for Ray Tracing // *Computer Graphics Forum*. 2011. №. 30 (1). P. 199 – 213. **31.** *Beasley J.E., Chu P.C.* A genetic algorithm for the set covering problem // *European Journal of Operational Research*. 1996. №. 96 (2). P. 392–404. **32.** *Likas A., Vlassis N., Verbeek J.J.* The global k-means clustering algorithm // *Pattern recognition*. 2003. Vol. 36, № 2. P. 451 – 461.

Поступила в редколлегию 11.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Нефедов Л.И.

Бескоровайный Владимир Валентинович, д-р техн. наук, профессор кафедры системотехники ХНУРЭ. Научные интересы: теория принятия решений; математическое моделирование; оптимизация территориально распределенных объектов. Хобби: путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. (057) 702-13-76. E-mail: vvbeskorovainyi@mail.ru.

Подоляка Ксения Евгеньевна, аспирантка кафедры системотехники ХНУРЭ. Научные интересы: разработка и применение методов реинжиниринга систем крупномасштабного мониторинга. Хобби: путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. (057) 702-13-76. E-mail: podolyakakseniya@gmail.com.

Bezkorovainyi Vladimir V., Dr. Sc. Sciences, prof., professor of systems engineering of Kharkiv National University of Radio Electronics. Research interests: the theory of decision making; math modeling; optimization of geographically distributed objects. Hobbies: travel. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, avenue of Science, 14, tel. (057) 702-16-73. E-mail: vvbeskorovainyi@mail.ru.

Podolyaka Ksenia E., systems engineering graduate student of Kharkov National University of Radio Electronics. Research interests include the development and application reengineering methods of large-scale monitoring systems. Hobbies: travel. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, avenue of Science, 14, tel. (057) 702-16-73. E-mail: podolyakakseniya@gmail.com.

ОБ ОДНОМ КЛАССЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С КОНКУРЕНТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

ВАЛИД АХМЕД МАХМУД АЛЬРЕФАИ

Рассматриваются динамические модели взаимодействия насосных агрегатов при их параллельном включении на насосных станциях. Показывается, что стабильный рост расхода и напора на выходе насосной станции при включении дополнительного агрегата может смениться квази-хаотическим движением даже в линейной системе с двумя взаимодействующими агрегатами. Описываются условия различных типов перехода из одной стационарной точки в другую.

Ключевые слова: динамические модели, насосные агрегаты, устойчивый рост, хаотическое движение, конкуренция.

Key words: Dynamic models, pumps, steady growth, chaotic motion, competition.

1. Введение и постановка задачи

В работе рассмотрено взаимодействие нелинейных динамических моделей одного класса технических систем, нелинейность которых является существенным свойством их динамики. Научные исследования моделирования и управления линейными динамическими системами, в основном, завершены работами Болтянского, Гамклеридзе и других последователей школы Понтрягина [1]. Однако в процессе применения даже таких линейных моделей возник ряд проблем технического и вычислительного характера, связанных с многомерностью систем и возможностью их хаотической динамики, т.е. не отличимой от стохастической. Эта проблема становится еще более актуальной при анализе взаимодействия существенно нелинейных систем. Моделирование нелинейных объектов, динамика которых не может быть адекватно описана в линейном приближении, восходит к работам Вышнеградского – для механических систем, и Андронова – для систем электро- и радиотехники [2, 3]. К тому времени уже существовали развитые Пуанкаре, Понтрягиным, Петровским и Хопфом необходимые математические методы.

В настоящее время исследования существенно нелинейных взаимосвязанных систем, допускающих хаотическую динамику, ведутся в рамках синергетического подхода [1]. Проблема анализа устойчивого развития динамических систем в технике, экономике и обществе появилась сравнительно недавно в связи с общим кризисом начала нашего века. “Устойчивое развитие” взаимосвязанных динамических систем является относительно новым понятием и не предполагает удовлетворения классическим определениям устойчивости динамических систем по Ляпунову. Это связано с тем, что при моделировании динамики взаимосвязанных систем

интервал моделирования конечен. При $t \rightarrow \infty$ модели выходят за рамки адекватности, как и абсолютное большинство всех нелинейных математических моделей, например, все модели процессов “с обострением”. Кроме того, в технических системах существуют жесткие ограничения на амплитуды колебания переменных состояния системы.

Также важным является исследование механизмов возникновения условий стагнации, циклической неустойчивости или хаоса в моделях и алгоритмов их численного анализа. Эта проблема возникает для широкого класса объектов различной природы. Для существенно нелинейных объектов она связана с тем, что их динамика не может быть разделена на затухающее “собственное движение” и движение под действием внешних факторов (вынуждающих сил). Поэтому классическая устойчивость здесь не является определяющим условием.

Также для любых нелинейных взаимосвязанных динамических систем характерна конкуренция либо за ресурс, либо за влияние на выходные характеристики системы. Здесь “конкуренция” является обобщением понятия обратной связи в технической системе. Конкурентные и кооперативные (или солидарные) процессы характерны для таких областей техники, как системы энергоснабжения, защиты и восстановления и технического обслуживания городского хозяйства. Они также известны в экономике, биологии, экологии, психологии, военном деле, логистике, исследовании операций и многокритериальной оптимизации. Поэтому модельное понятие “актор” может быть как “технической подсистемой” – насосным агрегатом, так и “биологическим видом”, “предприятием”, или иметь другой смысл и прикладное содержание. Во всех этих системах и их математических моделях, независимо от предметной области и физического смысла объектов, их общими свойствами являются: многосвязность, гладкость и замкнутость. Нелинейность абсолютного большинства из них определяет сложную динамику, даже для систем малой размерности [1]. Различные модели конкуренции ранее исследовались в работах Пуанкаре и Вольтерра [4]. Все они описывали сравнительно простые технические объекты и экологические системы.

Целью настоящей работы является определение условий возникновения устойчивой и квази-хаотической динамики систем с конкурентным взаимодействием. Поставлена задача именно для “мягких” моделей в целях качественного, а не количественного описания их динамики. При этом необходимо выявить точки бифуркации, оценить значения параметров, при которых осуществляется плавный переход (стабильный рост) из одной стационарной точки в другую, а также параметры хаотических режимов. Адекватность таких моделей объектам либо известна ранее, либо показана путем системного анализа общих свойств объектов [1, 3].

Объект исследования – устойчивые и хаотические процессы в динамических нелинейных конкурентных моделях взаимодействия параллельно включаемых агрегатов насосной станции.

Насосные станции рассматриваются как системы с сосредоточенными параметрами. Распределенные процессы внутри транспортной сети между такими узлами предполагаются линейными, что справедливо для сетей низкого давления или для несжимаемого носителя (вода, нефть) и ламинарного потока. Они могут быть учтены введением передаточных матриц на входах или выходах узла.

В современных публикациях [5] рассматриваются линеаризованные квазистационарные модели таких систем. Для них математической моделью являются уравнения, отражающие закон сохранения энергии, который для таких диссипативных систем верен лишь в стационарных точках и при условии усреднения по времени. Отметим, что при таком подходе поведение переходного процесса между двумя стационарными точками вообще не рассматривается. В работе предлагаются как линейные, так и нелинейные динамические модели – системы дифференциальных уравнений, описывающие весь процесс. Процессы во внутренних объемах насосов описываются уравнениями турбулентности и в данном исследовании не рассматриваются. Предлагаемая здесь феноменологическая модель может быть получена из общих уравнений в частных производных первого порядка для удельного массового расхода, давления и температуры целевого продукта [5, с. 55] путем учета только сосредоточенных параметров, поскольку характерные линейные размеры насосных агрегатов на порядки меньше характерных длин в транспортной сети.

2. Объекты и их динамические модели

Не нарушая общности, рассмотрим динамические модели взаимодействия двух (или более) насосных агрегатов при их параллельном включении в составе насосной станции (рис. 1).

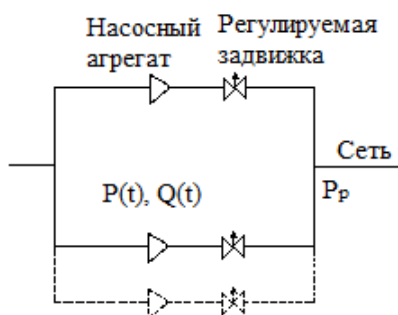


Рис. 1. Схема включения параллельно работающих насосных агрегатов

Технология и модели взаимодействия насосных агрегатов

При параллельной работе двух ($i=1, 2$) или нескольких насосных агрегатов каждый i -й обеспечивает на своем выходе подачу целевого продукта с давлением $P_i(t)$ и расходом $Q_i(t)$. Далее везде эти величины

зависят от времени. Динамическую модель каждого i -го насосного агрегата можно представить в виде взаимосвязанной системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{dP}{dt} = P \cdot f(P, Q), \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dt} = Q \cdot g(P, Q). \quad (2)$$

где функции $f(\cdot)$ и $g(\cdot)$ определяются техническими характеристиками насосных агрегатов и, в свою очередь, определяют динамические свойства объекта [1, 5]. Поэтому они имеют следующие характеристики, которые далее, ввиду их общего характера, будем называть аксиомами конкурентного взаимодействия динамических систем.

Введя единые обозначения x_i вместо P_i и Q_i , систему (1), (2) со связями состояний через функции $f(\cdot)$ и $g(\cdot)$ в правой части представим в стандартном виде:

$$A1. \quad \frac{dx_i}{dt} = x_i \cdot f_i(X), \quad x_i > 0, \quad i=1, \dots, n, \\ X = (x_i)^T, \quad F(X) = (f_i(X))^T;$$

$$A2. \quad \frac{df_j}{dx_i} > 0 \quad \text{для кооперации, и} \\ \frac{df_j}{dx_i} < 0 \quad \text{для конкуренции, } \forall j \neq i.$$

A3. Если $X^{(i)}$ – вектор системных переменных X без x_i , то $f_i(X^{(i)}=0) = \text{const} > 0$.

A4. $f_i(X^{(i)})$ – линейная функция по всем своим переменным.

Отметим, что анализ конкуренции между двумя акторами, проводившийся изначально в работах Гаузе, Лотки и Вольтерра [4], начинался с рассмотрения двумерной динамической модели, тогда как объект из двух насосных агрегатов (см. рис.1) описывается системой из четырех уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= P_1(a_1 + b_1Q_1 + c_1P_2 + d_1Q_2), \\ \frac{dQ_1}{dt} &= Q_1(a_2P_1 + b_2 + c_2P_2 + d_2Q_2), \\ \frac{dP_2}{dt} &= P_2(a_3P_1 + b_3Q_1 + c_3 + d_3Q_2), \\ \frac{dQ_2}{dt} &= Q_2(a_4P_1 + b_4Q_1 + c_4P_2 + d_4). \end{aligned} \quad (3)$$

Из физических свойств взаимодействия двух насосных агрегатов следует, что возрастание давления на выходе второго насосного агрегата противодействует работе первого, что приводит к уменьшению скорости изменения давления и уменьшению расхода на его выходе. Для адекватного описания такого взаимодействия – «конкуренции» насосных агрегатов необходимо выполнение $a_i > 0$, $c_i < 0$, согласно аксиоме A2. Поскольку при увеличении расхода через насосный

агрегат давление на его выходе падает, то коэффициенты $b_{1,2}$ в уравнениях первого насоса и $d_{3,4}$ для второго – отрицательны.

Согласно технологии, процесс включения насосной станции происходит в три этапа:

1) при закрытых задвижках всех насосных агрегатов (см. рис.1) включается первый агрегат. При расходе, равном нулю, давление на выходе этого агрегата возрастает до максимальной величины P_0 . С этого момента начинается открытие задвижки первого агрегата, что приводит к возрастанию расхода до величины Q_p^1 и снижению давления до величины P_p^1 , где P_p^1 и Q_p^1 – рабочая точка насосного агрегата и сети. Это – первая стационарная точка;

2) если давление в рабочей точке не достаточно, аналогично включаются остальные агрегаты;

3) по достижении требуемого давления на выходе насосной станции получаем вторую (последнюю) стационарную точку с параметрами P_p^2 и Q_p^2 .

Таким образом, процессы включения агрегатов описываются двумя различными моделями. Первая, при $Q=0$, модель одного насосного агрегата представляет собой известное логистическое уравнение:

$$dP/dt = k \cdot P \cdot (1 - P),$$

при начальных условиях $P(0) \approx 0$, параметре роста $k > 0$ и условиях нормировки $P(t) < P_p < 1$. Это – частный случай уравнения (1) при $f(P, Q) = k(1 - P)$ и отсутствии уравнения (2).

Эта модель хорошо исследована [1-4]. Логистическое уравнение разрешимо аналитически.

Предположение $P_p > 1$ выводило бы модель за рамки адекватности, однако некоторые авторы [6] считают, что она годится для описания режима “помпажа” в насосе.

Модель насосного агрегата на втором этапе. После открытия задвижки на выходе включенного насосного агрегата его модель будет описываться полной системой уравнений (1), (2). Итоговая модель включения всех агрегатов насосной станции описывается взаимосвязанной системой нелинейных уравнений (3). Её модификация пригодна также для описания систем с защитой и техническим обслуживанием [1]. Такими же моделями описываются и процессы взаимодействия в системах ЖКХ [7], состоящих из владельцев жилищного фонда и монопольной обслуживающей компании. В данной работе основное внимание уделено изучению локальной и глобальной асимптотической устойчивости позитивных ограниченных решений и бифуркаций положений равновесия. Динамика модели определяется численно и, где возможно, аналитически – для оценки точности численного метода.

Для разработки эффективных методов анализа системы, не нарушая общности, проведем линеаризацию модели (3) в окрестности двух её стационарных рабочих точек путем разложения ее правой части в ряд Тейлора до первого члена. Первая из них, согласно этапу 2, даёт начальные условия для системы (3). Из физики процесса следует ее неустойчивость, что подтверждается результатами моделирования (рис.2).

После линеаризации введем обозначения: вектор $X = (P_i, Q_i)$ – состояния системы, $A = (2n \cdot 2n)$, матрица первых частных производных в стационарах, $F = 2n$ вектор констант.

После переобозначений система приобретает вид $X' = AX + F$. Для линейной $2n$ -мерной системы задача анализа устойчивости сводится к проверке знака показателя Ляпунова $Re(\lambda)$, где $Au = \lambda u$, в стационарной точке $X_0 = -A^{-1}F$. В ситуации общего положения матрица A не вырождена. Структура матрицы отражает взаимовлияние r_{ij} через давление i -го и j -го насосных агрегатов в модели на рис.1:

$$A = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} r_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 0 \\ m_1 \\ 0 \\ m_2 \end{pmatrix}.$$

Анализ такой модели в окрестности стационаров позволяет выяснить:

– параметры связей для исследования устойчивой и неустойчивой динамики;

– параметры точки бифуркации, при которых отношение частот колебаний ω_1 / ω_2 – иррационально, что приводит к появлению аттрактора типа тора.

Начало координат на рисунках, следуя традиции, перенесено в соответствующую стационарную точку, где проведена линеаризация.

3. Результаты расчетов и их анализ

Целью расчетов является анализ динамики в окрестности начального и конечного стационаров в целях выявления характера переходного процесса между ними.

3.1. Модель насосной станции – система из 4-х уравнений модели (см. рис.1) на втором этапе процесса подключения – первая стационарная точка.

Вектор собственных значений λ матрицы уравнения (3):

$$(-0.039, 0.3 + 0.436i, 0.3 - 0.436i, -0.012).$$

Координаты нетривиальной стационарной точки в фазовом пространстве $X^* = (10.23, 2.28, 0.14, 0.74)$.

На рис.2 изображена двумерная проекция на P_1, P_2 фазового пространства $P_1 P_2 Q_1 Q_2$ в окрестности стационара:

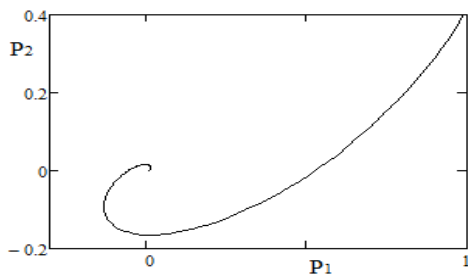


Рис. 2. Динамика давлений в окрестности первого стационара

Проверка на тип собственных значений и рисунок проекции показали наличие неустойчивого узло-фокуса. Налицо устойчивое возрастание параметров давления P_i вдали от стационара на конечном отрезке времени. Графики, полученные численным и численно-аналитическим методами, неотличимы.

3.2. Модель насосной станции на третьем этапе процесса подключения – в окрестности последней стационарной точки. Начальные условия везде $(P_1, Q_1, P_2, Q_2)_0 = (1, 0, 1, 0)$, поскольку вначале задвижки закрыты.

Для исследуемых типов насосных агрегатов параметры матрицы A после нормализации имеют вид:

$$\begin{pmatrix} 0.1 & -1 & 0.01 & 0 \\ 0.5 & -1 & 0 & 0 \\ 0.13 & 0 & 0.5 & -0.8 \\ 0 & 0 & 0.65 & -0.6 \end{pmatrix}$$

Её собственные числа подтверждают устойчивость процесса:

$$(-0.45+i0.44, -0.45-i0.44, -0.05-i0.47, -0.05+i0.47),$$

однако переходный процесс, как видно из графиков проекций фазовых траекторий (рис.3 и 4), колебательный, т.е. при данных параметрах устойчивый рост расхода и давления не наблюдается.

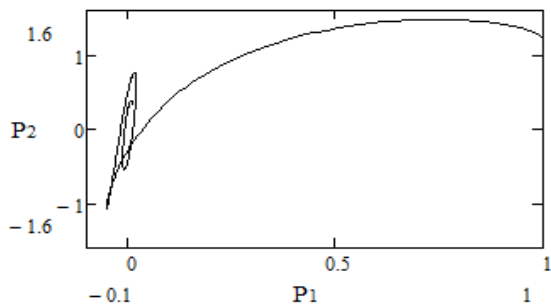


Рис. 3. Динамика давлений в окрестности устойчивого стационара

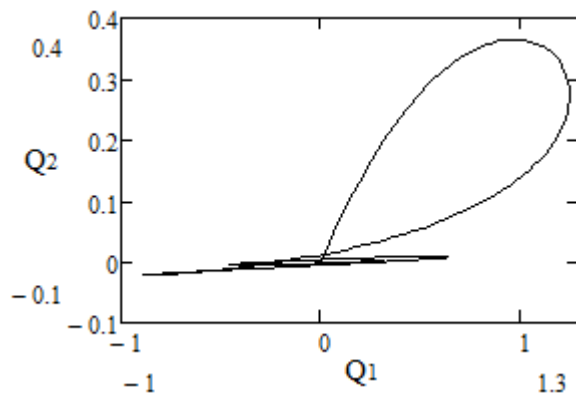


Рис. 4. Динамика расхода в окрестности устойчивого стационара

3.3. Малая вариация параметров может перевести систему в окрестность нерезонансного тора, что легко видеть из мнимых частей собственных чисел $(-0.05-i0.55, -0.05+i0.55, -0.026-i0.57, -0.026+i0.57)$ слабо проварьированной матрицы параметров A :

$$\begin{pmatrix} 0.1 & -1 & 0.01 & 0 \\ 0.5 & -1 & 0 & 0 \\ 0.13 & 0 & 0.5 & -0.8 \\ 0 & 0 & 0.65 & -0.6 \end{pmatrix}$$

Квази-хаотическая динамика системы видна на рис. 5 и 6 проекций фазового пространства.

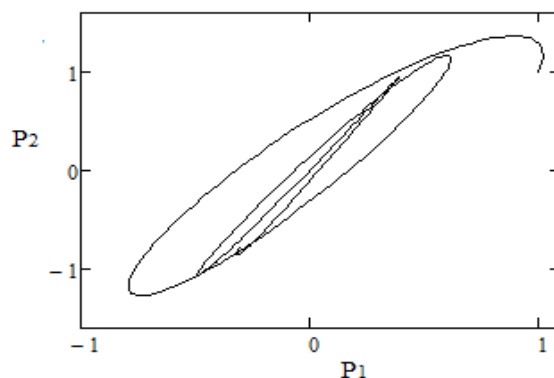


Рис. 5. Динамика давлений после слабого изменения параметров

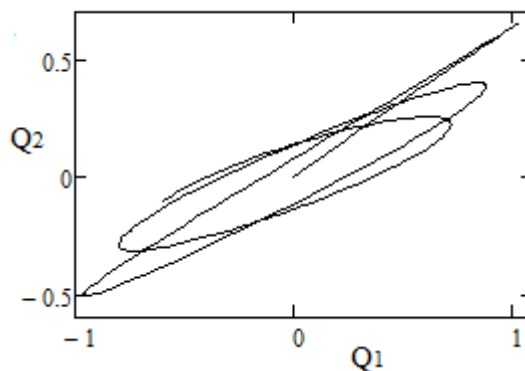


Рис. 6. Динамика расхода после слабого изменения параметров

Выводы

Впервые предложены феноменологические модели динамики взаимодействия системы параллельно включаемых агрегатов насосных станций, отличающиеся от известных учетом их нелинейных связей, что позволяет адекватно описать их взаимодействие при переходе между двумя стационарными состояниями. Анализ переходных процессов, возникающих в динамической модели системы включения двух и более насосных агрегатов, показывает, что переходные процессы при некоторых значениях параметров могут устанавливаться медленно, демонстрируя квази-хаотическую динамику, что может привести к авариям системы. Посредством предложенного подхода “конкуренции” агрегатов получены **практически важные результаты** о возможности и условиях возникновения нежелательных квази-хаотических переходных режимов. Отмечено, что эти модели **в перспективе** описывают также широкий класс конкурентных процессов, в частности, взаимоотношений между субъектами деятельности в ЖКХ, которые могут представлять объект дальнейших исследований.

Литература: 1. *Малинецкий Г. Г.* Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: введение в нелинейную динамику / Г. Г. Малинецкий. М.: Эдиториал УРСС, 2002.

256 с. 2. *Андронов А. А.* Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин/ М.: Наука, 1981. 352 с. 3. *Анищенко В.С.* Стохастические колебания в радиофизических системах. Часть 1. Физико-математические основы описания и исследования динамической стохастичности / В.С. Анищенко. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. 125 с. 4. *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтерра. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 288 с. 5. *Трубопроводные системы энергетики.* Управление развитием и функционированием / Под ред А.Д. Тевяшева. Новосибирск: Наука, 2004/461 с. 6. *Шерстюк А.М.* Насосы, вентиляторы и компрессоры / А.М. Шерстюк. М.: Высшая школа, 1972. 344с. 7. *Егорова Н. Е., Митрофанова И. Н., Шейн А. М.* Имитационная модель предприятия ЖКХ как инструмент анализа тарифно-ценового механизма //Аудит и финансовый анализ. 2007. №6. С. 37-42.

Поступила в редколлегию 09.09.2015

Валид Ахмед Махмуд Альрефай, аспирант кафедры Прикладной математики ХНУРЭ. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина,14, Email: wamralal@yahoo.com

Waleed Ahmed Mahmoud Alrefai, graduate student of the Department of Applied Mathematics, Kharkov National University of Radio Electronics Lenin AVE., 14, Kharkov, Ukraine, Email: wamralal@yahoo.com

РЕФЕРАТИ

УДК 621.391(045)

Структуризація і оцінка готовності резервованого обладнання системи радіодоступу umts utran / І.С. Терентьева // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.3-7.

Проведена класифікація обладнання системи радіодоступу UTRAN з урахуванням структури резервування. Проаналізоване середовище резервування і взаємодія конструктивних модулів для контролера радіомережі, базових станцій і модулів програмного забезпечення. Також розглянуто резервування на рівні макроелементів системи. Показано вплив резервування на готовність телекомунікаційного обладнання. Класифікація і структуризація наведені на прикладі обладнання компанії Huawei.

Лл. 2. Бібліогр.: 10 назв.

УДК 621.391+004.7

Метод управління ресурсами в датацентрах оператора мережі мобільного зв'язку / М.А. Скулиш, С.В. Суліма / *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.8-13.

Розглянута можливість віртуалізації мережі мобільного зв'язку. Представлено метод динамічного управління ресурсами системи датацентрів мобільного оператора, який використовує гнучку аналітичну модель для визначення оптимальної кількості датацентрів, топології їх розміщення та кількості ресурсів, які виділяються функціональним блокам системи, що розгортаються в датацентрах та передбачають використання декількох типів ресурсів.

Лл. 3. Бібліогр.: 18 назв.

УДК 004.056.5:004.7

Аналіз стеганографічних методів приховування інформаційних потоків в контейнери різних форматів / О.К. Юдін, Р.В. Зюбіна, О.В. Фролов / *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.13-21.

Проведено аналіз існуючих стеганографічних методів. Визначено основні поняття цифрової та комп'ютерної стеганографії. Доведено, що цифрова стеганографія використовує методи приховування контейнера в дані, що мають аналогову природу. Показано, що комп'ютерна стеганографія вивчає способи приховування інформації за рахунок певних властивостей файлових систем, файлів різних форматів виконуваних файлів. Представлені структурна схема і математична модель типової стеганосистеми. Проаналізовано питання стійкості стеганосистем в залежності від розміру і класу обраного контейнера. Визначено показники оцінки якості стеганосистем і введено детальну класифікацію стеганографічних методів по формату контейнера.

Лл. 5. Бібліогр.: 3 назви.

УДК 519.85

Псевдонормалізовані квазі-phi-функції для багатогранників / О.В. Панкратов, Т.Є. Романова, Ю.Є. Стоян // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С. 22-26.

Розглянуто клас задач оптимальної упаковки багатогранників. З метою аналітичного опису обмежень на допустимі відстані між неопуклими багатогранниками, що до-

ABSTRACTS

UDC 621.391(045)

Structurization and availability evaluation of redundaned utran elements / I.E. Terentyeva // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P. 3-7.

Classification of UTRAN network elements is developed taking into consideration redundancy structure. Redundancy conditions and unit's interaction is analyzed for units of Node Bs, RNCs and Software. Also, redundancy of system elements is considered. The structuring allows formalize an approach to obtaining optimal redundancy structure taking into account network availability and unit's cost. Redundancy effect on availability of telecommunication system is demonstrated. Huawei Hardware is used like an example in the paper.

Fig. 2. Ref.: 10 items.

UDC 621.391+004.7

Method of resource management in datacenters of mobile network operator / M.A. Skulysh, S.V. Sulima // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P. 8-13.

The virtualization of mobile network is argued. The method of dynamic resource management in datacenters of mobile operator that uses a flexible analytical model to determine the optimal number of datacenters, the topology of their location and the number of resources allocated to functional blocks of the systems deployed in datacenters and that use several types of resources is proposed.

Fig. 3. Ref.: 18 items.

UDC 004.056.5:004.7

Analysis steganographic methods hide information flows in containers of different formats / O.K. Yudin, R.V. Zyubina, O.V. Frolov // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P. 13-21.

Analyzed existing steganographic methods. The basic concepts of computer and digital steganography are defined. It should be noted that digital steganography involves hiding some of the data in the other with an analog nature, that is in the media files, computer exploring steganography techniques for hiding information due to the specific properties of file systems, files in various formats. Shown block diagram and the mathematical model of a typical stegosystem. Analyzed the stability of stegosystem depending on the size of the selected container. Assessed the quality of steganosystems and detailed classification steganographic methods depending on container format.

Fig. 5. Ref.: 3 items.

UDC 519.85

Adjusted quasi-pfi-functions for non-convex polytopes/ A.V.Pankratov, T.E. Romanova, Y.E. Stoyan // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P. 22-26.

The paper studies the class of optimal packing problems of polytopes. For the purpose of analytical description of restrictions on the minimal and maximal allowable distances between the non-convex polytopes, that admit continuous rotations and translations in this study a class of quasi-phi-

пускають безперервні повороти і трансляції в даному дослідженні, використано клас квазі- ϕ -функцій. Побудовано квазі- ϕ -функції і псевдонормалізовані квазі- ϕ -функції для двох неопуклих багатогранників

Лл. 3. Бібліогр.: 7 назв.

УДК 519.85

Математична модель і метод розв'язання задачі упаковки гомотетичних однако орієнтованих еліпсоїдів / О.М. Хлуд, І.О. Субота, Т.Є. Романова // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.27-32.

Розглянута задача упаковки гомотетичних однако орієнтованих еліпсоїдів в контейнері мінімального об'єму. Як контейнер обрано прямокутний паралелепіпед або еліпсоїд. Побудована математична модель у вигляді задачі нелінійного програмування з використанням методу ϕ -функцій. Запропоновано ефективний алгоритм розв'язання, який використовує гомотетичні перетворення еліпсоїдів і оптимізаційну процедуру, що дозволяє значно зменшити обчислювальні ресурси. Наведено результати чисельних експериментів.

Лл. 7. Бібліогр.: 9 назв.

УДК 519.854.2

Оптимізація лінійних функцій на циклічних перестановках на основі випадкового пошуку / І.В. Гребеннік, О.В. Баранов, О.С. Чорна, О.Є. Горбачова // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.33-38.

Розглянуто рішення задачі оптимізації лінійної функції з лінійними обмеженнями на множині циклічних перестановок. Запропоновано метод, заснований на ідеології випадкового пошуку. Допоміжна задача оптимізації лінійної функції без обмежень на множині циклічних перестановок розв'язана евристичним методом з використанням стратегії методу гілок і меж. Проведені обчислювальні експерименти.

Табл. 4. Бібліогр.: 14 назв.

УДК 004:519.713

Розумний кібер-університет – Cloud-mobile сервіси управління науково-освітніми процесами / В.І. Хаханов, С.В. Чумаченко, Є.І. Литвінова, О.С. Міщенко // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.39-44.

Запропонована кіберфізична система Smart Cyber University (CyUni), яка характеризується наявністю оцифрованого метричного простору регуляторних правил, точним моніторингом і активним кіберуправлінням науково-освітніми процесами, автоматичним генеруванням оперативних акторних впливів, незалежним від керівників прийняттям кібер-рішень з управління фінансовими, часовими та кадровими ресурсами, повним виключенням паперових носіїв з виробничих процесів. Вирішено завдання метричного оцінювання студентів, науковців, викладачів, структурних підрозділів, науки і освіти університету для оперативного і стратегічного кіберуправління ресурсами з метою досягнення затребуваної міжнародним ринком якості науково-освітніх сервісів.

Бібліогр.: 24 назви.

functions is used. Quasi- ϕ -functions and adjusted quasi- ϕ -functions for a pair of non-convex polytopes are constructed.

Fig. 3. Ref.: 7 items

UDC 519.85

Mathematical model and method of solving the problem of packing a homothetic same oriented ellipsoids / O.M. Khlud, I.O. Subota, T.E. Romanova // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P.27-32.

The paper studies the packing problem of homothetic the same oriented ellipsoids into a container of minimal volume. The container can be a rectangular parallelepiped or an ellipsoid. We formulate the model in the form of a nonlinear programming problem using of ϕ -function technique. We propose the efficient algorithm, which employes a homothetic transformation of ellipsoids and the optimization procedure, which allow us to reduce considerably computational costs. A several computational results are provided.

Fig. 7. Ref.: 9 items

UDC 519.854.2

Optimization of linear functions on the cyclic permutations based on random search / I.V. Grebennik, A.V. Baranov, O.S. Chernaya, E.E. Gorbacheva // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P.33-38.

The paper deals with the solution of the optimization problem of a linear function with linear constraints on the set of cyclic permutations. We propose a method that is based on the ideology of random search. The auxiliary task of optimization a linear function without restrictions on the set of cyclic permutations solved by heuristic method using the strategy of branch and bound method. Computational experiments were carried out.

Tab. 4. Ref.: 14 items.

UDC 004:519.713

Smart Cyber University - Cloud-mobile services management of scientific and educational processes / V.I. Hahanov, S.V. Chumachenko, Ye.I. Litvinova, O.S. Mishenko // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P.39-44.

Cyber physical system Smart Cyber University (CyUni) is proposed. It is characterized by the presence of a digitized metric space of regulatory rules, digital monitoring and active cyber management of scientific and educational processes, automatic generation of operational and regulatory actions, human free cyber decision making focused on management of financial and human resources, full elimination of paper from production processes. The problem of metric evaluation of students, scholars, teachers, structural units, science and education of the University is solved; it is focused on operational and strategic cyber management of resources to achieve the quality of scientific and educational services, requested by the international market. The task of scaling cyber management services is considered; it is aimed to a significant reduction in high school management spending, improving the efficiency of scientific and educational processes through the complete elimination of corruption, consolidation universities, cyber encouraging scientists and professors, creating market-demanded products.

Ref.: 24 items.

УДК004.822

Структурний підхід до пошуку природно-мовної інформації / Ю.І.Кисленко, Д.С.Сергеев // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.45-49.

Розглянуто можливості використання структурованого представлення природно-мовної інформації для покращення якості роботи пошуку у великому корпусі текстових даних, прикладом якого є мережа Інтернет. Показані випадки некоректної роботи статистичних алгоритмів пошуку, які часто повертають недостатньо повні, частково помилкові або взагалі нерелевантні результати на досить прості природно-мовні запити. Для кожного такого випадку надана оцінка можливості вирішення або спрощення вирішення відповідної проблеми за допомогою використання структурованої природно-мовної бази знань. Окремо розглянуто деякі проблеми класичних пошукових систем, що можуть бути вирішені за допомогою створення будь-якої структури над природно-мовною інформацією і не потребують використання окремих засобів обробки.

Лл. 5. Бібліогр.: 10 назв.

УДК65.012.226

Вплив турбулентного оточення на проект редевелопмента / О.С. Венгріна, Н.Г. Долгова // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.50-54.

Досліджені чинники дальнього та ближнього оточення проекту редевелопмента. Розглянуто вплив турбулентності на успіх проекту та визначено основні показники турбулентності: ступінь дії сили і відносна тривалість впливу турбулентності. Побудовано модель взаємовпливу оточення в процесі взаємодії з проектом, яка дозволяє імітувати ситуації виникнення турбулентності в оточенні проекту редевелопмента.

Табл. 4. Лл. 3. Бібліогр. 12 назв.

УДК004.9

Модифікації методу спрямованого перебору для реінжинірингу топологічних структур систем великомасштабного моніторингу / В.В. Безкоровайний, К.Є. Подоляка // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.55-61.

Для вирішення завдання реінжинірингу топологічних структур централізованих трирівневих систем великомасштабного моніторингу запропоновані модифікації методу спрямованого перебору варіантів за кількістю вузлів в системі. Отримано оцінки їх точності і часової складності. Базова модифікація методу дозволяє отримувати точне рішення і має на третину меншу часову складність в порівнянні з відомим методом спрямованого перебору.

Табл. 2. Бібліогр. : 32 назв.

УДК519.87

Про один клас технічних систем з конкурентною взаємодією / Валід Ахмед Махмуд Альрефай // *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №3. С.62-66.

Розглянуто динамічні моделі насосних агрегатів і станцій в нафто- і газопровідних багатозв'язаних мережах та моделі ЖКГ в їх динамічних режимах. Показано, що складні зворотні зв'язки підсистем природно розглядати з позиції їх нелінійної конкуренції. Запропоновано методи побу-

UDC004.822

A structural approach to natural-language search / Y.I.Kyslenko, D.S.Sergeiev // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P. 45-49.

This article considers the possibility of using a structured representation of natural language information to improve the quality of text search in large corpora of natural language data, one of them being the Internet. The second part of the article uses classical search systems to demonstrate improper work of the statistical search algorithms that result in incomplete, inaccurate or irrelevant response to some types of queries. The feasibility of using the proposed structure of natural language knowledge base is estimated for each of these cases. The errors that can be fixed via attaching of any structure to the natural language data are considered separately.

Fig. 5. Ref.: 10 items.

UDC65.012.226

The impact of turbulent environment for the redevelopment project / E.S. Vengrina, N.G. Dolgova // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P. 50-54.

This work is devoted to the researching of the factors close and distant environment of the redevelopment project. It was investigated the effect of turbulence on the success of the project and determined the main indexes of turbulence: the degree of impact and time of impact of the turbulence. The model describing degree of impact environment on the project is developed. The model enable to simulate a situation of turbulence in redevelopment project.

Tab. 4. Fig. 3. Ref.: 12 items.

UDC004.9

Modifications of the method of directed enumeration for reengineering of topological structures of large-scaled monitoring systems / V.V. Bezkorovainyi, K.E. Podoliaka // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P. 55-61.

To solve the problem of reengineering the topological structures of centralized three-level large-scaled monitoring systems proposed modification of the method of directed enumeration of options for the number of nodes in the system. The estimates of their accuracy and time complexity. Basic modification of the method allows to obtain the exact solution and has one-third less time complexity compared with the known method of directed enumeration.

Tab. 2. Ref.: 32 titles

UDC519.87

One class of technical systems with competitive interaction / Waleed Ahmed Mahmoud Alrefai // *Radioelektronika i informatika*. 2015. N 3. P. 62-66.

We consider dynamic models of pumping units and stations in oil and gas pipelines of multiply connected networks and urban economy units models in their dynamic modes. It is shown that complex feedbacks in subsystems are natural to be considered in the perspective of their non-linear competition. The methods of constructing a "soft" system for competitive models, linear and nonlinear. It is shown that

дови “м’яких” моделей конкурентних систем, лінійних і нелінійних. Показано, що стабільне зростання на скінченному проміжку часу може змінитися квазі-хаотичним рухом навіть в лінійній системі з двома взаємодіючими акторами. Наведені значення параметрів і чисельні експерименти, що підтверджують конструктивність даного підходу.

Лл. 6. Бібліогр. 7 назв.

stable growth on a finite time interval can change to quasi-chaotic traffic even in the linear system with two interacting actors. The values of parameters are found in numerical experiments that confirm this constructive approach.

Fig. 6. Ref.: 7 items.

ПРАВИЛА

оформления рукописей для авторов
научно-технического журнала

"Радиоэлектроника и информатика"

Тематика: радиотехника; электроника; телекоммуникации; компьютерные науки; компьютерная инженерия и техническая диагностика; системы и процессы управления; информационные технологии в науке, образовании, культуре, медицине, экономике, экологии, социологии.

Формат страницы — А4 (210x297 мм), поля: сверху — 15, справа, слева, снизу — 20 мм. Количество колонок — 2, интервал между ними — 5 мм. Редактор: Pagemaker 6.0 (можно, но нежелательно Word), гарнитура Times ET (Times New Roman Cyr), кегль — 10 пунктов, межстрочное расстояние — 110%, табуляция — 5 мм.

Объем рукописи — от 2 до 10 с. (языки: русский, украинский, английский). Текст рукописи должен быть структурирован и содержать все *основные части, характерные для научной статьи*: **введение** (отражает *актуальность*, формулирование *цели и задач* исследования); **сущность** (изложение основного материала исследования с описанием идеи, метода, и обоснованием полученных научных результатов); **выводы** (отражают результаты исследования, их *научную новизну* и *практическую значимость*, сравнение с лучшими аналогами, перспективы).

Структура рукописи: заголовок, аннотация, текст, литература, реферат (на украинском и английском языках), сведения об авторах.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ

УДК519.713

НАЗВАНИЕ РУКОПИСИ

ФАМИЛИЯ И.О.

(Название желаемого раздела тематики)

Аннотация (на языке статьи, абзац 5-10 строк, кегль 9) помещается в начале статьи и содержит информацию о результатах описанных исследований.

Основной текст можно разделять на 2 и более подразделов с заголовками, выделенными полужирным шрифтом, пронумерованными арабскими цифрами, как показано в следующей строке.

1. Название раздела

Рисунки и таблицы (черно-белые, контрастные) помещаются в текст после первой ссылки в виде *переносимых объектов* и отдельно нумеруются, при наличии более одного рисунка (таблицы), арабскими цифрами. Рисунок содержит подрисовочную центрированную подпись под иллюстрацией (вне рисунка), как показано на рис. 1.

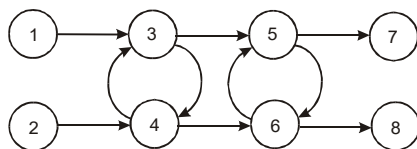


Рис. 1. Граф с контурами

Табличный заголовок располагается справа над таблицей (вне таблицы), что иллюстрируется табл. 1. Редакторы: CorelDraw, Table Editor, Excel.

Таблица 1

Шаг i	1	2	3	4	5	6
Φ1(1,3)	1	2	2	4	6	1

Формулы нумеруются при наличии ссылок на них в рукописи. Формулы, символы, переменные, встречающиеся в тексте, должны быть набраны как объекты Microsoft Equation. Рекомендуемая высота формульных кеглей: переменная — 10 пунктов, индекс — 8, над- и подиндекс — 8, основной (индексный) математический символ — 12(10):

$$F_{i+i} = \sum_{i=1}^k F_j^i - \prod_{j=1}^{1+h} P_{R_{j+i}} + F^{j-1} + X^{\sum n^k} \quad (1)$$

Формат переменных (желательно не курсивом — без наклона) в тексте и формулах должен быть идентичным. В тексте над- и подиндексы составляют 70 % от высоты кегля, которые рекомендуется опускать (поднимать) на 17 (33) % относительно основной строки.

Литература (включает опубликованные источники, на которые имеются ссылки в тексте, заключенные в квадратные скобки) печатается без отступа, кегль 9 пунктов.

Образец окончания текста рукописи (литература, сведения об авторах, реферат) представлен ниже.

Литература: 1. *Фамилия И.О.* Название книги. Город: Издательство, 1900. 000 с. 2. *Название сборника / Под ред. И.О. Фамилия.* Город: Издательство, 1900. 000 с. 3. *Фамилия И.О.* Название статьи // Название журнала. Название серии. 1997. Т. 00, № 00. С. 00-00.

Поступила в редколлегию 00.00.00

Рецензент: должность, ученая степень, Фамилия, И.О.

Фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность и место работы. Научные интересы. Увлечения и хобби. Адрес, контактные телефоны.

Рефераты представляются на украинском и английском языках.

УДК 000.000.00

Назва статті /Ініціали. Прізвище // **Радиоэлектроника та информатика.** 2000. № 00. С. 00-00.

Текст реферату.

Табл. 00. Лл. 00. Бібліогр.: 00 назв.

UDC 000.000.00

Title of paper /Initials. Surname // **Radioelektronika i informatika.** 2000. N 00. P. 000-000.

Text.

Tab. 00. Fig. 00. Ref.: 00 items.

Представление материалов

Рукопись, рефераты, сведения об авторах — в одном файле, *поименованном фамилией автора*, на дискете 3,5 дюйма. Твердая копия материалов — для граждан Украины — в одном экземпляре: рукопись, подписанная авторами, рефераты, акт экспертизы, внешняя рецензия, подписанная доктором наук, заявление на имя главного редактора со сведениями об авторах.

Адрес редакции: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, ХНУРЭ, комната 321, тел. 70-21-326, e-mail: ri@kture.kharkov.ua; hahanov@kture.kharkov.ua. <http://www.ewdtest.com/ri>

Рекомендовано Ученым советом Харьковского национального университета радиоэлектроники (протокол № 1 от 27.09.2015)

Підписано до друку 27.09.2015. Формат 60x84¹/₈.

Умов. друк. арк. 10,8. Зам. № б/н. Тираж 300 прим. Ціна договірна.

Віддруковано у СПД ФО Степанов В.В.

61168, Харків, Акад. Павлова, 311.