

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Одеський національний політехнічний університет

ІНФОРМАТИКА ТА МАТЕМАТИЧНІ  
МЕТОДИ В МОДЕЛЮВАННІ

INFORMATICS AND MATHEMATICAL  
METHODS IN SIMULATION

Том 6, № 4

Volume 6, No. 4

Одеса – 2016  
Odesa – 2016

Журнал внесений до переліку наукових фахових видань України  
(технічні науки)  
згідно наказу Міністерства освіти і науки України № 463 від 25.04.2013 р.

**Виходить** 4 рази на рік

**Заснований** Одеським національним  
політехнічним університетом у 2011 році

**Свідоцтво** про державну реєстрацію  
КВ № 17610 - 6460Р від 04.04.2011р.

**Головний редактор:** *Г.О. Оборський*

**Заступник головного редактора:**

*А.А. Кобозєва*

**Відповідальний редактор:**

*Г.В. Ахмаметєва*

**Редакційна колегія:**

*Т.О. Банах, П.І. Бідюк, Н.Д. Вайсфельд,  
А.Ф. Верлань, Г.М. Востров, В.Б. Дудикевич,  
Л.Є. Євтушик, М.Б. Копитчук, С.В. Ленков,  
І.І. Маракова, А.Д. Мілка, С.А. Нестеренко,  
М.С. Никитченко, С.А. Положаєнко,  
О.В. Рибальський, Х.М.М. Рубіо, В.Д. Русов,  
І.М. Ткаченко-Горський, А.В. Усов,  
В.О. Хорошко, М.Є. Шелест, М.С. Яджак*

**Published** 4 times a year

**Founded** by Odessa National Polytechnic  
University in 2011

**Certificate** of State Registration

КВ № 17610 - 6460P of 04.04.2011

**Editor-in-chief:** *G.A. Oborsky*

**Associate editor:**

*A.A. Kobozeva*

**Executive editor:**

*A.V. Akhmametiєva*

**Editorial Board:**

*T. Banakh, P. Bidiuk, V. Dudykevich,  
L. Evtushik, V. Khoroshko, N. Kopytchuk,  
S. Lenkov, I. Marakova, A. Milka, S. Nesterenko,  
N. Nikitchenko, S. Polozhaenko, J. Rubio,  
V. Rusov, O. Rybalsky, M. Shelest,  
I. Tkachenko Gorski, A. Usov, N. Vaysfeld,  
A. Verlan, G. Vostrov, M. Yadzhak*

**Друкується** за рішенням редакційної колегії та Вченої ради Одеського національного  
політехнічного університету

**Оригінал-макет** виготовлено редакцією журналу

---

**Адреса редакції:** просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

Телефон: +38 048 705 8506

Web: <http://immm.opu.ua>

E-mail: [immm.ukraine@gmail.com](mailto:immm.ukraine@gmail.com)

**Editorial address:** 1 Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine

Tel.: +38 048 705 8506

Web: <http://immm.opu.ua>

E-mail: [immm.ukraine@gmail.com](mailto:immm.ukraine@gmail.com)

© **Одеський національний політехнічний університет, 2016**

---

## ЗМІСТ / CONTENTS

---

- ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ТЕСТОВИХ ГІПОТЕЗ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ  
А.А. Верлань, Ю. Стертен,  
С.А. Положаєнко
- 315 FORMALIZED REPRESENTATION SEQUENCES OF TEST HYPOTHESES IN THE DIAGNOSIS OF ELECTRONIC CIRCUITS  
Verlan A., Sterten Yu., Polozhaenko S.
- ТРАНСФОРМАЦІЯ ПАРАДИГМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА СОЦІАЛЬНО-ПСИХОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ  
(Частина 2)  
С.О. Гнатюк, В.О. Гнатюк,  
В.Г. Кононович, І.В. Кононович
- 322 TRANSFORMATION OF INFORMATION AND SOCIAL-PSYCHOLOGICAL SECURITY PARADIGMS (Part 2)  
Gnatyuk S., Gnatyuk V., Kononovich V., Kononovich I.
- РОЗРОБКА МОДЕЛІ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКА ОТКАЗІВ КОМПОНЕНТІВ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ  
В.В. Вичужанін, М.Д. Рудніченко
- 333 DEVELOPMENT OF THE NEURAL NETWORK MODEL FOR PREDICTION FAILURE RISK'S OF THE COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS COMPONENTS  
Vichuzhanin V., Rudnichenko N.
- СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА У СТЕЖАЧІЙ СИСТЕМІ З АСТАТИЗМОМ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ  
С.О. Бобріков, Е.Д. Пичугин,  
Н.Н. Дикий
- 339 SYNTHESIS AND DESIGN OF DIGITAL REGULATOR IN SERVOSYSTEM WITH ASTATISM OF THE THIRD ORDER  
Bobrikov C., Pichugin E., Dikiy H.
- ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ НА ПІДСТАВІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ  
М.С. Яджак, О.Д. Поліщук,  
М.І. Тютюнник
- 347 THE OPTIMIZATION OF METHODS OF COMPLEX EVALUATION FOR COMPLEX SYSTEMS ON THE BASE OF PARALLEL COMPUTATIONS  
Yadzhak M., Polishchuk O., Tyutyunnyk M.
- МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ФАКТУ СТИСКУ У ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА СТЕГАНОВАНАЛІЗУ  
Г.В. Ахмаметьєва
- 357 METHOD OF DETECTION THE FACT OF COMPRESSION IN DIGITAL IMAGES AS AN INTEGRAL PART OF STEGANALYSIS  
Akhmametieva A.

ФОРМАЛІЗОВАНА МАТЕМАТИЧНА  
МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АДАПТИВНОГО  
ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ  
ЗА СТАНОМ СКЛАДНОЇ  
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ  
Є.С. Ленков, Г.Б. Жиров,  
Т.В. Бондаренко

365

FORMAL MATHEMATICAL MODEL  
OF ADAPTIVE MAINTENANCE  
DIFFICULT RADIO ELECTRONIC  
TECHNIQUE  
Lenkov E., Zhyrov G., Bondarenko T.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ З  
РОЗРИВНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ У  
ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ ЗА  
УМОВИ НЕТОЧНИХ ВИХІДНИХ  
ДАНИХ  
С.А. Положаєнко, В.С. Савіч

372

MATHEMATICAL MODELLING OF  
FILTERING WITH DISCONTINUOUS  
COEFFICIENTS IN HETEROGENEOUS  
SYSTEM IN TERMS OF  
UNCERTAINTY OF THE INPUT DATA  
Polozhaenko S., Savich V.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ  
ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ  
СКЛАДНОГО ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО  
ОБ'ЄКТУ БЕЗ УРАХУВАННЯ ЙОГО  
СТРУКТУРИ  
І.В. Толок

379

MATHEMATICAL MODEL OF  
TECHNICAL MAINTENANCE OF  
DIFFICULT REFURBISHABLE OBJECT  
WITHOUT ACCOUNT OF HIS  
STRUCTURE  
Tolok I.

ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МОДЕЛІ  
АЛГОРИТМІВ ПОКРИТТЯ  
О.Н. Паулін

385

COMPUTATIONAL MODELS OF  
COVERAGE ALGORITHMS  
Pauline O.

РОЗПОДІЛ ГАРМОНІК НА ДІЛЯНЦІ  
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРИ  
НАЯВНОСТІ ГЕНЕРУЮЧИХ  
УСТАНОВОК, ЩО ПАРАЛЕЛЬНО  
ПРАЦЮЮТЬ З МЕРЕЖЕЮ  
О.В. Бялобржеський, Н.Г. Чередник

397

DISTRIBUTION OF HARMONICS ON  
POWER CONSUMPTION SECTION IN  
THE PRESENCE OF GENERATING  
UNITS THAT WORK IN PARALLEL  
WITH THE NETWORK  
Bialobrzheskyi O., Cherednyk N.

# ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТЕСТОВЫХ ГИПОТЕЗ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

А.А. Верлань<sup>1</sup>, Ю. Стертен<sup>1</sup>, С.А. Положаенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Норвежский университет науки и технологий,  
NTNU Gjøvik, Teknologiveien 22, 2815 Gjøvik, Norway; e-mail: andriy.verlan@ntnu.no

<sup>2</sup> Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: polozhaenko@mail.ru

Разработана процедура формализованного представления последовательности пробных (тестовых) гипотез в ходе проверки исправности электронных устройств при их декомпозиции на подсхемы. Процедура доведена до практического алгоритма, обеспечивающего эффективный (с точки зрения минимизации трудоемкости) поиск неисправных подсхем электронного устройства.

**Ключевые слова:** электронное устройство, подсхема, диагностика, тестовая гипотеза, обучающая последовательность, алгоритм локализации неисправности

## Введение

В литературе известен [1, 2] и нашел практическое применение [3] при диагностике электронных устройств (ЭУ) метод обучающих проверочных характеристик (ОПХ), который заключается в поочередной проверке гипотез о неисправности подсхем ЭУ.

При этом важным ограничением на проверяемые подсхемы, входящие в состав ЭУ, является количество их полюсных узлов, которое должно быть не больше числа измеряемых сигналов. Так как количество подсхем, полученных в результате разбиения схемы ЭУ на подсхемы, с таким ограничением может быть достаточно велико, то и перебор всех гипотез получается весьма трудоемким. Поэтому целесообразно сформировать последовательность проверки гипотез, позволяющую избежать перебора всех подсхем.

Наиболее естественной является такая последовательность проверки гипотез, при которой сначала проверяются самые большие (в некотором смысле подсхемы). После определения неисправной из них, проверке подвергаются большие, вложенные в предыдущие, и так далее. Т.е. таким образом, достигается направленный поиск неисправной области.

## Цель работы

Целью работы является выполнение формализации процесса получения последовательности тестовых гипотез определения неисправной подсхемы ЭУ и разработка алгоритма ее локализации.

## Основная часть

Введем понятие размера подсхем и отношения вложенности между ними.

Пусть электрическая схема ЭУ задана с помощью графа  $G(V, E)$ , где  $V$  и  $E$  соответственно множества вершин и ребер графа. Тогда подсхеме  $S_i^0$  будет соответствовать подграф  $G_i^0(V_i^0, E_i^0)$ , а остальной части схемы (иначе подсхеме  $S_i^1$ ) –  $G_i^0(V_i^0, E_i^0)$  такие, что

$$V_i^1 \subset V; V_i^0 \subset V; V_i^1 \cup V_i^0 = V; V_i^1 \cap V_i^0 = V_i^p, \quad (1)$$

$$E_i^1 \subset E; E_i^0 \subset E; E_i^1 \cup E_i^0 = E; E_i^1 \cap E_i^0 = \phi \quad (2)$$

где  $V_i^p$  – множество полюсных узлов подсхемы  $S_i^0$ .

Разобьем множество обучающих узлов  $N_{об}$  на два подмножества:

$$\begin{aligned} N_{об,i}^0 &\subset V_i^0, \\ N_{об,i}^1 &\subset V_i^1, \\ N_{об,i}^0 \cup N_{об,i}^1 &= N_{об}. \end{aligned}$$

Тогда число полюсов подсхемы  $S_i^0$  должно удовлетворять условиям:

$$\text{card} V_i^p - 1 \leq \text{card} N_{об,i}^1, \quad (3)$$

где

$$N_{об,i}^1 \cap N_{об,i}^0 = \phi.$$

Обозначим через  $M^0 = \{S_i^0\}$  множество всех возможных подсхем проверяемой цепи. Такое множество можно получить, например, рассматривая всевозможные комбинации узлов. Отбирая из  $M^0$  подсхемы, удовлетворяющие (3), мы получим множество  $M$  подсхем, которые могут быть проверены при имеющемся наборе доступных узлов

$$M = \{S_i^0 : \text{card} V_i^p - 1 \leq \text{card} N_{об,i}^0\}.$$

Рассмотрим ребро графа  $e = (v_j; v_k)$ . Из (1) и (2) следует, что

$$\begin{aligned} \text{если } e \in E_i^1, & \quad \text{то } v_j \in V_i^1, v_k \in V_i^1 \\ \text{если } e \in E_i^0, & \quad \text{то } v_j \in V_i^0, v_k \in V_i^0 \end{aligned} \quad (4)$$

Иначе говоря, подсхема  $S_i^1$  при таком ее определении полностью определяется вершинами своего графа, т.е.

$$\text{если } v_j \in V_i^1, v_k \in V_i^1, \text{ то } y = (v_j; v_k) \in E_i^1. \quad (5)$$

Большинство элементов ЭУ может быть представлено при помощи двухполюсных элементов, соединенных в соответствии с их схемами замещения [4-7]. Однако разбиение схем на подсхемы должно производиться без разбиения схем замещения на составные части, так как физически возможна замена только неисправного элемента целиком.

Для схем ЭУ, содержащих многополюсные элементы, вместо понятия ветвь будем использовать понятие элемент, характеризующийся тем, что он может быть инцидентен более чем двум узлам. Тогда будем считать, что элемент  $q = (v_j, \dots, v_k)$  включается в подсхему  $S_i^1$ , если  $\forall v_j, v_k \in V_i^1$ . В противном случае,  $q \in S_i^0$ . Т.е. состав подсхемы  $S_i^1$  в схеме, содержащей многополюсные элементы, тоже будет полностью определяться множеством ее узлов  $V_i^1$ .

Под размером  $\mu_i^1$  подсхемы  $S_i^1$  будем понимать количество ее узлов, т.е.

$$\mu_i^1 = \text{card}V_i^1. \quad (6)$$

Будем говорить, что подсхема  $S_i^1$  больше подсхемы  $S_j^0$ , если

$$\mu_i^1 > \mu_j^0.$$

Подсхему  $S_j^0$  будем называть *вложенной* в подсхему  $S_i^1$ , если

$$V_j^0 \subset V_i^1,$$

и будем обозначать это как  $S_j^0 \subset S_i^1$ .

Введем понятие о некоторых операциях над подсхемами.

Пусть  $M^* = \{S_k^*\}$  и  $M^{**} = \{S_k^{**}\}$  — множества всех вложенных подсхем для двух произвольных проверяемых цепей ( $\forall M^*, M^{**} \subset M$ ).

Объединением подсхем  $S_i^1$  и  $S_j^0$  будем называть подсхему  $S_k^*$ , такую, что

$$V_i^1 \cup V_j^0 = V_k^*,$$

и будем обозначать  $S_k^* = S_i^1 \cup S_j^0$ .

Пересечением подсхем  $S_i^1$  и  $S_j^0$  будем называть подсхему  $S_k^{**}$ , такую, что

$$V_i^1 \cap V_j^0 = V_k^{**},$$

и будем обозначать  $S_k^{**} = S_i^1 \cap S_j^0$ .

Очевидно, что

$$S_i^1 \cup S_j^0 \subset M^* \subset M,$$

$$S_i^1 \cap S_j^0 \subset M^{**} \subset M.$$

Однако эти соотношения не выполняются для множества  $M$ , что связано с необходимостью выполнения условия (3).

Следует отметить, что если  $S_j^0 \subset S_i^1$ , то неисправность  $S_j^0$  влечет за собой и неисправность  $S_i^1$ . Поэтому подсхемы  $S_j^0$  и  $S_i^1$  являются неразличимыми относительно множества обучающих узлов  $N_{об}^1$ . Другими словами, вложенность двух подсхем является достаточным условием их неразличимости. Это позволяет избежать проверки гипотез для группы заведомо неразличимых подсхем. Таким образом, сначала необходимо проверить гипотезы о неисправности максимальных подсхем. Эти подсхемы образуют множество  $M^1 \subset M$  такое, что

$$M^1 = \{S_i^1 : \forall i \exists S_k^* \subset M \ S_i^1 \subset S_k^* \ i \neq k\}, \quad (7)$$

т.е.  $S_i^1$  уже не вложены ни в какие подсхемы из  $M$ .

После определения неисправной подсхемы  $S_i^1$  производится проверка гипотез для максимально больших вложенных в нее подсхем, образующих множество  $M_i^1$ :

$$M_i^1 = \{S_j^0 : \forall j \exists S_k^* \subset M_i^1 : S_j^0 \subset S_k^* \ j \neq k\},$$

т.е.  $S_j^0$  уже не вложены ни в какие подсхемы из  $M_i^1$ .

При проверке гипотез на каждом этапе разбиения возможны следующие случаи:

Случай 1. Принимается одна гипотеза. В этом случае производят разбиение неисправной подсхемы на максимально большие подсхемы и осуществляют для них проверку гипотез.

Случай 2. Принимается несколько гипотез о неисправности пересекающихся подсхем, имеющих общую часть, которую и считают зоной неисправности. В этом случае одну из неисправных подсхем разбивают на максимально большие вложенные подсхемы, и гипотезы проверяют для тех подсхем, которые пересекаются с зоной неисправности.

Случай 3. Принимается несколько гипотез о неисправности подсхем, не имеющих одной общей для всех них части. В этом случае производят разбиение всех подсхем, соответствующих принятым гипотезам, а результаты проверяемых гипотез рассматриваются совместно.

Случай 4. Ни одна из рассматриваемых гипотез не принимается. В этом случае процесс локализации заканчивается констатацией неисправности подсхем, полученных на предыдущем шаге разбиения.

Алгоритм локализации неисправности приведен на рис. 1.

Использование численных методов для решения систем уравнений определяет специфику алгоритма принятия решения для каждой гипотезы. В результате моделирования схемы при проверке гипотезы решение может сходиться или расходиться. Если решение сходится, то по вычисленным значениям оценок величин проверочных сигналов принимают решение о принятии или отбрасывании рассматриваемой гипотезы. Причиной же расхождения процесса решения может быть как не соответствие самой рассматриваемой гипотезы фактической неисправности (что соответствует отбрасыванию гипотезы), так и неудачно выбранное начальное приближение, использованное при моделировании. Поэтому сначала ведут поиск неисправной подсхемы, анализируя лишь те гипотезы, для которых удастся получить решение. Если точность локализации неисправности оказывается неудовлетворительной, то изменяя начальное приближение или используя другие численные методы, пытаются получить решение и для других гипотез, которые, в случае успеха, включают в рассмотрение.

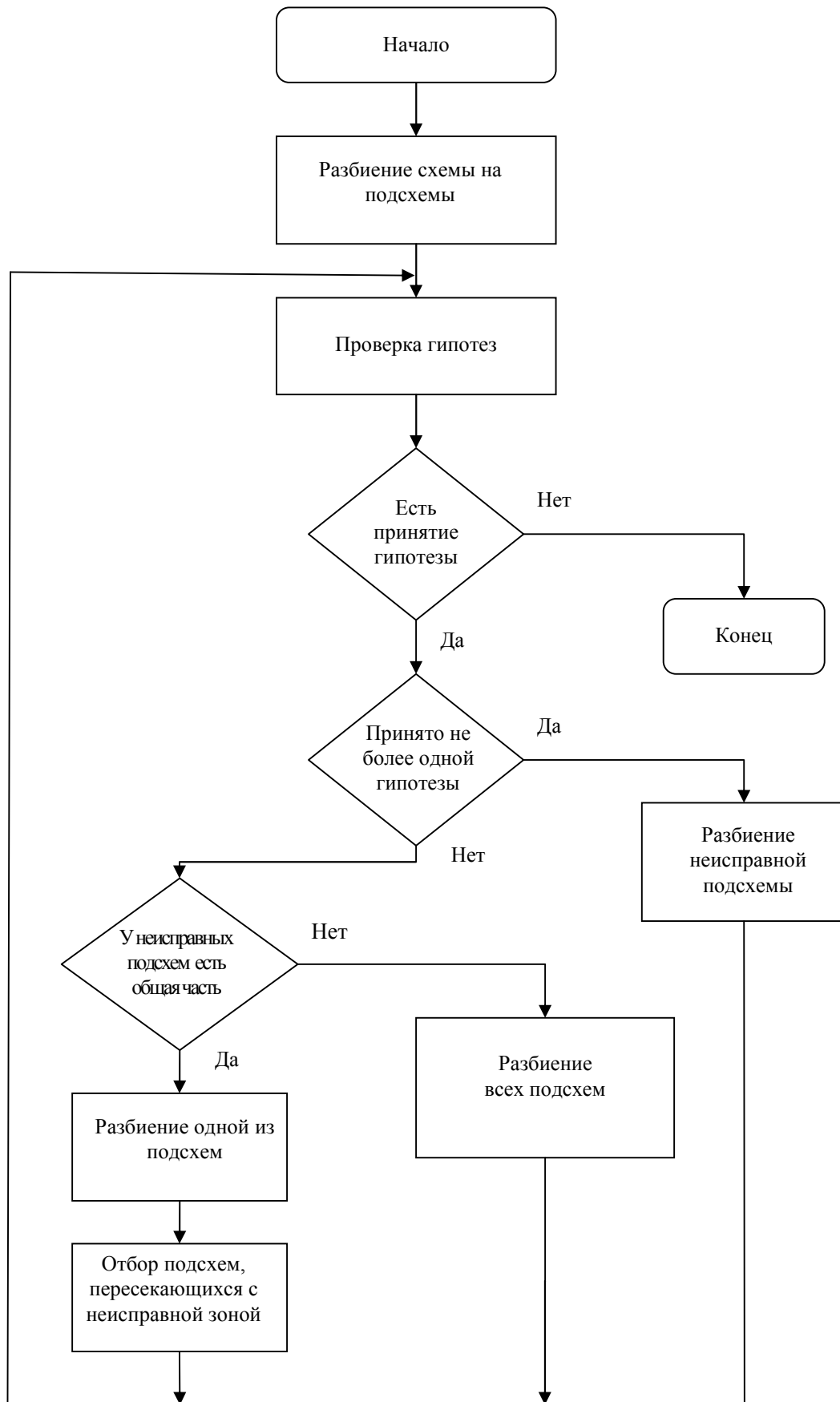


Рис. 1. Алгоритм локализации неисправности подсхем ЭУ

Для снижения количества рассматриваемых подсхем может быть рекомендовано, ограничиваться лишь связными подсхемами. При этом для исключения экспоненциальной зависимости времени решения задачи разбиения схемы на подсхемы также следует применять эвристический подход, который заключается в том, что разбиение ЭУ на подсхемы, их анализ и выделение максимально больших подсхем производится не для всей цепи, а для ее отдельных частей, называемых блоками.

## Выводы

Предложена конструктивная процедура и реализующий ее алгоритм формализованного представления процесса получения последовательности тестовых гипотез определения неисправной подсхемы ЭУ. Процедура позволяет исключить при диагностике полный прямой перебор всех подсхем ЭУ и, тем самым, сократить трудоемкость поиска неисправной подсхемы.

## Список литературы

1. Андрусевич, А.А. Синтез тестопригодных схем путем устранения функционально-структурной избыточности [Текст] / А.А. Андрусевич, И.Ш. Невлюдов, М.А. Бережная, М.Г. Рыжикова, Я.Ю. Королева // Вестник Академии инженерных наук Украины. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Жуковского «ХАИ». - 2006. - №3 (30). - С. 188-192.
2. Андрусевич, А.А. Синтез системы автоматизированной диагностики цифровых модулей технологического оборудования [Текст] / А.А. Андрусевич, И.Ш. Невлюдов, Б.А. Шостак // Вісті Академії Інженерних наук України. - 2004. - №4(24). - С. 125-132.
3. Скобцов, Ю.А. Генерация тестов для последовательностных схем с использованием кратной стратегии наблюдения выходных сигналов / Ю.А. Скобцов, В.Ю. Скобцов, Ш.Н. Хинди // Науковий вісник Чернівецького університету. – (Серія «Фізика. Електроніка»). – 2008. – Вип. 423. – С. 29 – 36.
4. Влах, И. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем / И. Влах, К. Сингхал. – М.: Радио и связь, 2007. – 560 с.
5. Чуа, Л.О. Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы / Л.О. Чуа, П.-М. Лиин. – М.: Энергия, 2008. – 640 с.
6. Blum, C. Swarm Intelligence in Optimization. Introduction and Applications. Natural Computing Series / C. Blum, Li Xiaodong. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – P. 43-85.
7. Diaz, E.A. Tabu Search Algorithm for Structural Software Testing Computers / E. Diaz, J. Tuya // Operations Research. – 2008. – No. 35 (10). – P. 3052-3072.

**ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ТЕСТОВИХ ГІПОТЕЗ ПРИ  
ДІАГНОСТУВАННІ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ**

А.А. Верлань<sup>1</sup>, Ю. Стертен<sup>1</sup>, С.А. Положаєнко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Норвезький університет науки та технологій,  
NTNU Gjøvik, Teknologiveien 22, 2815 Gjøvik, Norway; e-mail: andriy.verlan@ntnu.no

<sup>2</sup> Одеський національний політехнічний університет,  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: polozhaenko@mail.ru

Розроблено процедуру формалізованого представлення послідовності пробних (тестових) гіпотез в ході перевірки працездатності електронних пристроїв при їх декомпозиції на підсхеми. Процедуру доведено до практичного алгоритму, який забезпечує ефективний (з точки зору мінімізації трудовитрат) пошук несправних підсхем електронного пристрою.

**Ключові слова:** електронний пристрій, підсхема, діагностика, тестова гіпотеза, навчаюча послідовність, алгоритм пошуку несправності

**FORMALIZED REPRESENTATION SEQUENCES OF TEST HYPOTHESES IN THE  
DIAGNOSIS OF ELECTRONIC CIRCUITS**

A. Verlan<sup>1</sup>, Yu. Sterten<sup>1</sup>, S. Polozhaenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Norwegian University of Science and Technology  
NTNU Gjøvik, Teknologiveien 22, 2815 Gjøvik, Norway; e-mail: andriy.verlan@ntnu.no

<sup>2</sup> Odesa National Polytechnic University,  
1 Shevchenko Str., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: savichsp@gmail.com

The procedure of formalized representation of a sequence of test hypotheses in the verifying operation of electronic devices when they are decomposing in the sub circuit. The procedure brought to a practical algorithm, providing an efficient (in terms of minimizing labour input) troubleshooting sub circuits electronic device.

**Keywords:** electronic device sub circuit, diagnostics, test the hypothesis, the training sequence, fault localization algorithm.

# TRANSFORMATION OF INFORMATION AND SOCIAL-PSYCHOLOGICAL SECURITY PARADIGMS

## (Part 2)

S. Gnatyuk<sup>1</sup>, V. Gnatyuk<sup>1</sup>, V. Kononovich<sup>2</sup>, I. Kononovich<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup>National Aviation University,  
Kosmonavta Komarova Ave, 1, Kyiv, 03680, Ukraine; E-mail: s.gnatyuk@nau.edu.ua

<sup>2</sup>Odessa National Polytechnic University,  
Shevchenko Ave, 1, Odessa, 65044, Ukraine; E-mail: vl\_kononovich@ukr.net

<sup>3</sup>Odessa National Academy of Food Technologies,  
Kanatna Str, 112, Odessa, 65039, Ukraine; E-mail: kononovich@mail.ru

---

In this part of paper presents the results of a retrospective analysis of transitional paradigm of information security: social-centric paradigm of citizens, society, state and national security; information and cyber security transformation summary; distribution of the relative importance of measures to secure information resources; paradigm of critical information infrastructure security under the information influence conditions; the system (technology) determining the identity and identity management definition; creating a «trusted» telecom space. The received in part 1 and 2 systematization and solving problems results allows to increase the work efficiency of information, cyber social and psychological security systems and formalize directions for further researches in developing effective security systems.

**Keywords:** information security, cybersecurity, information & communication system, individual & group mind, social-psychological security, legal framework, paradigm.

An introduction, review of previous works and purpose of this work, is placed in the previous number of magazine [1].

### **Social-centric paradigm of citizens, society, state and national security**

The next step 7 should serve as updating tasks IB components in the plane of the information and the information war confrontation and updating of a system of security behavior, individual and collective consciousness.

The system of national security and information security was developing for some time regardless of information security systems. The issues of social and psychological security at all stages effectively developed in the SSU, the military and other security agencies. Created significant amount of research, teaching, learning materials, and created practical working system. Regarding information security, the relevant government departments have ignored these issues. Especially because in Ukraine program of information was slowed, accumulated backlog. Thus, the introduction of «E-government» is now performed only with great obstacles.

Proposals authors on sociological and psychological security [2] also found almost no response. Then the new type of security was pointed because of the spread of information warfare operations and the emergence of the phenomenon of social media. The transition of mankind to its new type of social organization - the information society - naturally requires the development of new, so-called socio-centric paradigm of information security of state, public and private information production, which will occupy a leading position. German

military and political leader K. Clausewitz has spoken «War is the continuation of politics by other means». In the 21st century conclusions that «information warfare is the primary means of modern world politics, the dominant way to achieve political and economic power» [3]. There's information warfare is defined as «the way of the noosphere and the global information and psychological space to their advantage».

Massive computerization, introduction and development of information technology have led to the growth of information confrontation in the political sphere. Information management turned a decisive factor in winning, keeping and retention of power. The information is the main instrument of power. Information warfare, as the war is hot, has in its arsenal and immoral methods, deception, lies, half-truths, fraud, concealment and misrepresentation, etc. provocations.

The purpose of the information confrontation is a violation of information security of a hostile power, integrity and stability of its government and military control, effective information influence on leadership, political leadership (i.e., individuals who possess the greatest wealth, influence, highest status) systems, formation of public opinion and decision-making and providing of information security to gain an information advantage in information space.

In the field of information confrontation in world politics and open security of classified information is one of the decisive factors. According to the leading Chinese information warfare theorist Juan Shen Wei: «To secure the political security of the country, we must learn the information war using various media. In addition, the measures, necessary tools and technology were needed to secure against unauthorized adverse information and psychological impact» [3].

Information warfare, as a hot war, has in its arsenal many immoral practices, deception, lies, half-truths, facts of fraud, concealment, misrepresentation, manipulation, negativity, images and more. Certain types of information used to create myths or symbols that can be viable and effective. The symbol is the key to the formation of reality, the idea of building masses on how to organize life, where and why we must move. A striking example of modern myth and symbol are «Banderivets» value and power of influence which the specific individual conscience needs no comment.

In today's global information society, information weapons no less destructive than tanks and guns. It is very important who is present in the national information space. Threats are dangerous because such information and military capabilities, as television channels broadcasting foreign campaigns, Internet resources and printed media, military leaves, Internet sites of public and quasi-religious organizations and other means of anti-Ukrainian and anti-state propaganda.

Information attack can start with a surgical strike, and then the number and density of information content increases and anti-Ukrainian moves to brutal pressure information, the information carpet bombing and tactics of «scorched drain». When efficiency and effectiveness of interventions is insufficient information in the course of the enemy embarks on conventional weapons. Unfortunately it is fully realized to Ukraine.

To survive in the information confrontation for its own independent existence and the right to have his house on Earth as information, counter-weapons, and security for their own information and information resources are necessary. The war will end one day, there will be peace, but security issues remain.

The motto of the information society is competitiveness intellectual ability. In the information society more than half the time and human resources will be used for storage, processing, analysis and transmission of information. There is incredible acceleration of growth of human knowledge. In the 70 years of the 20th century the volume of human knowledge increased twice in 10 years, 80 years - every 5 years until the end of 90 years of knowledge of mankind doubled almost every year [3].

Acceleration of information processes, enhancing communicative interactions and the whole direction of increasing vitality of the individual, community, society, social systems, but also creates a new vulnerability. In modern conditions was the phenomenon of so-called «social media», whose role is important in the context of information and the confrontation of national security and in need of security. «A mature and stable information society characterized by the desire and the ability of the state to create conditions for free access of its citizens to information products, services and other resources, and ability to secure national information resources, the interests of the individual, society and state as a whole from internal and external negative impact» [4]. In this case the security of information resources necessary to ensure reliable, safe operation of the national information infrastructure, information production and their subsequent efficient development. In the information society, security issues are essentially complex. The goals and objectives of information security in order to merge and economic objectives (social and economic) security and resolved largely by using the same security mechanisms. An integral part of a comprehensive security information society will be and security of human capital as part of social and national security. To develop information security paradigm of information resources in the new information society where information is leading, it is necessary to analyze the changes in its environment, informational, industrial, technological, social, and economic. The development of this paradigm and concepts should be relevant to the planning stages of the transition to an information society. There is the emergence of new properties and information resources; transition information to perform its crucial role as an information product, product, raw material and product manufacturing information in the virtual reality of the information society. In the information production impact on information resources has the same effect as failures, accidents and sabotage in material production. It is advisable to address emerging security issues outpaced production information to the development of the information production of the future information society. Has developed a trend of security division into two parts. In [5] performed cybersecurity division constituents to secure their own information and intelligence sphere of information technologies and cryptographic warring parties. In a recent scientific publications stated the following division: «Analysis of recent research and publications shows that the nature of destructive information impact can be divided into two main types – Information Technology (aimed at disruption of the technical information tools) and information and psychological (Way to manipulate the subconscious mind and the person or certain social groups)» [6].

Accordingly there are two types of information control: information-technical and information-psychological. In the Information Technology combating the main objects of influence and security is information-technical systems, communication systems, telecommunications, electronic products and more. In the information-psychological struggle the main objects of influence and security is the mentality of the political elite, the staff of strategically important facilities and public systems, the formation of social consciousness, thought and decision-making, social objects, individuals, social groups, communities, society state, world community.

In modern conditions was the phenomenon of so-called «social media», whose role is important in the context of information confrontation and national security. Social information is a broader concept than with sociological information. Sociological information - documented or publicly announced information about the attitude of individuals and social groups to social events, phenomena, processes and facts. The sources of this information are information reflecting the results of polls, observations, and other sociological research. Unlike sociological information, social information directly functions in human society, playing the role of administering it in the processes of and interaction with the environment. The phenomenon of social media appears as communicative, attributive and functional components [4].

Communicative component of social media is a mean of establishing, organizing and implementing the interaction of information relations in their activities in terms of public relations and environment. Acceleration of information processes, enhance communicative and whole-directional interaction increases the vitality of the individual, community, society, social systems, but also creates a new vulnerability.

Attribution component of social media is to set the terms, definitions, rules, opinions, values, symbols, myths and other attributes of reality and life.

The functional component of social information needed for daily activities, work, analysis, decision making and meet the immediate physical, emotional, intellectual and psychological needs. Social information is divided into three types: the present, the past, the future. Social information may be prognostic (with functions: estimated, regulatory, warning) and planned. By type of social information can be internal and external, horizontal and vertical (straight - directive and regulatory inverse - control and reporting, including sociological). The functioning of social media characterized by the following features: For circulation levels: national, regional, continental and global; Time circulation: short, medium, long-term; For comments to media: positive, negative, neutral; The method of bringing information: through the media, through intelligence, through informal communication, through diplomatic sources through various businesses; In order to bring the information, persuasion, influence, Response, compromise, creating new values and rules for community or elite.

Social information is one of the leading roles in the formation of social capital, which plays an important role in human societies.

Social capital is called the amount of shared social values, those that really were shared – a set of informal values or norms shared by the members and allow them to interact. Social Capital plays a significant role in ensuring the effective functioning of society. Social capital is formed voluntarily, based on unwritten laws, formed by self-organization of social groups for its maintenance is not required the use of force or coercion by the state, it is a manifestation of social partnership.

Social capital creates scope lifestyle, reflects the way the voluntary cooperation of social groups and its members in the group. The system TIS social capital present in that part of the organizational measures related to work with staff, users and consumers of functional information security services. With the acceleration of technological progress and information is changing the level of manipulation people person becomes less secure, develop methods of social psychology and informational impact on people. Need to manage social capital and take into account the socio-political effects of social capital. Society and the state should pay more attention to securing the information a living and achieve victory in the information war, cruelty which built up.

### **Information and cyber security transformation summary**

In fact, in the process of transforming information security were introduced new activities to ensure information security and create new types of information security, cyber security and socio-psychological security. Older types of information security are preserved, improved and occupy every niche in the system of national security. Table 1 shows how the changed significance solved security problems old and new systems of information security.

The sheer volume of work for the security of information security increased significantly after increasing volumes of information technology. But the relative weight problems solved shifted towards the socio-psychological, ethical and aesthetic aspects of information security. According to others the relative weight of information security issues relating to the human factor (in this case organizational + psychosocial measures).

**Table 1.**

Distribution of the relative importance of measures to secure information resources (in %)

Years	Arrangements, regulations	Cryptographic measures	Technical & physical measures, %	Software-technical measures	Socio-psychological measures
2000	40	30	30	–	–
2005	30	30	30	10	–
2010	30	30	10	30	–
2015	20	10	10	20	40

### **Paradigm of critical information infrastructure security under the information influence conditions**

Today are current the tasks of implementing the strategy of cybersecurity Ukraine. One of the main objectives is the security of critical information infrastructures. Under the critical information infrastructure understanding the information infrastructure of the state, disabling or destruction of objects which is detrimental to national security or harm its international image. The development of global information security technology is in global information space, cyber medium, the Internet. The role of telecommunications critical physical and information resources of the state is growing. The need of certain functions and services for the benefit of e-government, electronic document management, digital signature, the development of electronic commerce and so on is realizing.

In the field of network security (telecommunications and other infrastructures) warring parties seek to technically break the channels of information make it difficult or change processing algorithms, steal, damage or change information in the field of storage. In this area running-extensive system of secure measures. It should take into account the paradigm of 4 stages, which considered the paradigm of information security and other mainly information and communication networks as the most critical public resource. But today is acknowledged that the confrontation with violators of information security and cybercrime is not yet won. At the forefront properties availability and integrity, as indicators of sustainable and effective functioning of the systems.

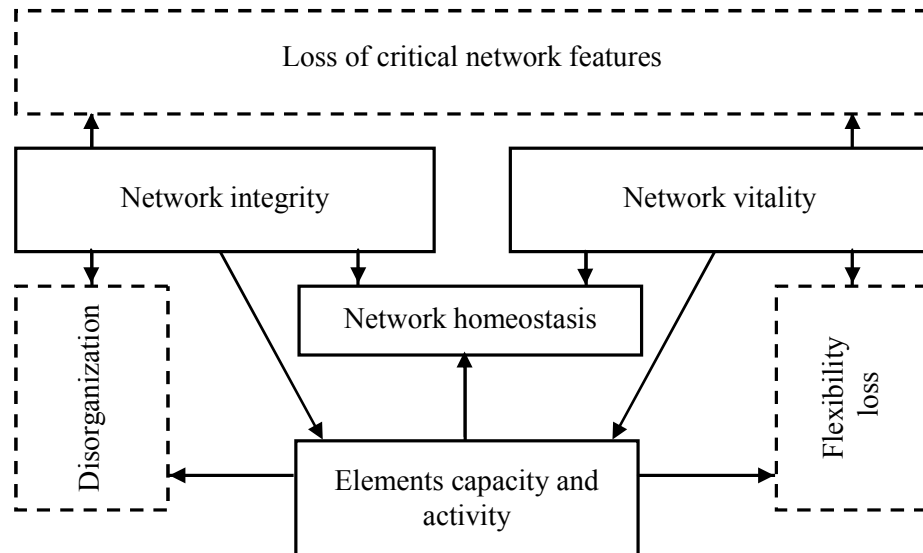
«Network - centric paradigm clarifies and expands the classic evaluation criteria and strategies for information security, conceptual approach «warranty information» (information assurance) for security of information resources, information security is linked directly to security infrastructure» [7].

The current paradigm of information security developed in the US, and what still needs to develop and implement in Ukraine, considering information systems as fundamentally open, where synergy homeostasis (stable state of equilibrium) is determined by the balance of entropy (a measure of uncertainty) margin environment and survivability elements. Paradigm provides especially high demands on the survivability of information systems, which are characterized by a high degree of decentralization of resource allocation and management.

The role of technical operation is to ensure the preservation requirements to a minimum set of features critical to the survivability of information systems to the security factor by the action of destabilizing factors of the environment. «Homeostasis communications network supports the provision of network integrity, its vitality, bandwidth and active elements (Fig. 1), violation of the integrity and survivability of the network results in loss of critical functions; significant reduction in capacity, activity and vitality elements leads to a loss of flexibility of the network; and violation of the integrity system activity and throughput elements induces disruption of telecommunication network» [7].

Information security includes concepts such as integrity (integrity) of information, confidentiality (confidentiality), secured from unauthorized access (authentication, non-

repudiation). Now is added the ensure reliability (availability) information and communication systems functioning and its survivability (survivability). Exceptional role in modern telecommunication infrastructure of the country determined that national security depends on the integrity, reliability and readiness of critical physical and information infrastructure. The term «critical infrastructure» includes a set of physical or virtual systems and important for the country so that their failure or destruction can lead to disastrous consequences in the economy, defense, health and national security.



**Fig. 1.** Critical Information Infrastructure properties (Figure was copied from [7])

Violations of system integrity against the background of decreased activity of elements causes a disruption management, simultaneously reducing the activity of cells and their vitality - the loss of flexibility, and lower vitality and violation of the integrity of the system - the loss of major functions.

The concept involves survivability systems, its ability to timely perform its functions in terms of destabilizing factors (physical destruction, partial loss of resources, failure and crashes elements unauthorized interference in the control circuit). This technical reliability, which manifests itself as the ability of the system to work without regular system failures, defines the minimum threshold stability system, which without a recovery of lost items and functions may come full stop functioning. The persistence of information systems is important for information security in general.

It is a great dependence on technology information technology threats and vulnerabilities latter. The threat is a software-mathematical impact on Infocommunication systems (cyber attacks), as a means of information confrontation aimed at the use, modification, substitution or deletion of information contained in computers and information networks, reducing the efficiency of or disabling themselves computers and information networks.

The hazard level threats target information influence is directly proportional to the level of technological development and scale networks use computers in a network management system, the industry and the state as a whole. For the growing importance of telecommunication networks requirements to ensure the integrity and reliability of information transmission, security violations routing accuracy and timeliness of information delivery (minimum delay messages), and secure against unauthorized access to information resources, networking and physical security infrastructure.

«The level of security government and commercial information and communication systems determines the security infrastructure of the state as a whole and vitality of these systems - mobilization readiness of the armed forces, industry, the economy, the economy and

society as a whole, as to the conduct of war and to mitigate the consequences of terrorist attacks, natural disasters and man-made disasters. To use and save a minimum set of features critical information and telecommunications system must have a certain margin of survivability and resilience to external destabilizing influences of the environment. Implementation of network - centric paradigm of information security, taking into account all these factors ensures that, even at random or malicious misrepresentation of information, unauthorized access to the control circuit, loss of resources and congestion of traffic, complex organizational and technical measures of security will ensure that the most important problems. It is not only rejection and failure of equipment, distortions, leaks and sabotage and personnel espionage hacking attempt of sabotage and that, terrorist acts on objects of information structure considered not as a potential threat, but as a system of external technical factors environment» [7].

The implementation of this paradigm requires many tasks of organizational, technical, programmatic, social, and psychological and information. Violation of information security can step cybercrime, cyber terrorism act, information operations or war. A major problem is complex cybercrime.

«Computer crime – a relatively massive, historically changing phenomenon, which has a certain spatial and temporal distribution and represents a single integrated system of socially dangerous acts where computers, networks and provided them information is a weapon crimes or crimes subject» [8]. Cybercrime - is «illegal collection, storage, use, destruction, distribution of personal data, illegal financial transactions, theft and fraud on the Internet» [9]. According to the recommendations of UN expert's term cybercrime covers any crime that can be committed through a computer system or network within a computer system or network or to a computer system or network. Thus, the cybercrime can be assigned any crime committed in an electronic environment. Cybersecurity - a state of security of vital interests of man and citizen, society and the state, which is achieved using a complex set of legal, organizational, informational events. The system creates a cyber-security component of Ukraine [9].

The crime rate is an important indicator of the society. Humanity meets a sharp increase in crime not for the first time. At the end of XVIII - early nineteenth century France, Britain, Russia is literally drowning in a swamp of crime, violence and lawlessness. For industrialized and urbanized societies dominated by public relations, strongly developed individualism, personal success is the most important in the value system of the population enjoys great freedom and initiative, characterized by significant pain crime. But especially high level of crime comes up in societies that undergo major changes in the cultural, social and political orientations. And now, as then, we are experiencing a global change of technological structures. You can carry out historical analogies for the removal of the growth of crime.

Indeed, while the police was established, the purpose of which belonged not to secure the king and overlords, and the security of law and public order. Now cyber police is created. But it should secure «network cyber rules» and the legitimacy of not only industrial society that does not go away, though transformed, and a new society with new economic, social and legal relations. They must reflect and embody in life.

Then the work of the police often was enlisted former, but well trained criminals are bad cope with their new responsibilities. Now we must boldly transformed employ hackers. Often the cause of crime is hopelessness, inability to socialize and solve their own problems. Provision of legal ability earnings can significantly reduce social tensions.

Then forensic training was organized in universities. Now this training is rapidly gaining momentum. Then under attack was located private property. Now under attack are confidential and other information, real industrial, energy and other equipment and devices, infrastructure and processes that underpin our lives. Then created a legal and regulatory framework of capitalist society and relationships. Now the corrupt bureaucracy has not moved in the direction of a legal and legal framework of virtual communities, social relations and new high-tech society. For example, from a legal point of view cyberspace is not a public

property. Technology and computer networks that make up cyberspace belong to multinational companies that serve them.

While there have been breakthrough research and theoretical results and achievements. Anthropometric methods were invented - a verbal description of the offender portrait, fingerprinting, developed the theory of criminology. Now successes in managing behavior, consciousness and collective mind people, information operations techniques, theory of security. This work is just beginning. New threats and vulnerabilities arise faster than they are opposition. Not achieved success in a safe operating systems. New scientific achievements primarily used to create new wars and threats. The crime in computer technology so far seems to be specific. They have high latency that, according to various estimates, up to 85-90%. Legislation old industrial age often is not competent to investigate cybercrime. Easy access to information erodes the moral barriers. The information stolen, but it does not disappear, but remains in the host. There is widespread use of free software which is violating copyrights. On the other hand, the victims of hackers often hide them for fear of losing credibility.

Thus, not all capabilities used to perform tasks to overcome growth of cybercrime. Turf negligence, incompetence persons employed to address cybercrime, insufficient funding and so on. On the other hand info, cognitive and other technologies will be developed. They certainly appear to be vulnerable and error. And sooner or later vulnerabilities will be found and used.

As part of this paradigm the authors propose introducing ideas that can lead to full functionally closed system security features. The idea is as follows.

***The system (technology) determining the identity and identity management definition*** can reduce latency cybercrime, improve conditions for the monitoring of information security to ensure control over any transaction and, accordingly, access control. The technology can be used to secure information in open systems. This access control is a candidate for a functionally complete set of mechanisms to secure information. An attacker can go in, but he had not authorized for access. And in this case will be a useful application techniques identity determination.

Category of identity definition technologies and management introduced the definition of identity Recommendation ITU H.1250 - H.1279, Y.2720 - Y.2739 and invited authors for the total implementation of telecommunication networks in Ukraine and maybe in cyberspace. We present the essence of technology. In a network environment determine identity management (MBI – identify management) should provide the opportunities provided to ensure safe information exchange between objects. The exchange of information based on the developed policies and trust established between objects in the environment of multi-service providers. Such confidence is based on the approval (assertion) and verifying the reliability (validation) the identity of objects in all systems of distributed telecommunications: the execution of transport (network access control functions joining networks, transport functions, management functions and resource admission, features user profile transport); in execution services (multimedia services components, telecommunications components, functions of service management, applications, application support functions and support services, features user profile services); User finite systems (conventional terminals, subscriber networks, data transmission terminals); other networks. MBI provides opportunities for privacy security facilities and ensure that telecommunications was spread only authorized information. Identity – information about the object, which is enough to identify the object in a particular context. Management defined identity – MBI – a set of functions and capabilities (e.g., administration, management and maintenance, detection, messaging, comparison and coordination, ensure implementation of policies, authentication and approval), which are used for guaranteeing information confirms identity (eg, identifiers, credentials, attributes); to guarantee the identity of the object; provision of commercial applications and application security [10].

Many modern information services such as e-commerce, e-government, require enhanced observability telecommunications environment. The necessary software determine

the identity of objects and their information flows at all levels and in all components of telecommunications networks while maximizing promoting free but controlled rotation information. Along with other mechanisms of security, firewall, intrusion detection systems, virus security, MBI plays an important role in securing infrastructure, telecom services and application of cyber crime, such as fraud and theft of identity data. Transactions in telecommunications will be secure and reliable.

Beneficial effect of determining the identity is that it partly reflects the properties of direct contacts between people. People perceive directly (using all their senses) of each other and have the opportunity to know the physical, psychological and individual features inherent in each side. Participants in the contacts are able to make more or less objective impression that is a communication partner, to get into his inner world, to understand the motives, habits; attitudes assess the facts of reality. It is desirable to provide telecommunications least some of these opportunities.

From a theoretical point of view, a technology which is part of the identity of functionally complete set of technologies for information security. In the field of information security principle of functional completeness must be combined with the principle of continuity of security (the principle of «circular defense»). The security object depends on the level of security the weakest link. Access control systems are typically available only on entering the system and do not control the future of the subject. The technology used to determine the identity of each transaction, closing the functional completeness technologies. And in distributed systems, information security technology determines that identity is not interchangeable.

The system determining the identity and identity management system defined in the ICS will monitor (monitor) every transaction in the system. The effectiveness of these measures is due to the important role of the human factor. The system determining the identity aimed at detecting perpetrators of information security and facilitates next inevitability of punishment.

While discussing this technology there appear questions about limiting people freedoms. Consider the problem along with the following strategy.

***Creating a «trusted» telecom space.*** In other words, the provision of telecommunications networks properties of attorney, to ensure that they have a certain level of information security. This requires a certain control over the flow of information in the telecommunications network. The same problem applies to the world «web». It seems that in this case, there is a contradiction between the rights (of freedom) rights and control of information. First of all, note that democracy - is not permissiveness and collapse, and the firm order, based on respect for the interests of others. Consider, from this point of view the situation from two control information implemented in.

The first situation. The draft amendments to the communication law, the Code provides for a fine for Internet access via Wi-Fi in common areas without specifying personal data. That is, there is no possibility to enter the Internet anonymously.

The second situation. Developed a set of measures "of content and increasing confidence in the Internet", which will include the following points: blocking content and limit access to it; the fight against anonymity on the web; control over the information that distribute anonymous; encrypt traffic; its «monitoring and filtering» in RuNet; control of Internet companies, with the use of personal data. In the first situation, not democracy pressing although anonymity is prohibited. Indeed, in this situation just secured the rights of the client for blocked channel for criminals. While withdrawing money through mobile banking from another account, free Wi-Fi network without identification, the criminal can be lost. Investigation crime is difficult. Thus, universal definition of identity appliances is much easier solution. In everyday life, there is a steady downward trend in anonymity. Everywhere installed surveillance cameras, chips implants for automatic identification. The ban anonymity does not mean limiting our freedom. We act where we need and do what the law, which is our interest. But do it openly, as do other people.

In the second situation, there are signs of violation of human rights to free access to information. At the same time, limit access to content is required, for example to secure children from pornography and violence propaganda. We have a complex problem that includes political, legal, social, ethical, psychological and cultural aspects. These problems are solved mankind throughout its existence. In Russia the interests of man and society deliberately opposed to each other. Aim to balance the interests of security concerns objective. In fact, the lack of balance is one of the threats to be addressed in the security of rights and interests. In a democratic society human interests provided so as not to prejudice the interests of others. The Russian approach is also taken from the military. Objectives interim military operations may be in contradiction with the general ultimate goal. Some technical details. In the Russian Federation «Yarova law» extended storage of telecommunications traffic. This increases costs and tariffs for connection by 2-3 times. Meanwhile, the introduction of identity technology more effectively solves the same problem. Kim addition, they improve the condition monitoring information security enable tracking of and rapid response to destructive processes and increase the degree of automation of technical operation.

## Conclusions

In this paper classified transformation stages and directions of information security paradigms, shows change relative importance of types of information security, supplemented by a list of actual problems in information security, proposed application of the definition of identity and identity management definition. The results will improve management information systems, information-psychological and cyber security. Without proper attention to scientific development, scientific and technological breakthroughs in information and cyber security, socio-psychological, informational and psychological security without the network of State and local business information-cognitive intelligence, «free Ukraine is impossible».

## References

1. Gnatyuk, S. Transformation of information and social-psychological security paradigms (part 1) / S. Gnatyuk, V. Gnatyuk, V. Kononovich, I. Kononovich // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2016. – Том 6. – №3. – С. 227-239.
2. Кононович, В.Г. Соціальний захист інформації в класах систем захисту інформації / В.Г. Кононович // Науково-технічний журнал «Захист інформації». – 2008. – № 4(41). – С. 4-16.
3. Панарин, И.Н. Информационная война и третий Рим безопасность / И.Н. Панарин. – М.: 2008. – 132 с.
4. Бойко, К.В. Доклад на открытии II международной научно-практической конференции „Безопасность современных информационных и телекоммуникационных сетей" [Электронный ресурс] // Бизнес и безопасность, 2005. – № 5. – С. 101-102. Режим доступа: [http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?art\\_id=43932&cat\\_id=38710](http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?art_id=43932&cat_id=38710)
5. Корченко, О.Г. Кібернетична безпека держави: характерні ознаки та проблемні аспекти / О.Г. Корченко, В.Л. Бурячок, С.О. Гнатюк // Безпека інформації. – 2013. – Том 19. – № 1. – С. 40 – 44.
6. Сніцаренко, П.М. Методика оцінки рівня деструктивного інформаційного впливу на об'єкти інформаційної інфраструктури держави / П.М. Сніцаренко, Ю.О. Саричев, П.Д. Рогов // Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ. – 2014. – № 1. – С. 88-96.
7. Леваков, А. Анатомия информационной безопасности США. Информационная безопасность / А. Леваков // Информационный бюллетень. – М.: Jet Info online. – 2002. – № 6 (109). – 40 с.
8. Інформаційна безпека держави: підручник / [В.М.Петрик, М.М.Присяжнюк, Д.С.Мельник та ін.] ; в 2 т. – Т. 2. – К., 2016. – 328 с.

9. Кавун, С.В. Економічна та інформаційна безпека підприємств у системі консолідованої інформації : навчальний посібник / С.В. Кавун, А.А. Пилипенко, Д.О. Ріпка. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2013. – 364 с.
10. Кононович, В.Г. Визначення ідентичності об'єктів у системі соціальної та інформаційної безпеки / В.Г. Кононович, І.В. Кононович, С.В. Стайкуца, О.О. Цвілій // Сучасний захист інформації. – 2015. – № 1. – С. 19-27.

## ТРАНСФОРМАЦІЯ ПАРАДИГМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА СОЦІАЛЬНО-ПСИХОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ (Частина 2)

С.О. Гнатюк<sup>1</sup>, В.О. Гнатюк<sup>1</sup>, В.Г. Кононович<sup>2</sup>, І.В. Кононович<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет,  
просп. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03680, Україна; e-mail: s.gnatyuk@nau.edu.ua

<sup>2</sup> Одеський національний політехнічний університет,  
просп. Шевченко, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: vl\_kononovich@ukr.net

<sup>3</sup> Одеська національна академія харчових технологій,  
вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039, Україна; e-mail: kononovich@mail.ru

У цій частині роботи представлені результати ретроспективного аналізу етапів трансформації парадигми сфери інформаційної безпеки: соціально-центрична парадигма інформаційної безпеки особи, суспільства, держави та, в цілому, національної безпеки; резюме щодо трансформації сфери інформаційної та кібернетичної безпеки; розподіл відносної значимості заходів захисту інформаційних ресурсів; парадигма мережної безпеки критичної інформаційної інфраструктури в умовах деструктивного інформаційного впливу; критичні властивості інформаційної інфраструктури; система (технологія) визначення ідентичності та управління визначенням ідентичності; створення «довіреного» телекомунікаційного простору. Отримана в частинах 1 та 2 систематизація та результати вирішення задач дозволяють підвищити ефективність роботи систем забезпечення інформаційної, кібернетичної та соціально-психологічної безпеки й формалізувати напрямки подальших досліджень щодо розробки ефективних систем безпеки.

**Ключові слова:** захист інформації, інформаційна безпека, кібербезпека, інформаційно-комунікаційні системи, індивідуальна та групова свідомість, соціально-психологічний захист, правова система.

## ТРАНСФОРМАЦІЯ ПАРАДИГМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННОЙ И СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ (Часть 2)

С.А. Гнатюк<sup>1</sup>, В.О. Гнатюк<sup>1</sup>, В.Г. Кононович<sup>2</sup>, И.В. Кононович<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный авиационный университет,  
просп. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, 03680, Украина; e-mail: s.gnatyuk@nau.edu.ua

<sup>2</sup> Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: vl\_kononovich@ukr.net

<sup>3</sup> Одесская национальная академия пищевых технологий,  
ул. Канатная, 112, м. Одесса, 65039, Украина; e-mail: kononovich@mail.ru

В этой части работы представлены следующие результаты ретроспективного анализа этапов трансформации парадигм в сфере информационной безопасности: социально-центрическая парадигма информационной безопасности личности, общества, государства и, в целом, национальной безопасности; резюме по трансформации сферы информационной и кибернетической безопасности; распределение относительной значимости мер защиты информационных ресурсов; парадигма сетевой безопасности критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивного информационного влияния; критические свойства информационной инфраструктуры; система (технология) определения идентичности и управления определением идентичности; создание «доверенного» телекоммуникационного пространства. Полученная в части 1 и 2 систематизация, и результаты решения задач позволяют повысить эффективность работы систем обеспечения информационной, кибернетической и социально-психологической безопасности и формализовать направления дальнейших исследований и разработки эффективных систем безопасности.

**Ключевые слова:** защита информации, информационная безопасность, кибербезопасность, информационно-коммуникационные системы, индивидуальное и групповое сознание, социально-психологическая защита, правовая система.

# РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКА ОТКАЗОВ КОМПОНЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко**

Одесский национальный морской университет,  
Мечникова 34, Одесса, 65029, Украина, e-mail: murder8910@mail.ru

В статье приведены результаты разработки и исследования искусственной нейронной сети для решения задач прогнозирования состояния элементов и межэлементных связей сложных технических систем. Разработан алгоритм построения нейросети, приведены результаты обучения и тестирования ее работы на базе системы Matlab. Проведенные исследования подтверждают адекватность разработанной модели, что обусловлено достижением точности распознавания тестовой выборки более 80%.

**Ключевые слова:** прогнозирование риска, нейронные сети, обучение нейронной сети, сложные технические системы.

## Введение

Известно, что количество элементов и межэлементных связей в сложных технических системах (СТС) повышается. Это неизбежно приводит к росту числа возможных сценариев развития аварийных ситуаций в таких системах. В связи с этим возрастают вычислительные и временные затраты на проведение анализа и численной оценки риска отказов компонентов СТС в различных условиях эксплуатации [1,2]. Проведение подобных расчетов вручную или на базе существующих неспециализированных табличных процессоров не является целесообразным и требует разработки отдельных прикладных программных решений для автоматизации расчетов.

Приоритетной задачей при разработке эффективных программных комплексов для осуществления поддержки принятия решений по управлению риском отказов является реализация адекватных моделей прогнозирования технического состояния СТС и их подсистем [3,4].

Проблемы прогнозирования риска отказов и потери работоспособности компонентами СТС многообразны и связаны с такими факторами, как полиморфность оборудования, недостаток качественных и количественных экспертных данных по его надежности, динамичность изменяющихся условий эксплуатации, человеческий фактор.

В свою очередь, ряд применяемых методов прогнозирования технического состояния СТС не являются универсальными и гибкими, т.к. опираются на детерминированные и формализованные статистические модели. Для подобных методов характерно отсутствие возможностей осуществления полноценного учета специфики функционирования элементов и межэлементных связей системы, в особенности в условиях неопределенности воздействия на СТС различных внешних или внутренних факторов [5-7].

Значительным преимуществом для осуществления адекватного прогнозирования значений риска отказов компонентов систем обладают структурные модели, базирующиеся на механизмах и методах искусственного интеллекта, в частности

искусственные нейронные сети [8]. Подобные модели позволяют обеспечить возможность прогнозирования риска отказов компонентов технических систем за счет применения механизмов обобщения, идентификации неявных зависимостей между входными и выходными выборками данных, поддержке различных алгоритмов обучения [9]. Это имеет значительное преимущество в ряде случаев, когда исследуемая СТС содержит несколько сотен или тысяч критериев и показателей, используемых при анализе и прогнозировании возможных сценариев потери работоспособности систем.

### **Цель статьи и постановка задачи исследований**

*Целью* данной статьи является автоматизация процесса прогнозирования технического состояния компонентов сложных технических систем различной топологии и иерархии.

*Задача* исследования заключается в разработке и анализе адекватности модели искусственной нейронной сети, позволяющей осуществлять прогнозирование риска отказов элементов и межэлементных связей СТС, с учетом специфики их комплексного взаимодействия и взаимовлияния в различных условиях эксплуатации.

### **Основная часть**

В качестве входной выборки данных для построения модели искусственной нейронной сети из базы статистических данных OREDA выбраны и рассчитаны следующие технические параметры компонентов СТС: структурный и функциональный ущерб, вероятность выхода из строя, наличие запчастей, степень ремонтпригодности, количество происшедших ремонтов, структурный и функциональный риск отказов, длительность эксплуатации, режим эксплуатации и среднерыночная стоимость. Данные параметры задаются в структурном виде посредством применения формата данных \*.csv, в котором каждый столбец – значения каждого отдельного параметра.

Для расчетов эталонных значений риска отказов использовались предложенные в работах [10,11] методики, применяющие методы когнитивно-имитационного моделирования, поражающего моделирующего импульса и нормирующего воздействия.

Базируясь на выборках входных данных, проведено обучение нейросети на протяжении 10000 эпох, каждый параметр содержит около 1000 значений. Для организации процесса моделирования нейронной сети разработаны программный скрипт и обобщенный алгоритм, структура которого приведена на рис. 1.

Для построения модели нейронной сети пользователь инициирует запуск исполняемого файла разработанного программного скрипта, после чего осуществляется загрузка всех компонентов системы и визуализация главной формы.

Следующим шагом является выполнение процедуры импорта соответствующих векторов входных данных по элементам и межэлементным связям по значениям выбранных параметров и векторов исходной переменной (итоговый риск). На базе этого происходит создание модели искусственной нейронной сети, с последующим заданием параметров ее тренировки, выбором активационной функции и алгоритма обучения.

Последним этапом является конфигурирование настроек тренировки модели, непосредственного обучения нейронной сети, оценка полученных результатов ее работы в виде размеров полученных погрешностей и оценок, после чего обеспечивается возможность экспорта данных в бинарный mat-файл. В рамках

розробаного інтерфейса передбачено процес поетапної модифікації вибираємих даних з можливістю зворотного переходу.

Розробка і навчання моделі нейронної мережі здійснено на базі методу зворотного розповсюдження помилки, лінійної функції нормалізації з застосуванням активаційної функції арктангенса.



Рис. 1. Обобщенный алгоритм создания модели нейронной сети

Структурный состав модели разработанной нейронной сети, состоящей из входного блока данных по выбранным критериям, 2 слоев, 20 нейронов и выходного блока данных по итоговым значениям рисков приведен на рис. 2. Реализация и обучение разработанной искусственной нейронной сети выполнена средствами системы Matlab, с помощью модуля Neural Network Toolbox.

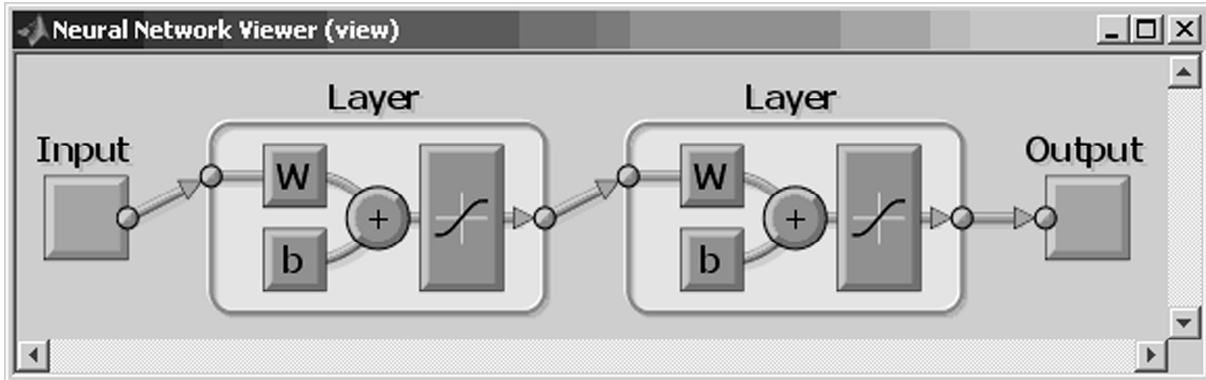


Рис. 2. Структурный состав модели разработанной нейросети

График отображения общего распределения данных модифицированной нейронной сети приведен на рис. 3. По осям абсцисс и ординат отложены значения итоговых выборок данных обученной нейронной сети в диапазоне от 0 до 1. Эталонные значения векторов отложены в виде пунктирной линии, отдельные значения данных соответствующих параметров обозначено маркерами типа «круг», линия показывает корреляцию по всем исследуемым значениям модели. Общая оценка R превышает 0.8, что свидетельствует о достаточно высокой точности и адекватности построенной модели.

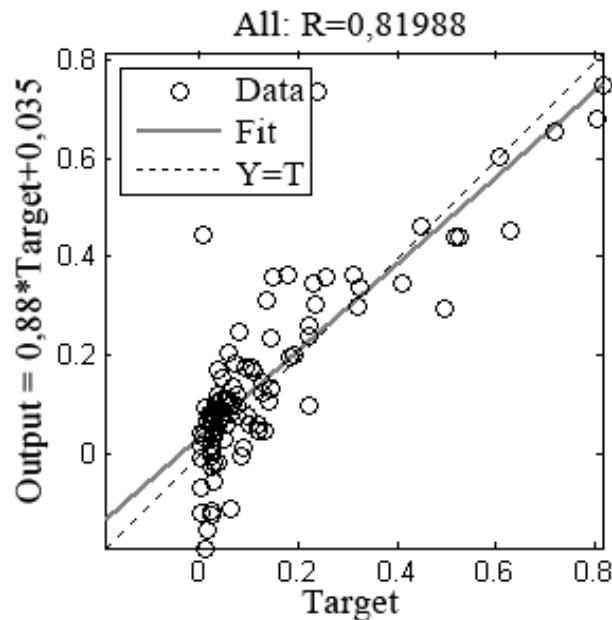


Рис. 3. График отображения общего распределения данных модифицированной нейросети

Проверка точности прогнозирования нейронной сети проведена на базе аналитического расчета и сравнения значений риска отказов по имеющимся в базе OREDA выборкам данных для ряда сценариев развития аварийных ситуаций СТС.

Исследование разработанной модели искусственной нейронной сети для прогнозирования состояния СТС позволило установить, что достоверность прогнозирования риска отказов является высокой, относительная погрешность составила менее 3%.

## Выводы

Разработанная модель искусственной нейронной сети позволяет осуществлять прогнозирование риска отказов элементов и межэлементных связей СТС, с учетом специфики их комплексного взаимодействия и взаимовлияния в различных условиях эксплуатации, что подтверждается результатами моделирования. Разработанная модель может быть вынесена в унифицированный программный модуль с графическим интерфейсом с помощью программного средства Simulink и фрейворка Guide для автономного использования или интегрирована в качестве отдельной библиотеки для использования в системе поддержки принятия решений по управлению рисками технических систем.

## Список литературы

1. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007. – 276 с.
2. Rudnichenko, N. Concept implementation of decision support software for the risk management of complex technical system / N. Rudnichenko, V. Boyko, S. Kramskoy, Y. Hrechukha, N. Shibaeva // *Advances in Intelligent Systems and Computing of the series Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2016. – № 512. – P. 255-269.
3. Vychuzhanin, V. Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems / V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, V. Boyko, N. Shibaeva, S. Kononov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – №6/9 (84). – С. 4-11.
4. Вычужанин, В.В. Технические риски сложных комплексов функционально взаимосвязанных структурных компонентов судовых энергетических установок / В.В. Вычужанин, Н.Д. Рудниченко, // *Вісник Одеського національного морського університету, збірник наукових праць*. – 2014. – № 2. – С. 68-77.
5. Царгородцев, В.Г. Производство полумпирических знаний из таблиц данных с помощью обучаемых искусственных нейронных сетей / В.Г. Царгородцев // *Методы нейроинформатики*. – Красноярск: Изд-во КГТУ. – 2012. – С. 89-101.
6. Покусаев, М.Н. Система диагностики судовых энергетических установок с применением нейросетевых моделей / М.Н. Покусаев, Н.Н. Касимов // *Вестник АГТУ, Управление вычислительная техника и информатика*. – 2012. – №2. – С. 88-92.
7. Любимова, Т.В. Решение задачи прогнозирования с помощью нейронных сетей / Т.В. Любимова, А.В. Горелова // *Инновационная наука*. – 2015. – № 4. – С. 39-42.
8. Шадрина, В.В. Применение методов прогнозирования в технических системах / В.В. Шадрина, Е.Ю. Косенко // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2011. – № 2. – Том 115. – С. 141-145.
9. Костина, Л.Н. Нейронные сети в задачах прогнозирования временных рядов / Л.Н. Костина, Г.А. Гареева // *Инновационная наука*. – 2015. – № 6-2. – С. 70-73.
10. Рудниченко, Н.Д. Информационная когнитивная модель технологической взаимозависимости сложных технических систем / Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин // *Информатика и математические методы в моделировании*. – 2013. – №3. – С. 240-247.
11. Рудниченко, Н.Д. Оценка структурного и функционального рисков сложных технических систем / Н.Д. Рудниченко, В.В. Вычужанин // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – №1(67). – С. 18-22.

**РОЗРОБКА МОДЕЛІ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКА ОТКАЗІВ  
КОМПОНЕНТІВ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

В.В. Вичужанин, М.Д. Рудніченко

Одеський національний морський університет,  
Мечникова 34, Одеса, 65404, Україна, e-mail: murder8910@mail.ru

У статті наведені результати розробки і дослідження штучної нейронної мережі для вирішення завдань прогнозування стану елементів і межелементних зв'язків складних технічних систем. Розроблено алгоритм побудови нейромережі, наведені результати навчання і тестування її роботи на базі системи Matlab. Проведені дослідження отриманих результатів підтверджують адекватність розробленої моделі, що обумовлено досягненням точності розпізнавання тестової вибірки більше 80%.

**Ключові слова:** прогнозування ризиків, нейронні мережі, навчання нейронної мережі, складні технічні системи.

**DEVELOPMENT OF THE NEURAL NETWORK MODEL FOR PREDICTION FAILURE RISK'S OF  
THE COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS COMPONENTS**

V.V. Vichuzhanin, N.D. Rudnichenko

Odessa National Maritime University,  
Mechnikov 34, Odessa, 65404, Ukraine, e-mail: murder8910@mail.ru

The article presents the results of research and development of artificial neural network to solve the problems of forecasting the state of the elements and inter-element links of complex technical systems. Authors proposed an algorithm for constructing a neural network, the results of the training and testing of its work on the basis of Matlab system. The research results obtained confirm the adequacy of the developed model, which is due to the achievement of the test sample recognition accuracy of over 80%.

**Keywords:** risks prediction, neural networks, neural network training, complex technical systems.

# СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА В СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ С АСТАТИЗМОМ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, Н.Н. Дикий

Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: bobrikov1932@mail.ru

Проведен синтез цифрового регулятора для следящей системы с астатизмом третьего порядка. Выполнено моделирование системы в пакете MATLAB-Simulink. Разработан метод расчета цифрового регулятора по заданным параметрам неизменяемой части следящей системы и требуемым показателям качества. Показателями выбраны максимальное перерегулирование в переходной характеристике и максимальная перегрузка привода по моменту в режиме разгона. Используется преобразование непрерывной передаточной функции регулятора в дискретную. Приведен пример расчета и результаты моделирования.

**Ключевые слова:** система управления, астатизм, цифровой регулятор, передаточные функции непрерывная и дискретная, моделирование, переходная характеристика, перегрузка привода по моменту, показатели качества управления

## Введение

Как известно, интегрирование сигнала ошибки в системе управления позволяет свести к нулю установившуюся ошибку при постоянном входном сигнале; двойное интегрирование ошибки сводит к нулю установившуюся ошибку при изменении входного сигнала с постоянной скоростью; при тройном интегрировании сигнала ошибки (астатизм третьего порядка) равна нулю установившаяся ошибка при постоянном ускорении входного сигнала.

Очевидно, что эти свойства астатических систем позволяют выполнять особо точные системы управления, например, системы слежения за движущимся объектом, высокоточные транспортные системы дозирования и пр. Методы анализа и синтеза подобных систем рассмотрены, например, в работах [1,2,3]. В работах [4,5,6] рассмотрены методы синтеза систем с астатизмом второго порядка.

В данной статье рассмотрен метод синтеза системы с астатизмом третьего порядка, позволяющий определить параметры цифрового управляющего устройства по заданным показателям качества при известных параметрах заданной неизменяемой части системы.

Метод основан на том, что передаточная функция разомкнутой системы, представленная как произведение передаточных функций регулятора и неизменяемой части, имеет заданный вид, с параметрами, определяемыми по принятым показателям качества. После определения передаточной функции разомкнутой системы находят непрерывную передаточную функцию регулятора путём деления передаточной функции разомкнутой системы на передаточную функцию неизменяемой (заданной) части. Затем находят дискретную передаточную функцию цифрового регулятора  $K(z)$  путём подстановки в непрерывную передаточную функцию  $K(p)$  выражения [7,10]:

$$p = \frac{2(z-1)}{T_0(z+1)}. \quad (1)$$

## Цель работы

Целью работы является разработка метода синтеза цифрового регулятора для следящей системы с астатизмом третьего порядка. Система должна иметь максимальное перегуливание в переходной характеристике не более заданной величины, при условии, что перегрузка привода по моменту в переходном процессе не превысит заданного значения.

В качестве объекта управления принят двигатель постоянного тока с усилителем мощности. Передаточная функция заданной части системы при этом имеет вид:

$$K_3(p) = \frac{K_3}{(T_y p + 1)(T_m p + 1)p}, \quad (2)$$

где  $K_3$  – коэффициент усиления заданной части системы,  $T_y$ ,  $T_m$  – соответственно постоянные времени усилителя мощности и двигателя.

## Основная часть

Принимаем следующее условие: передаточная функция разомкнутой системы  $K_c(p)$  (рис.1), включающей управляющее устройство  $K_p(p)$  и заданную, неизменяемую часть системы  $K_3(p)$ , соединенных последовательно, имеет вид:

$$K_c(p) = K_p(p)K_3(p) = \frac{K(Tp+1)^2}{p^3}. \quad (3)$$

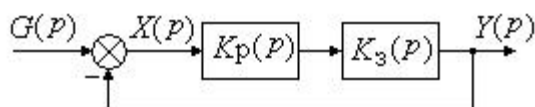


Рис. 1. Структурная схема системы

При таком виде передаточной функции свойства системы полностью определяются лишь двумя параметрами: коэффициентом усиления системы  $K$  и постоянной времени  $T$ .

Разделив желаемую передаточную функцию (3) на передаточную функцию заданной части системы (2) получим передаточную функцию регулятора:

$$K_p(p) = \frac{K(Tp+1)^2(T_y p + 1)(T_m p + 1)}{p^2 K_3 (T_d p + 1)^2}. \quad (4)$$

В передаточную функцию регулятора введены ещё две дополнительные постоянные времени  $T_d$ , которые необходимы для обеспечения физической

реализуемости регулятора: степень полинома числителя не может быть больше степени полинома знаменателя. Для того, чтобы влияние дополнительных постоянных времени было минимальным, их величина выбирается на порядок меньше наименьшей постоянной времени в заданной части системы.

Наличие в регуляторе дифференцирующих звеньев приводит к большим всплескам напряжения на выходе регулятора при подаче на вход ступенчатого сигнала. Для подтверждения этого определим начальное значение выходного сигнала регулятора (4) при условии, что на входе действует единичный ступенчатый сигнал. При этом изображение выходного сигнала имеет вид:

$$U_1(p) = \frac{1}{p} K_p(p) = \frac{K(Tp + 1)^2(T_y p + 1)(T_m p + 1)}{p^3 K_3(T_d p + 1)^2}.$$

Начальное значение оригинала  $u_1(t)$  найдем, используя теорему о начальном и конечном значениях изображения и оригинала:

$$u_1(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} p U_1(p) = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{K(Tp + 1)^2(T_y p + 1)(T_m p + 1)}{p^2 K_3(T_d p + 1)^2} = \frac{KT^2 T_y T_m}{K_3 T_d^2}.$$

Дополнительные постоянные времени в знаменателе  $T_d$  должны быть на порядок меньше наименьшей постоянной времени в заданной части системы ( $T_y, T_m$ ). При этом начальный всплеск напряжения на выходе регулятора может принимать существенно большие значения. Для ограничения максимальных значений выходного сигнала на выходе регулятора устанавливаем нелинейное звено типа «насыщение» с ограничением максимальной величины до значения  $U_{2max} = \pm 2$  (в относительных единицах), что вполне допустимо в реальных условиях работы заданной части системы (усилитель мощности и двигатель).

Для определения динамических свойств системы были проведены экспериментальные исследования системы на модели в пакете MATLAB-Simulink. Схема модели приведена на рис.2.

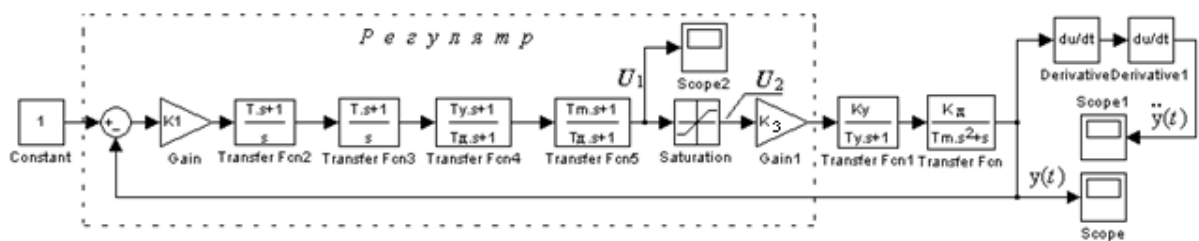
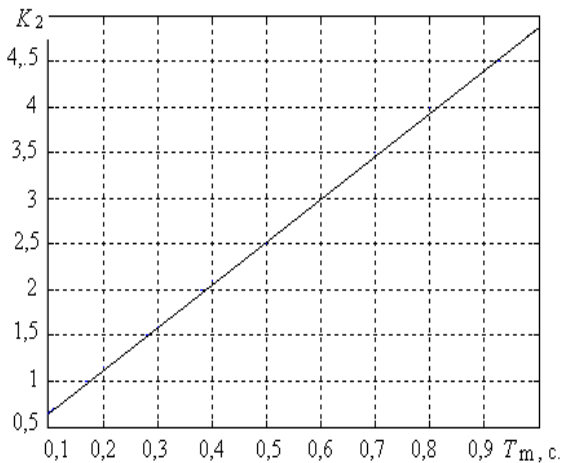


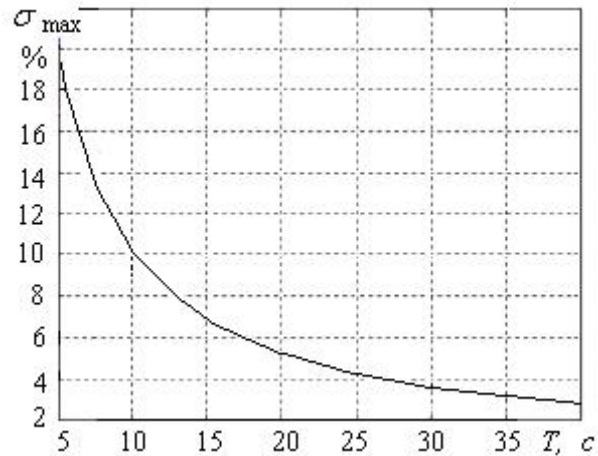
Рис. 2. Схема модели в пакете Simulink

При моделировании рассматривались переходные характеристики системы при различных значениях настраиваемых параметров  $K = K_1 K_3 K_y K_d$  и  $T$  (рис. 2). Исследования проводились при значениях постоянной времени двигателя в интервале  $T_m = (0.1-1)$  с и постоянной времени усилителя  $T_y = (0.01-0.05)$  с. В переходной характеристике определялась величина максимального перерегулирования  $\sigma_{max}, \%$ . Настраиваемые параметры подбирались так, чтобы максимальная величина ускорения выходной величины  $\ddot{y}(t) \in (8.5, 9)$ , что соответствует допустимой величине перегрузки

по моменту для двигателей постоянного тока. Выполнение этого условия определяет минимальное время переходного процесса.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента  $K_2$  от пост. времени двигателя при максимальной перегрузке привода по моменту  $\lambda = (8.5 - 9)$



**Рис. 4.** Зависимость максимального перерегулирования от  $T$

Анализ результатов моделирования позволил получить зависимость величины коэффициента усиления  $K_2 = K_3 K_y K_d$  (рис. 2) от постоянной времени двигателя, при условии, что максимальное ускорение выходной величины принимает значение в интервале (8.5, 9) (рис. 3). Величина коэффициента  $K_1$  принята равной 0.1.

Максимальное перерегулирование зависит от произведения  $KT^2 = K_1 K_2 T^2$ . При этом величина коэффициента  $K$  влияет на кривую переходного процесса в значительно меньшей степени, чем величина постоянной времени  $T$ . Чем больше  $KT^2$ , тем меньше  $\sigma_{\max}$ . На рис. 4 приведен график зависимости  $\sigma_{\max}$  от  $T$  при условии, что  $K_1 = 0.1$ , а величина коэффициента  $K_2$  определена по значению  $T_m$  (рис. 3).

При значительном увеличении  $KT^2$  система становится неустойчивой. Определим предельное значение  $KT^2$ , соответствующее границе устойчивости. Нелинейное звено (насыщение) принимаем как линейное с коэффициентом, равным 1, что соответствует его максимальному значению.

Передаточная функция разомкнутой системы (рис. 2) имеет вид:

$$K(p) = \frac{K_1(Tp+1)^2(T_y p+1)(T_m p+1)K_3 K_y K_d}{p^2(T_d p+1)^2(T_y p+1)(T_m p+1)p} = \frac{K(Tp+1)^2}{p^3(T_d p+1)^2},$$

принимаем:  $K_1 K_3 K_y K_d = K$ .

Передаточная функция замкнутой системы равна:

$$W(p) = \frac{K(Tp+1)^2}{p^3(T_d p+1)^2 + K(Tp+1)^2}.$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид:

$$a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0,$$

где  $a_0 = T_d^2$ ;  $a_1 = 2T_d$ ;  $a_2 = 1$ ;  $a_3 = KT^2$ ;  $a_4 = 2KT$ ;  $a_5 = K$ .

Используя алгебраический критерий устойчивости, запишем соответствующие неравенства:

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{bmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 = 2T_d - T_d^2 K T^2 > 0; \quad K T^2 < \frac{2}{T_d};$$

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix} = a_1(a_2 a_3 - a_1 a_4) - a_3^2 a_0 = 2T_d K T (T - 4T_d) - K^2 T^4 T_d^2 > 0.$$

Учитывая, что  $T \gg 4T_d$ , имеем:

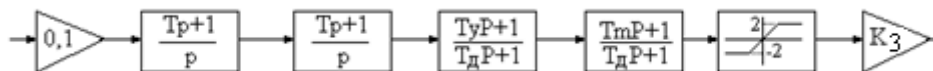
$$K T^2 < \frac{2}{T_d}. \tag{5}$$

### Порядок расчета цифрового регулятора

Задана неизменяемая часть системы (2) с параметрами  $K_y, K_d, T_y, T_m$ . Принимаем условие, что используется электропривод, допускающий максимальную перегрузку по моменту в переходном режиме  $\lambda \in (8.5, 9)$ . Максимальное перерегулирование в переходной характеристике не должно превышать заданной величины  $\sigma_{\max}$ .

1. По графику, представленному на рис. 3, находим величину коэффициента  $K_2$  по заданной величине  $T_m$ .
2. По графику, представленному на рис. 4, определяем величину постоянной времени  $T$ , по заданной величине  $\sigma_{\max}$ .
3. По структурной схеме непрерывного регулятора (рис. 5) записываем непрерывную передаточную функцию вычислителя:

$$K(p) = \frac{0.1(Tp+1)^2(T_y p+1)(T_m p+1)}{P^2(T_d p+1)^2}. \tag{6}$$



**Рис. 5.** Структурная схема непрерывного регулятора

Дополнительные постоянные времени принимаем равными  $T_d = 0.1T_y$  (полагаем, что  $T_y < T_m$ ).

4. Сделав подстановку (1) в формулу (6) получаем дискретную передаточную функцию цифрового регулятора  $K(z)$ . В регулятор должно быть введено ещё кроме

вычислителя нелинейное звено с коэффициентом в линейной части, равным единице и с насыщением  $\pm 2$ , и коэффициент  $K_3$ , равный  $K_3 = \frac{K_2}{K_y K_d}$ .

5. Проверяем выполнение условия устойчивости (5).

**Пример.**

Пусть заданы параметры непрерывной части системы:  $T_y = 0.02$  с,  $T_m = 0.25$  с,  $\sigma_{\max} < 4\%$ .

По графикам рис. 3 и рис. 4 находим:  $K_2 = 1.35$ ,  $T = 35$ ,  $T_d = 0.002$ .

Проверяем условие устойчивости:

$$KT^2 = K_1 K_2 T^2 = 0.1 \cdot 1.35 \cdot 35^2 = 165.4; \quad \frac{2}{T_d} = \frac{2}{0.002} = 1000.$$

Условие устойчивости выполнено.

Записываем передаточную функцию вычислителя непрерывного регулятора (6):

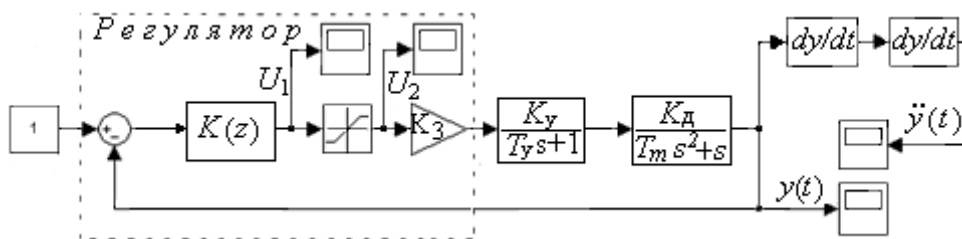
$$K(p) = \frac{0.1(35p + 1)^2(0.02p + 1)(0.25p + 1)}{p^2(0.002p + 1)^2} = \frac{0.612p^4 + 33.1p^3 + 124p^2 + 7p + 0.1}{4 \cdot 10^{-6} p^4 + 0.004p^3 + p^2}. \quad (7)$$

Сделав подстановку (1) в формулу (7) получаем дискретную передаточную функцию вычислителя. Шаг квантования принимаем, исходя из условия  $T_0 = (2 - 2.5)T_{\min}$  [10]:  $T_0 = 2.5T_d = 0.005$  с. Дискретная передаточная функция вычислителя имеет вид:

$$K(z) = \frac{s_4 z^4 + s_3 z^3 + s_2 z^2 + s_1 z + s_0}{g_4 z^4 + g_3 z^3 + g_2 z^2 + g_1 z + g_0},$$

где  $s_4 = 11.128401175$ ;  $s_3 = -41.8159965$ ;  $s_2 = 58.7272$ ;  $s_1 = -36.5200035$ ;  $s_0 = 8.48039825$ ;  $g_4 = 3.24e-4$ ;  $g_3 = -5.76e-4$ ;  $g_2 = 1.84e-4$ ;  $g_1 = 6.4e-5$ ;  $g_0 = 4e-6$ .

На рис. 6 приведена схема модели системы с цифровым регулятором.



**Рис. 6.** Схема модели системы с цифровым регулятором

На рис. 7 показана переходная характеристика, из которой видно, что максимальное перерегулирование составляет примерно 2-3% , что соответствует принятым требованиям к системе. На рис. 8 приведена кривая ускорения выходной величины. Максимальное значение ускорения составляет примерно 9 единиц, что равно максимальной перегрузке привода по моменту и соответствует принятым условиям. На рис. 9 показан сигнал на выходе цифрового вычислителя. Максимальное значение этого сигнала слишком велико ( $\times 10^4$ ) и не может быть реализовано в звене, следующим за

вычислителем. Поэтому на выходе вычислителя установлено нелинейное звено, ограничивающее сигнал до приемлемого уровня  $\pm 2$  усл. ед. На рис. 10 показан график сигнала после ограничения.

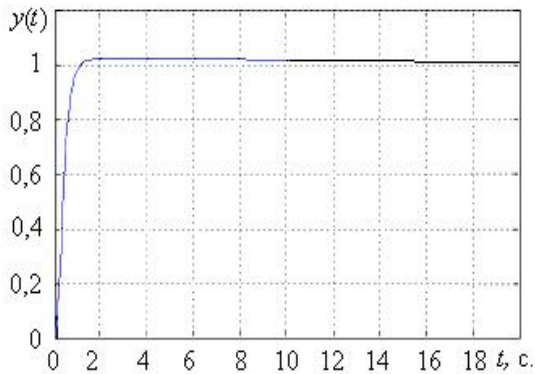


Рис. 7. Переходная характеристика

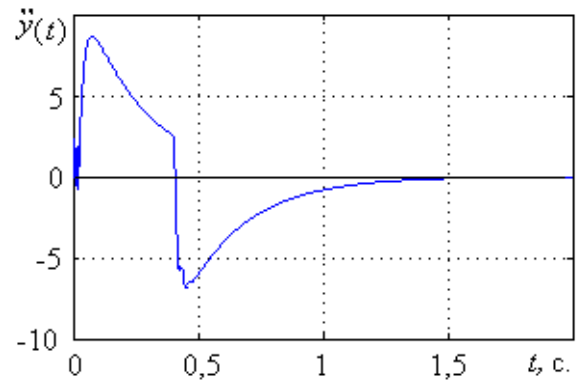


Рис. 8. График ускорения выходной величины

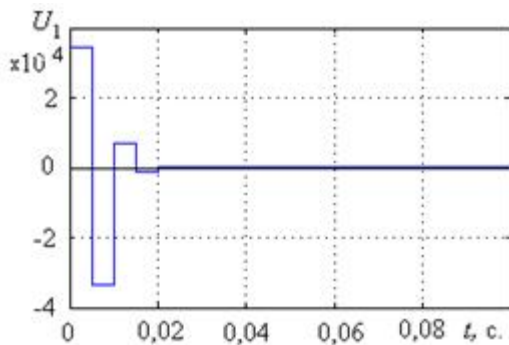


Рис. 9. Сигнал на выходе вычислителя в переходном процессе

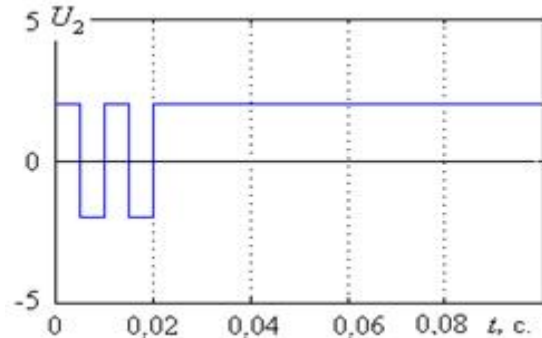


Рис. 10. Сигнал на выходе нелинейного звена

## Выводы

Разработанный метод позволяет рассчитать цифровой регулятор для следящей системы с астатизмом третьего порядка, с приводом постоянного тока при допустимой перегрузке по моменту вращения  $\lambda \in (8.5, 9)$ . Принято условие, что максимальное перерегулирование в переходной характеристике не превышает заданного значения. Метод рассчитан на использование двигателя с постоянной времени в пределах 0.1-1 с и усилителя мощности с постоянной времени в пределах 0.01-0.05 с. Использование на выходе регулятора нелинейного звена позволило применить в регуляторе дифференцирующие составляющие с необходимым по величине коэффициентом усиления, что обеспечило адекватность расчетных параметров и результатов моделирования.

## Список литературы

1. Акимов, Л.В. Исследование параметрического астатизма при синтезе регуляторов сложных электромеханических систем полиномиальным методом / Л.В. Акимов, Д.Г. Литвиненко // Электротехнические и компьютерные системы. – 2004. – № 4(80). – С. 7-14.

2. Гуль, А.И. Параметрична оптимізація багатократно інтегруючих і електромеханічних систем з критерієм максимальної добротності та запасу стійкості: дис. д-ра техн. наук; 05.09.03/ Національний технічний ун-т «Харківський політехнічний ін-т» - Х., 2004.
3. Каменский, В.А. Синтез ограниченного стабилизирующего управления для n-кратного интегратора / В.А. Каменский // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 6. – С. 33-40.
4. Бобриков, С.А. Цифровой регулятор в системе управления с астатизмом второго порядка / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 12(88). – С. 55-60.
5. Бобриков, С.А. Цифровая система управления непрерывным дозатором сыпучих материалов / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 14(90). – С. 7-13.
6. Бобриков, С.А. Оптимальная настройка цифрового регулятора для системы управления с астатизмом второго порядка / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, О.Б. Бабийчук // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – № 17(93). – С. 80-86.
7. Бобриков, С.А. Преобразование непрерывной передаточной функции управляющего устройства в дискретную / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 10(86). – С. 68-72.
8. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 719 с.
9. Carroll, C. Discrete Compensation of Control Systems with Integrated Circuits / C. Carroll, R. White // IEEE Transactions. – 1967. – No. 5.
10. Фишман, Л.З. Условия сохранения характера границы области устойчивости непрерывной системы при замене её дискретной / Л.З. Фишман // Автоматика и телемеханика. 1991. – № 4. – С. 186-189.

### СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА У СТЕЖАЧІЙ СИСТЕМІ З АСТАТИЗМОМ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ

С.О. Бобриков, Е.Д. Пичугин, Н.Н. Дикий

Одеський національний політехнічний університет  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: bobrikov1932@mail.ru

Проведений синтез цифрового регулятора для стежачої системи з астатизмом третього порядку. Виконано моделювання системи в пакеті MATLAB - Simulink. Розроблений метод розрахунку цифрового регулятора за заданими параметрами незмінної частини стежачої системи і необхідними показниками якості. Показниками вибрано максимальне перерегулювання в перехідній характеристиці і максимальне перевантаження приводу по моменту в режимі розгону. Використовується перетворення безперервної передатної функції регулятора в дискретну. Наведений приклад розрахунку і результати моделювання.

**Ключові слова:** система управління, астатизм, цифровий регулятор, передатні функції безперервна і дискретна, моделювання, перехідна характеристика, перевантаження приводу по моменту, показники якості управління

### SYNTHESIS AND DESIGN OF DIGITAL REGULATOR IN SERVOSYSTEM WITH ASTATISM OF THE THIRD ORDER

S.A. Bobrikov, E.D. Pichugin, N.N. Dikiy

Odesa National Polytechnic University,  
1 Shevchenko Str., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: bobrikov1932@mail.ru

The synthesis of digital regulator is conducted for a servosystem with the astatism of the third order. The design of the system is executed in the package of MATLAB - Simulink. The method of calculation of digital regulator is worked out on preset parameter of unalterable part of servosystem and required indexes of quality. Indexes are choose a maximal overcorrection in transitional description and maximal overload of drive on a moment in the mode of acceleration. Transformation of continuous transmission function of regulator is used to discrete. An example of calculation and design results are made.

**Keywords:** control system, astatism, digital regulator, transmission functions continuous and discrete, design, transitional description, overload of drive on a moment, indexes of management quality

# ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ НА ПІДСТАВІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

**М.С. Яджак, О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник**

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України,  
вул. Наукова, 3-Б, м. Львів, 79060, Україна; e-mail: yadzhak\_ms@ukr.net

В роботі описана методика комплексного оцінювання стану та якості функціонування складних ієрархічно-мережевих систем. Для одержання адекватних оцінок вона залучає велику кількість характеристик та параметрів оцінювання, що загалом потребує виконання значних обсягів обчислень. Розроблено та досліджено підходи до оптимізації запропонованої методики оцінювання на підставі ефективної організації паралельних обчислень. Запропоновано алгоритмічні конструкції для реалізації методики комплексного оцінювання на сучасних та перспективних обчислювальних системах. Зазначено особливості такої реалізації на багатоядерних комп'ютерах, кластерних системах та у високопродуктивних обчислювальних середовищах. Наведено деякі теоретичні оцінки прискорення паралельних обчислень. Одержані в роботі результати можуть бути використані для комплексного оцінювання складних систем із багатьох предметних областей (транспортні системи, системи зв'язку та енергозабезпечення тощо) на підставі застосування сучасних програмних та апаратних засобів.

**Ключові слова:** складна система, ієрархічна структура, мережа, комплексне оцінювання, паралельний алгоритм, оптимізація, прискорення обчислень.

## Вступ

Зараз використання паралельних обчислень є важливим фактором прискорення обчислювального процесу під час розв'язання алгоритмічно складних задач [1]. Для ефективної реалізації паралельних алгоритмів розвиваються, поширюються та стають загальнодоступними програмні (мови програмування високого рівня C, Fortran, Python, Go, Delphi, Java; сервіси паралельного програмування MPI, OpenMP, TBB, CSP, CUDA; бібліотеки виконання паралельних завдань тощо) та апаратні (багатоядерні комп'ютери, кластерні системи, прискорювачі NVIDIA GPUs, співпроцесори Intel Xeon Phi, розподілені обчислювальні середовища [2]) засоби. Головним напрямком об'єднання високопродуктивних обчислювальних систем в усьому світі та в Україні зокрема є створення та розвиток grid-інфраструктури [3]. Більшість обчислювальних систем, об'єднаних в grid, є кластерного типу. Останнім часом здійснюється їх модернізація шляхом переходу на процесори з більшою кількістю ядер, залучення графічних процесорів [4] і прискорювачів спеціалізованих обчислень та збільшення пропускну здатності комунікаційної мережі, що з'єднує обчислювальні вузли.

До алгоритмічно складних задач відносяться задачі оцінювання стану та якості функціонування складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС) [5]. У таких задачах для одержання адекватних оцінок використовується велика кількість характеристик та параметрів оцінювання, що загалом призводить до виконання значних обсягів обчислень. Окрім цього, оцінювання багатьох систем необхідно здійснювати у режимі

реального часу. Тому для розв'язання згаданих задач потрібно використовувати паралельні обчислення.

Раніше нами був запропонований паралельно-последовний підхід [6] для оптимізації (за часом) обчислень під час локального оцінювання якості функціонування складних динамічних систем. На підставі цього підходу запропоновано ефективні алгоритмічні конструкції для реалізації на паралельних системах зі спільною пам'яттю. У праці [7] розроблено та досліджено алгоритмічні конструкції для агрегованого оцінювання поведінки елемента системи, окремих підсистем та системи загалом. Ці конструкції зорієнтовані на виконання на паралельних обчислювальних системах зі спільною та розподіленою пам'яттю. Розроблені в [6, 7] підходи до організації паралельних обчислень дозволяють враховувати реальні апаратні можливості (кількість обчислювальних вузлів та ядер вузла, обсяг пам'яті вузла, продуктивність комунікаційної мережі тощо) наявної обчислювальної системи.

*Метою* цієї роботи є розробка підходів до розпаралелювання описаної в [8] методики комплексного оцінювання стану та якості функціонування СІМС, яка ґрунтується на різнобічному, багатокритеріальному та багаторівневому аналізі поведінки характеристик їх елементів та підсистем.

### **Складні ієрархічно-мережеві системи та особливості методики їх комплексного оцінювання**

Розглядаємо СІМС як об'єкт, що складається із багатьох взаємопов'язаних між собою елементів різного типу та призначення, може реалізувати певну кількість різноманітних функцій, а його стан змінюється в часі [8]. При цьому функції системи є композицією функцій, які можуть реалізувати її елементи. Зазвичай елементи СІМС об'єднуються в підсистеми різного рівня складності та функціонального призначення, утворюючи ієрархічно-мережеву структуру. Особливість такої структури полягає в тому, що кожна підсистема певного рівня ієрархії поділяється на сукупність підсистем, які утворюють підмережу мережі нижчого рівня, тобто вона є сукупністю вузлів, поєднаних ребрами, по яких здійснюється рух потоків [8]. При цьому ребра повинні забезпечувати безперешкодне проходження потоку, а вузли – його обробку. Ієрархія вводиться на основі принципів побудови системи управління, просторового розміщення об'єктів системи тощо. Прикладами СІМС є великі промислові підприємства, банківські системи, торгівельні мережі, транспортні системи, системи зв'язку, постачання та життєзабезпечення тощо.

Очевидно, що із ієрархічності структури розглядуваної нами складної системи впливає потреба у багаторівневих оцінках: від локальних, які визначають стан та якість функціонування окремих елементів, до агрегованих, кожна з яких визначає стан або роботу окремих підсистем чи системи загалом. Для дослідження стану та якості функціонування СІМС розроблена методика [8–11], яка включає локальне, прогностичне, агреговане та інтерактивне оцінювання. Зауважимо, що згадана методика містить ще такі початкові етапи, як відбір первинних даних (характеристик елементів підсистем досліджуваної СІМС), їх опрацювання з метою усунення неточностей і шумів та кінцевий етап – візуалізацію результатів оцінювання. Ця методика адаптована до застосування на залізничній транспортній системі України [12, 13].

Під час локального оцінювання [9] досліджуються характеристики, що описують стан та функціонування елементів системи. Таке дослідження проводиться за певною кількістю параметрів та критеріїв, які визначаються особливостями характеристик елемента та метою оцінювання [14]. Для одержання локальних оцінок використовуються методи аналізу міри виходу значень характеристик за межі областей допустимих значень за двома параметрами. Зауважимо, що параметри, які ґрунтуються на рівномірній метриці, дозволяють відстежувати окремі «піки» та збурення у поведінці

досліджуваної характеристики та її похідних, а параметри, що ґрунтуються на середньоквадратичній метриці, дозволяють визначати узагальнене значення виходу характеристики за межі області допустимих значень. За кожним із параметрів формуються уточнені бальні оцінки поведінки відповідної характеристики [15].

Прогностичне оцінювання дозволяє прогнозувати стан та якість функціонування елементів або підсистем СІМС на коротко- та довгострокову перспективу [9]. Результати такого оцінювання характеристик елемента можуть розглядатися як складові локального оцінювання. При цьому прогнозуватися можуть як самі оцінки, так і поведінка характеристик елементів системи. Прогностичний аналіз уточнених оцінок дозволяє визначити момент часу, коли понятійна оцінка зменшиться на одиницю за того ж режиму експлуатації та за відсутності факторів, які можуть різко погіршити стан або якість функціонування елемента системи. Термін короткострокового прогнозу природно обмежувати часом наступного планового дослідження оцінюваних об'єктів. Процедура короткострокового прогностичного оцінювання поведінки характеристики елемента полягає у прогнозуванні її поточкових значень та здійснюється за допомогою екстраполяційного підходу. Її доцільно проводити лише для тих характеристик, для яких одержано негативний прогноз оцінки на момент наступного планового дослідження. Це дозволяє завчасно усунути потенційні ризики стану або процесу функціонування елемента системи. Для довгострокового прогнозування, до якого залучають декілька періодів планових досліджень та удосконалення після них об'єктів системи, використовується апарат часових рядів.

Агреговане оцінювання здійснюється з метою узагальнення локальних оцінок, тобто одержання висновків про стан та якість функціонування підсистем різних рівнів ієрархії та системи загалом [10]. Ці висновки одержуються на підставі трьох підходів. Згідно з першим підходом якість системи визначається якістю її «найслабшого» елемента. Цей підхід використовується під час оцінювання СІМС, в яких збої в роботі елементів можуть призвести до виходу з ладу окремих підсистем або всієї системи загалом. За другим підходом узагальнений висновок одержується за допомогою зваженої лінійної агрегації оцінок елементів з урахуванням їхньої пріоритетності. Пріоритетність визначається відповідними ваговими коефіцієнтами, які можуть бути наперед заданими (відомими) для об'єктів досліджуваної СІМС, легко встановлюватися, виходячи з особливостей системи та мети оцінювання, а також можуть формуватися на підставі залучення (опитування) експертів із відповідної предметної області унаслідок використання розроблених програмних засобів [16]. Основним недоліком цього підходу є нівелювання як позитивних, так і негативних оцінок. Більш адекватний до дійсності результат одержується на підставі третього підходу, який використовує нелінійну агрегацію. Головним недоліком, який суттєво обмежує застосування цього підходу для оцінювання якості системи, є складність урахування пріоритетності об'єктів, які її утворюють. Враховуючи основні підходи, нами розроблено гібридний метод агрегації [17], який поєднує переваги методів зваженої лінійної та нелінійної агрегації. Встановлено, що цей метод дозволяє одержувати більш адекватні та обґрунтовані висновки про стан і якість функціонування системи та окремих її підсистем.

Інтерактивне оцінювання є ефективним засобом неперервного моніторингу процесу функціонування системи та дозволяє на підставі взаємодії окремих її елементів або підсистем вчасно виявити такі з них, стан та якість функціонування яких викликає серйозні застереження [11]. Методи такого оцінювання дозволяють вчасно (до наступного планового огляду) відстежувати об'єкти системи, стан яких наближається до «незадовільного», та оперативно реагувати на виявлені недоліки. Під час інтерактивного оцінювання будуються локальні та агреговані оцінки досліджуваних об'єктів. На підставі цих оцінок доцільно будувати прогностичні інтерактивні оцінки, що дозволяють вчасно виявити та усунути загрози, не передбачені прогнозом, здійсне-

ним на основі регулярних планових досліджень, своєчасно корегувати такий прогноз і терміни перевірки та удосконалення окремих об'єктів СІМС. Зауважимо, що оцінюваними об'єктами системи в даному разі є потоки, шляхи їх проходження мережею, а також окремі вузли та ребра мережі.

Зазначимо, що під час оцінювання результатів планових досліджень СІМС необхідно опрацювати досить великі обсяги даних, які надходять з багатьох джерел через задані проміжки часу, а під час оцінювання результатів неперервного моніторингу необхідно опрацьовувати великі обсяги даних, які надходять з меншої кількості джерел (порівняно з плановими дослідженнями) неперервним потоком.

## Організація та способи реалізації паралельних обчислень

На підставі проведених попередніх досліджень [18] було зроблено висновок, що описана вище методика комплексного оцінювання стану та якості функціонування СІМС володіє значними резервами оптимізації за часом і може бути ефективно реалізована на сучасних обчислювальних системах суперкомп'ютерного класу [1, 3, 19], які стали більш доступними для використання. Тому нами запропоновано загальний підхід до оптимізації обчислень. Цей підхід передбачає виконання наступних кроків:

- відбір первинних даних, необхідних для оцінювання;
- попереднє опрацювання в режимі реального часу первинних даних;
- розпаралелювання обчислень безпосередньо під час оцінювання;
- зрозумілу кінцевому користувачу візуалізацію результатів оцінювання.

Перший крок полягає в забезпеченні високої швидкості поступлення первинних даних шляхом використання новітніх технічних та програмних засобів, які здійснюють їх відбір, та комунікаційних технологій.

Для реалізації другого кроку нами запропоновано низку високопаралельних алгоритмів цифрової фільтрації даних [20]. Ці алгоритми орієнтовані на реалізацію на квазісистолічних структурах, які можна розглядати як потенційні прискорювачі спеціалізованих обчислень для кластерних систем.

Третій крок є найбільш ємким і включає одночасне (паралельне) виконання блоків із таких сукупностей:

1. Локальне оцінювання поведінки  $n$  характеристик, що описують стан елементів системи (блоки  $X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s$ );
2. Локальне оцінювання поведінки  $m$  характеристик, що описують функціонування елементів системи (блоки  $X_1^f, X_2^f, \dots, X_m^f$ );
3. Оцінювання стану  $r$  елементів системи (блоки  $S_1^e, S_2^e, \dots, S_r^e$ );
4. Оцінювання стану  $s$  підсистем СІМС (блоки  $S_1^p, S_2^p, \dots, S_s^p$ );
5. Оцінювання якості функціонування  $q$  елементів системи (блоки  $F_1^e, F_2^e, \dots, F_q^e$ );
6. Оцінювання якості функціонування  $u$  підсистем СІМС (блоки  $F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p$ );
7. Прогнозування поведінки  $n_0$  поточкових значень характеристик елементів (блоки  $X_1, X_2, \dots, X_{n_0}$ ),  $n_1$  локальних (блоки  $L_1, L_2, \dots, L_{n_1}$ ) і  $n_2$  агрегованих (блоки  $A_1, A_2, \dots, A_{n_2}$ ) оцінок різного ступеня загальності;
8. Інтерактивне оцінювання процесу функціонування  $v$  елементів системи (блоки  $I_1^e, I_2^e, \dots, I_v^e$ );

9. Інтерактивне оцінювання процесу функціонування  $w$  підсистем СІМС (блоки  $I_1^p, I_2^p, \dots, I_w^p$ );

10. Прогнозування  $m_0$  інтерактивних оцінок (блоки  $I_1, I_2, \dots, I_{m_0}$ );

11. Оцінювання стану (блок  $S$ ), якості функціонування (блок  $F$ ) та інтерактивне оцінювання (блок  $I$ ) СІМС.

Залежно від типу складної системи та кінцевої мети оцінювання можуть розглядатися всі або лише деякі із наведених вище сукупностей блоків обчислень. При цьому в наборах 7 та 11 можуть розглядатися як усі блоки, так і лише деякі із них. Зауважимо, що для кожного із наведених вище наборів блоків обчислень здійснюється крупнозернисте (крупноблочне) розпаралелювання [21]. У цьому разі алгоритм обчислень є сукупністю загалом повністю автономних або слабозв'язаних паралельних гілок, кожна з яких має значний обсяг. Так, для набору блоків 1 такий алгоритм можна формально описати, використовуючи примітиви *fork*, *join* (галуження, злиття), за допомогою конструкції

$$\text{fork}(X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s) \text{ join} . \quad (1)$$

Для наборів 7 та 11 відповідні паралельні алгоритми обчислень можна описати за допомогою конструкцій

$$\text{fork}(X_1, X_2, \dots, X_{n_0}, L_1, L_2, \dots, L_{n_1}, A_1, A_2, \dots, A_{n_2}) \text{ join} \quad (2)$$

та

$$\text{fork}(S, F, I) \text{ join} . \quad (3)$$

Аналогічно можна записати алгоритмічні конструкції для паралельного виконання блоків решти наборів обчислень.

Зазначимо, що залежно від мети оцінювання окремі набори блоків можуть виконуватися одночасно, як, наприклад, 1 та 2; 3, 5 та 8 або 4, 6 та 9. Алгоритмічна конструкція паралельного виконання наборів 4, 6 та 9 блоків обчислень матиме вигляд:

$$\text{fork}(S_1^p, S_2^p, \dots, S_s^p, F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p, I_1^p, I_2^p, \dots, I_w^p) \text{ join} . \quad (4)$$

У разі, коли досліджувані підсистеми СІМС формуються виключно на базі оцінюваних елементів, описаних відповідними характеристиками, то набори 1, 3 та 4; 2, 5 та 6 або 8 та 9 блоків повинні виконуватись у послідовному режимі, а відповідна алгоритмічна конструкція для згаданої другої трійки наборів матиме вигляд:

$$\begin{aligned} &\text{fork}(X_1^f, X_2^f, \dots, X_m^f) \text{ join} , \\ &\text{fork}(F_1^e, F_2^e, \dots, F_q^e) \text{ join} , \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{fork}(F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p) \text{ join} .$$

Використання будь-якої із конструкцій (1)-(5) є найбільш ефективним у разі, коли обчислювальна складність блоків, які вона об'єднує, є приблизно однаковою. На практиці, під час дослідження реальних СІМС, ця умова ефективності може не завжди виконуватись. Тому на базі таких алгоритмічних конструкцій потрібно створювати нові шляхом об'єднання блоків з меншою обчислювальною складністю в один (декілька) нових блоків або ж формування абсолютно нових блоків обчислень.

Припустимо, що час виконання обчислень у кожному із блоків  $X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s$  дорівнює відповідно  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . Тоді для реалізації конструкції (1) потрібен час

$$t_{par}^{(1)} = \max\{t_1, t_2, \dots, t_n\}.$$

При цьому виконання згаданих блоків обчислень у послідовному режимі потребує часу

$$t_{seq}^{(1)} = t_1 + t_2 + \dots + t_n.$$

Отже, прискорення паралельних обчислень за (1) можна обчислити за формулою

$$S^{(1)} = (t_1 + t_2 + \dots + t_n) / \max\{t_1, t_2, \dots, t_n\}.$$

У разі, коли виконуються рівності

$$t_1 = t_2 = \dots = t_n = t_0,$$

отримуємо, що

$$S^{(1)} = nt_0 / t_0 = n.$$

Отже, у цьому випадку прискорення  $S^{(1)}$  набуває свого оптимального значення. Тут вважаємо, що між блоками обмінів немає або їх кількість є незначною і вони не впливають на швидкість виконуваних обчислень. Аналогічні міркування можливі стосовно конструкцій (2)-(4).

Що ж стосується алгоритмічної конструкції (5), то слід зазначити, що оцінювання елементів та підсистем СІМС може здійснюватись на різних рівнях ієрархії і при цьому необхідно враховувати час, що витрачається на передачу результатів оцінювання елементів.

Вважаємо, що час виконання кожного із блоків  $X_1^f, X_2^f, \dots, X_m^f$  дорівнює відповідно  $\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_m$ , блоків  $F_1^e, F_2^e, \dots, F_q^e$  – відповідно  $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_q$ , а блоків  $F_1^p, F_2^p, \dots, F_u^p$  – відповідно  $\bar{\bar{t}}_1, \bar{\bar{t}}_2, \dots, \bar{\bar{t}}_u$ . Тоді час виконання конструкції (5) складе

$$t_{par}^{(5)} = \max\{\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_m\} + \max\{\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_q\} + \max\{\bar{\bar{t}}_1, \bar{\bar{t}}_2, \dots, \bar{\bar{t}}_u\} + T_{com}^p,$$

де  $T_{com}^p = \max\{T_{com}^1, T_{com}^2, \dots, T_{com}^q\}$ ,  $T_{com}^i$  – час передачі результату оцінювання  $i$ -го елемента.

Виконання згаданих блоків обчислень у послідовному режимі потребує часу

$$t_{seq}^{(5)} = (\tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \dots + \tilde{t}_m) + (\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \dots + \bar{t}_q) + (\bar{\bar{t}}_1 + \bar{\bar{t}}_2 + \dots + \bar{\bar{t}}_u) + T_{com}^s.$$

Тут  $T_{com}^s$  – час передачі результату оцінювання елемента, що досліджується останнім. Вважаємо, що передача результатів оцінювання решти елементів є суміщена із власне оцінюванням кожного наступного елемента. Отже, прискорення паралельних обчислень за (5) можна обчислити за формулою

$$S^{(5)} = ((\tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \dots + \tilde{t}_m) + (\bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \dots + \bar{t}_q) + (\bar{\bar{t}}_1 + \bar{\bar{t}}_2 + \dots + \bar{\bar{t}}_u) + T_{com}^s) / (\max\{\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \dots, \tilde{t}_m\} + \max\{\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_q\} + \max\{\bar{\bar{t}}_1, \bar{\bar{t}}_2, \dots, \bar{\bar{t}}_u\} + T_{com}^p).$$

Якщо ж виконуються рівності

$$\tilde{t}_1 = \tilde{t}_2 = \dots = \tilde{t}_m = \tilde{t}_0, \quad \bar{t}_1 = \bar{t}_2 = \dots = \bar{t}_q = \bar{t}_0 \quad \text{та} \quad \bar{\bar{t}}_1 = \bar{\bar{t}}_2 = \dots = \bar{\bar{t}}_u = \bar{\bar{t}}_0,$$

отримаємо, що

$$S^{(5)} = (m\tilde{t}_0 + q\bar{t}_0 + u\bar{\bar{t}}_0 + T_{com}^s) / (\tilde{t}_0 + \bar{t}_0 + \bar{\bar{t}}_0 + T_{com}^p).$$

У разі  $\tilde{t}_0 = \bar{t}_0 = \bar{\bar{t}}_0 = t^*$  та  $T_{com}^p = \alpha t^*$ ,  $T_{com}^s = \beta t^*$ ,  $\alpha, \beta \in R$  маємо таку формулу для прискорення:

$$S^{(5)} = (m + q + u + \beta)t^* / ((3 + \alpha)t^*) = (m + q + u + \beta) / (3 + \alpha).$$

Тобто, за умов  $\alpha = \beta = 0$  прискорення  $S^{(5)}$  набуває свого оптимального значення.

Зазначимо, що під час розроблення алгоритмічних конструкцій для дослідження об'єктів реальних СІМС потрібно зважати і на обсяг доступних обчислювальних ресурсів. В ідеальному випадку кількість паралельно виконуваних блоків обчислень (паралельних гілок) повинна дорівнювати кількості доступних процесорних елементів (ядер) або обчислювальних вузлів наявної паралельної системи. Лише за таких вимог до результуючих конструкцій можна очікувати, що їх реалізація на сучасних доступних обчислювальних засобах [22], буде доволі ефективною.

Поряд із одержанням адекватних кількісних оцінок для об'єктів СІМС не менш важливою є проблема візуалізації результатів оцінювання. Для її вирішення розроблено оригінальні підходи [9–11], які дозволяють побачити не лише кількісну, але й якісну картину. При цьому сама візуалізація може здійснюватись у режимі реального часу одночасно на деякій кількості моніторів, підключених до обчислювальної мережі або окремого її вузла. Отже, одночасно можна одержувати та аналізувати значну кількість якісної інформації про стан та якість функціонування елементів, підсистем та систем загалом.

Для подальшого зменшення часу обчислень є можливість їх розпаралелювання у межах кожного із виділених вище блоків  $X_i^s$  ( $i = \overline{1, n}$ ),  $X_j^f$  ( $j = \overline{1, m}$ ),  $S_k^e$  ( $k = \overline{1, r}$ ),  $S_l^p$  ( $l = \overline{1, s}$ ),  $F_m^e$  ( $m' = \overline{1, q}$ ),  $F_n^p$  ( $n' = \overline{1, u}$ ),  $X_{i'}^e$  ( $i' = \overline{1, n_0}$ ),  $L_{j'}$  ( $j' = \overline{1, n_1}$ ),  $A_k$  ( $k' = \overline{1, n_2}$ ),  $I_l^e$  ( $l' = \overline{1, v}$ ),  $I_{j_1}^p$  ( $j_1 = \overline{1, w}$ ),  $I_{j_2}$  ( $j_2 = \overline{1, m_0}$ ), використовуючи підходи, детально описані у працях [6, 7].

Залежно від структури СІМС її дослідження можна проводити з допомогою розглянутих вище алгоритмічних конструкцій на різних обчислювальних засобах, починаючи від багатоядерних комп'ютерів і закінчуючи високопродуктивними обчислювальними середовищами. Для оцінювання низки систем (авто-, електротранспортна системи та системи газо-, водо- і енергопостачання міста, великі промислові підприємства тощо), елементи (підсистеми) яких розташовані територіально на незначній відстані один від одного, достатньо використати сучасні багатоядерні комп'ютери (декілька ядер працюють над спільною пам'яттю), підключені до локальної мережі, або ж кластери (декілька обчислювальних вузлів, з'єднаних високошвидкісною комунікаційною мережею, а пам'ять розподілена між ними). При цьому для кожної досліджуваної системи залежно від необхідного обсягу та структури виконуваних обчислень можна залучати засоби відповідної продуктивності та архітектури. Отже, такий підхід дозволяє проводити оптимізацію обчислювальних засобів під конкретну задачу (клас задач), тобто фактично зменшувати вартість оцінювання системи.

У разі, коли елементи (підсистеми) СІМС є територіально розташовані один від одного на значній (десятки, сотні та тисячі кілометрів) відстані (наприклад, залізнична

транспортна система та системи енерго- і газопостачання країни), тоді для ефективної реалізації методики комплексного оцінювання на базі запропонованих алгоритмічних конструкцій необхідно залучати (організовувати) високопродуктивне обчислювальне середовище. Загалом, таке середовище складається із територіально розподілених обчислювальних вузлів, з'єднаних комунікаційною мережею, і повністю відображає структуру (зазвичай ієрархічну) досліджуваної системи. Згадане середовище повинно володіти низкою таких властивостей: розподіленість, неоднорідність, динамічність, надійність, масштабність [2, 23]. Зауважимо, що під час використання високопродуктивного обчислювального середовища особлива увага приділяється забезпеченню належної пропускної здатності комунікаційної мережі. При цьому час, що витрачається на обміни, не повинен впливати на швидкість виконуваних обчислень. Найпростіше цього можна досягти, сумістивши виконання обчислювальних та обмінних операцій. У порівнянні з традиційним grid [3] обмін даними в такому середовищі та доступ до його ресурсів є доволі обмеженим і регламентується досить строгими правилами. Зазначимо, що в даному разі є можливість вибору оптимальних конфігурацій для вузлів обчислювального середовища та комунікаційної мережі, що суттєво зменшує вартість використовуваного обладнання, а, отже, і вартість процесу оцінювання СІМС.

## Висновок

У роботі виділено основні характерні особливості складових методики комплексного оцінювання СІМС та розглянуто підходи до її оптимізації за часом на підставі ефективної організації паралельних обчислень. Запропоновано та досліджено алгоритмічні конструкції для виконання цієї методики або окремих її частин. Обговорено можливості реалізації згаданих конструкцій на сучасних і перспективних паралельних обчислювальних засобах. Наведено деякі оцінки прискорення паралельних обчислень. Одержані у даній роботі результати є доволі універсальними і можуть бути використані під час оцінювання стану та якості функціонування СІМС різних типів та призначення, зокрема, транспортних мереж, фінансових та банківських установ, торгівельних мереж, мереж життєзабезпечення окремих міст та цілих регіонів тощо. Запропоновано окремі способи здешевлення процесу оцінювання систем та їх об'єктів. Розроблені в роботі підходи до розпаралелювання методики комплексного оцінювання систем дозволяють використовувати для її реалізації не лише обчислювальні системи зі спільною (багатоядерні комп'ютери) та розподіленою (кластери, обчислювальні середовища) пам'яттю, але і засоби з гібридною архітектурою (кластери, що об'єднують багатоядерні системи, із залученням графічних [24], систолічних, квазісистолічних [25, 26] та інших процесорів для швидкого виконання спеціальних обчислень).

Подальші свої дослідження автори вбачають в адаптації запропонованих підходів для дослідження реальних складних систем і в розробці відповідних практичних рекомендацій стосовно можливостей доступних програмних та обсягу і архітектури використовуваних апаратних засобів.

## Список літератури

1. Информационно-аналитический центр по параллельным вычислениям. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.parallel.ru](http://www.parallel.ru).
2. Воеводин, Вл.В. Решение больших задач в распределённых вычислительных средах / Вл.В. Воеводин // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 5. – С. 32–45.
3. Український національний грід. Базовий координаційний центр. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: [www.ung.in.ua](http://www.ung.in.ua).

4. Погорельий, С.Д. Анализ методов повышения производительности компьютеров с использованием графических процессоров и программно-аппаратной платформы CUDA / С.Д. Погорельий, Ю.В. Бойко, М.И. Трибрат, Д.Б. Грязнов // Математичні машини і системи. – 2010. – № 1. – С. 40–54.
5. Polishchuk, O. Big Data Processing in Complex Hierarchical Network Systems I: Structures and Information Flows / O. Polishchuk, D. Polishchuk, M. Tyutyunnyk, M. Yadzhak // AASCIT Communications. – 2016. – Vol.3, № 3. – P. 112–118.
6. Поліщук, О.Д. Організація паралельних обчислень для локального оцінювання якості функціонування складних систем / О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник, М.С. Яджак // Відбір і обробка інформації. – 2010. – Вип. 32 (108). – С. 119–124.
7. Поліщук, О.Д. Оцінювання якості функціонування складних систем на основі паралельної організації обчислень / О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник, М.С. Яджак // Відбір і обробка інформації. – 2007. – Вип. 26 (102). – С. 121–126.
8. Поліщук, Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина I. Опис методики / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 1. – С. 21–31.
9. Поліщук, Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина II. Локальне та прогностичне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 2. – С. 26–38.
10. Поліщук, Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина III. Агреговане оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 4. – С. 20–31.
11. Поліщук, Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем. Частина IV. Інтерактивне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2016. – № 1. – С. 7–16.
12. Яджак, М.С. Дослідження стану та якості функціонування залізничної транспортної системи: I. Локальне, прогностичне та агреговане оцінювання / М.С. Яджак, О.Д. Поліщук, Д.О. Поліщук // Вісник НТУ. – 2012. – Вип. 26. – С. 385–391.
13. Яджак, М.С. Дослідження стану та якості функціонування залізничної транспортної системи: II. Інтерактивне оцінювання / М.С. Яджак, О.Д. Поліщук, Д.О. Поліщук // Вісник НТУ. – 2012. – Вип. 26. – С. 379–385.
14. Поліщук, Д.О. Порівняння методів оцінювання складних систем / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Відбір і обробка інформації. – 2010. – Вип. 32 (108). – С. 110–118.
15. Polishchuk, D. About Evaluation of Complex Dynamical Systems [Electronic resource] / D. Polishchuk, O. Polishchuk // Journal of Complex Systems. – 2013. – Article ID 204304, 6 p. – Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/204304>
16. Терендій, О.В. Інтелектуальна система збору інформації в вузькоспеціалізованій предметній області / О.В. Терендій, Р.А. Бунь // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України. – 2007. – Вип. 41. – С. 158–163.
17. Polishchuk, O. Aggregated evaluation of function quality of complex hierarchical network systems [Electronic resource] // arXiv preprint. – arXiv:1603.02317 [cs.SY]. – 9 Mar 2016. – 7p.
18. Поліщук, О.Д. Проблема оптимізації методики комплексного оцінювання стану та якості функціонування складних систем / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): праці міжнар. наук.-практ. конф., 12–15 травня 2015 р., м. Київ – м. Черкаси. – Черкаси, 2015. – С. 138–139.
19. Список найпотужніших обчислювальних систем світу. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.top500.org](http://www.top500.org).
20. Яджак, М.С. Оптимальный алгоритм решения задачи цифровой фильтрации с использованием адаптивного сглаживания / М.С. Яджак, М.И. Тютюнник // Кибернетика и системный анализ. – 2013. – № 3. – С. 142–151.
21. Вальковский, В.А. Распараллеливание алгоритмов и программ. Структурный подход / В.А. Вальковский. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
22. Клименко, В.П. Суперкомпьютеры: особенности современной модернизации / В.П. Клименко, Э.И. Комухаев // Математичні машини і системи. – 2010. – № 3. – С. 3–8.
23. Polishchuk, O. Big Data Processing in Complex Hierarchical Network Systems II: Computer Environments and Parallelization / O. Polishchuk, D. Polishchuk, M. Tyutyunnyk, M. Yadzhak // AASCIT Communications. – 2016. – Vol. 3, № 3. – P. 119–124.
24. Якуба, А.А. Развитие ускорителей специализированных вычислений / А.А. Якуба, Э.И. Комухаев, С.Г. Рябчун // Математичні машини і системи. – 2010. – № 2. – С. 10–20.
25. Вальковский, В.А. Моделирование и реализация нейронных сетей на моделях параллельной обработки информации / В.А. Вальковский, М.С. Яджак // Теория и общие вопросы

- обработки аналоговой информации: Труды междунар. конф. «Методы и средства преобразования и обработки аналоговой информации», 8–10 июня 1999 г., г. Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ, 1999. – Т. 1. – С. 53–55.
26. Яджак, М.С. Об оптимальном в одном классе алгоритме решения трёхмерной задачи цифровой фильтрации / М. С. Яджак // Проблемы управления и информатики. – 2000. – № 6. – С. 66–81.

## ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВАНИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

М.С. Яджак, А.Д. Полищук, М.И. Тютюнник

Институт прикладных проблем механики и математики им. Я.С. Пидстригача НАН Украины, ул. Научная, 3-Б, г. Львов, 79060, Украина; e-mail: yadzhak\_ms@ukr.net

В работе описана методика комплексного оценивания состояния и качества функционирования сложных иерархически-сетевых систем. Для получения адекватных оценок она использует большое количество характеристик и параметров оценивания, что в целом требует выполнения значительных объёмов вычислений. Поэтому разработаны и исследованы подходы к оптимизации предложенной методики оценивания на основании эффективной организации параллельных вычислений. Предложены алгоритмические конструкции для реализации методики комплексного оценивания на современных и перспективных вычислительных системах. Отмечены особенности такой реализации на многоядерных компьютерах, кластерных системах и в высокопроизводительных вычислительных средах. Приведены некоторые теоретические оценки ускорения параллельных вычислений. Полученные в работе результаты могут быть использованы для комплексного оценивания сложных систем из различных предметных областей (транспортные системы, системы связи и энергообеспечения и т. д.) на основании применения современных программных и аппаратных средств.

**Ключевые слова:** сложная система, иерархическая структура, сеть, комплексное оценивание, параллельный алгоритм, оптимизация, ускорение вычислений.

## THE OPTIMIZATION OF METHODS OF COMPLEX EVALUATION FOR COMPLEX SYSTEMS ON THE BASE OF PARALLEL COMPUTATIONS

M.S. Yadzhak, O.D. Polishchuk, M.I. Tyutyunyk

Ya.S. Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, NAS Ukraine, Naukova st., 3 b, L'vov, 79060, Ukraine; e-mail: yadzhak\_ms@ukr.net

Methods of complex evaluation of the state and operation quality for complex hierarchical network systems are described in the paper. These methods are using a large number of characteristics and parameters of evaluations for obtaining the adequate conclusions. Such procedures require performance of huge amounts of computations. Therefore, approaches to the optimization of the proposed methods of evaluation based on the efficient organization of parallel computations are developed and investigated. Algorithmic constructions for the implementation of the methods of complex evaluation on the modern and perspective computer systems are offered. Features of this implementation on multi-core computers, cluster systems and high-performance computing environments are determined. Some theoretical estimates of the acceleration of parallel computing are presented. Results of this work can be used for complex evaluation of real hierarchical network systems from different subject areas (transport systems, communication and power supply systems etc.) based on the use of modern software and hardware.

**Key words:** complex system, hierarchical structure, network, complex evaluation, parallel algorithm, optimization, computing acceleration.

# METHOD OF DETECTION THE FACT OF COMPRESSION IN DIGITAL IMAGES AS AN INTEGRAL PART OF STEGANALYSIS

**A.V. Akhmametiyeva**

Odesa National Polytechnic University,  
1 Shevchenko Str., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: anna-odessitka@mail.ru

The new method of detection the fact of compression in color digital images, allowing separate images, initially stored in lossless formats, from images, resaved into lossless format from losses formats, which analyzes spatial domain of digital contents, that allows avoid additional accumulation of a computing errors, is presented. The developed method is based on the accounting sequential color triads of triplets in the matrix of unique colors, and can be used to define the format of the original container in steganalysis.

**Keywords:** digital image, compression, losses format, lossless format, spatial domain, sequential color triads of triplets

## Introduction

Nowadays developments in the field of steganography are widely used, providing transmission of confidential information via open channels of communication, hiding at the same time the fact of its presence at a container, that can be used by criminals. Digital images both in losses formats and in lossless formats can be used as containers (cover images) in steganography. After embedding of additional information into spatial domain of the container by LSB method the stego, that is the result of embedding of additional information into container, is saved in lossless format, so in the process of steganalysis, aimed at the detecting the fact of the presence/absence of hidden information in any digital content [1], as a rule, there is digital content in lossless format in the absence of an original container. The possibility of separating digital images, stored in lossless formats initially, from digital imaged, resaved into lossless format from losses formats, can increase efficiency of steganalysis, having specified the action which is carried out with digital image.

The problem of determining the format of the original container is essential in different sources: for method developed in [2-4] selection of different thresholds depending on the container format is required; proposed in [5-6] method is designed for containers in losses formats [7]; different conditions for digital images in losses/lossless formats are applied in method proposed in [8]. In [9] an approach for separation of digital images, stored in lossless formats initially, from digital imaged, resaved into lossless format from losses formats, is proposed, however, as a computational experiment conducted by the author showed, opposite results are received for various technical devices with different matrixes of quantization, what requires availability of data on matrixes of quantization of various devices and the ratios corresponding to them for ensuring effective work of the algorithm, that implements this approach. Besides, the approach proposed in [8] implies the transfer of a digital content to transformation domain that leads to the additional accumulation of computational errors, so the development of a similar method, that carry out the analysis of the spatial domain, is an actual problem.

The aim of the paper is development of the method that uses spatial domain of digital content for the analysis and allows separate digital images, stored in lossless formats initially, from digital imaged, resaved into lossless format from losses formats, which is a component of steganalysis.

## Main part

In [5-6] was proposed steganalytic method, aimed to detect the presence/absence of the additional information in digital images stored in losses format initially, based on the accounting of sequential color triads of triplets in the matrix of unique colors  $UCT$  of size  $U \times 3$ , containing unique color triplets  $(r_i, g_i, b_i)$ ,  $i = \overline{1, U}$ , which at least once occur in the analyzed digital image, where  $r$  - brightness value of red color component,  $g$  - brightness value of green color component,  $b$  - brightness value of blue color component,  $U$  - number of unique color triplets.

Under a sequential Red- (Green-, Blue-) triad of triplets in the matrix of unique colors we will call triads:

$$(r_i, g_i, b_i) \in UCT \ \& \ (r_i + 1, g_i, b_i) \in UCT \ \& \ (r_i - 1, g_i, b_i) \in UCT, \ i = \overline{1, U}; \quad (1)$$

$$(r_i, g_i, b_i) \in UCT \ \& \ (r_i, g_i + 1, b_i) \in UCT \ \& \ (r_i, g_i - 1, b_i) \in UCT, \ i = \overline{1, U}; \quad (2)$$

$$(r_i, g_i, b_i) \in UCT \ \& \ (r_i, g_i, b_i + 1) \in UCT \ \& \ (r_i, g_i, b_i - 1) \in UCT, \ i = \overline{1, U}; \quad (3)$$

respectively. When counting the sequential triads of triplets we will associate sequential triad with  $(r_i, g_i, b_i) \in UCT$ , for which execution of the conditions (1), (2) or (3) depending on the type of triad is carried out. Triplet  $(r_i, g_i, b_i) \in UCT$  we will call middle if there is a sequential triad for him.

The basic triad is a sequential triad corresponding to that color component of the container, into which embedding of additional information was carried out.

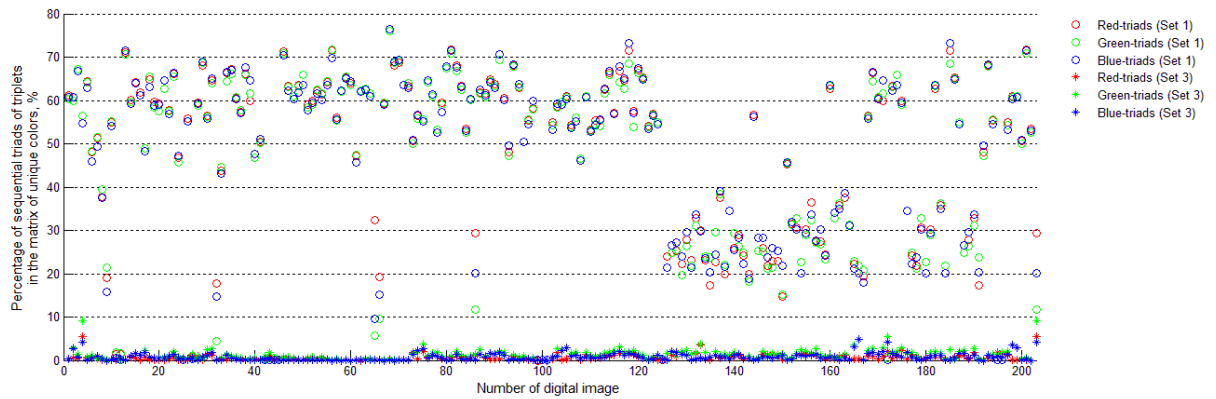
Concomitant triads are that sequential triads that corresponds to unfilled color components of the container.

In [7] the computational experiment, aimed to analyze the quantity of Red-, Green- and Blue-triads in unfilled digital containers stored in losses/lossless formats, was carried out. In computational experiments digital image database is used, which includes:

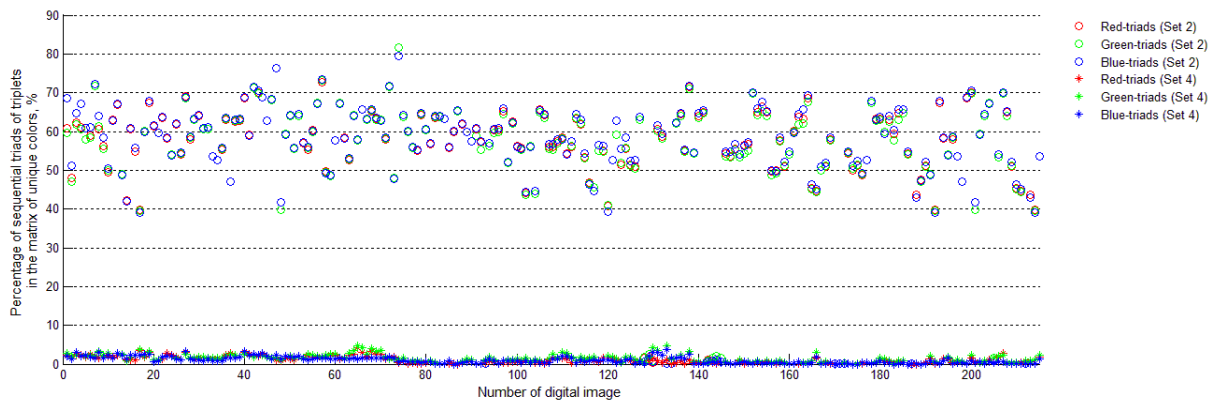
1. Set 1: 200 color digital images from [10] in TIFF format;
2. Set 2: 200 images received by non-professional photo cameras in TIFF format;
3. Set 3: 203 color digital images from [10] in JPG format;
4. Set 4: 215 images received by non-professional photo cameras in JPG format.

As a result of computational experiment the characteristic difference between losses and lossless formats was revealed. As computational experiments showed, the matrix of unique colors of the unfilled containers stored in losses format contains insignificant quantity of middle triplets (generally up to 3%), containers stored in lossless format are characterized by high quantity of middle triplets in the matrix of unique colors (on average 40-60%) due to the lack of compression and, consequently, a large variety of unique colors, wherein percentage of Red-, Green-, Blue-triads of triplets differ slightly from each other.

Figure 1 shows the distribution of the quantity of sequential triads of triplets in the matrix of unique colors for digital images from Set 1 (TIFF) and 3 (JPG) from the NRCS Base [10] (Fig. 1a), and digital images from Set 2 (TIFF) and 4 (JPG) received by non-professional cameras (Fig. 1b).



a



b

**Fig. 1.** Comparison of the distribution of the quantity of sequential triads of triplets in the matrix of unique colors of original digital images: a – from Set 1 and 3; b – from Set 2 and 4

As can be seen from Fig. 1 the approach based on the analysis of sequential triads of triplets in the matrix of unique colors allows separate digital images, stored in lossless formats initially, from digital images, resaved into lossless format from losses formats. Especially significantly digital images from Set 2 and 4 differ, where there are practically no intersections.

However there is a question: is it possible separate containers stored in losses format from containers stored in lossless format in case when the analyzed content is not original, but stego, formed by embedding of additional information by LSB method. To answer this question computational experiment on the basis of digital images from Set 1-4 was carried out that analyzes the percentage of sequential triads of triplets in the matrices of unique colors of stego, formed by embedding of additional information with varying degrees of filling and different values of hidden capacity: into one color component, into two color components, into all three color components. The comparative characteristic of quantity of sequential triads of triplets for the JPG and TIFF formats is provided in table 1.

An illustration of change of quantity of sequential triads in a matrix of unique colors serves Figure 2, where additional information embeds only into red color component (for example) of digital image with different values of hidden capacity. The bar charts (Fig. 2, b, d) reflects the change in the percentage of Red-, Green, Blue-triads of triplets in the matrix of unique colors of stego compared to unfilled containers (hidden capacity 0 bpp).

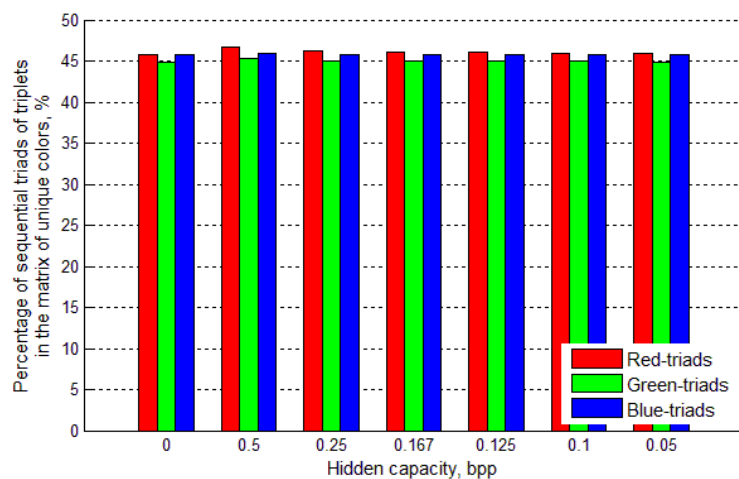
**Table 1.**

The comparative characteristic of quantity of sequential triads of triplets in the matrix of unique colors of original digital images and stego, formed with varying degrees of filling

		TIFF	JPG
Unfilled containers		High percentage ( $\approx 20-70\%$ ) of sequential triads of triplets, quantity of Red-, Green-, Blue-triads is comparable by values	Low percentage (up to 5%) of sequential triads of triplets, quantity of Red-, Green-, Blue-triads is comparable by values
Stego, formed by embedding of additional information into:	one color component	Quantity of Red-, Green-, Blue-triads is comparable by values and numerically practically does not differs from containers (not more than 1-2%)	Quantity of Red-, Green-, Blue-triads of triplets unevenly increases in comparison with a container (basic triads of $\approx 20-50\%$ , concomitant triads – up to 15%)
	two color components	Quantity of Red-, Green-, Blue-triads is comparable by values and numerically practically does not differs from containers (not more than 1-2%)	Quantity of Red-, Green-, Blue-triads of triplets unevenly increases in comparison with a container (basic triads of $\approx 5-50\%$ , concomitant triads – up to 35%)
	three color components	Quantity of Red-, Green-, Blue-triads is comparable by values and numerically practically does not differs from containers (not more than 1-2%)	Quantity of Red-, Green-, Blue-triads of triplets unevenly increases in comparison with a container (all triads are basic, their percentage varies from 5 to 50%)



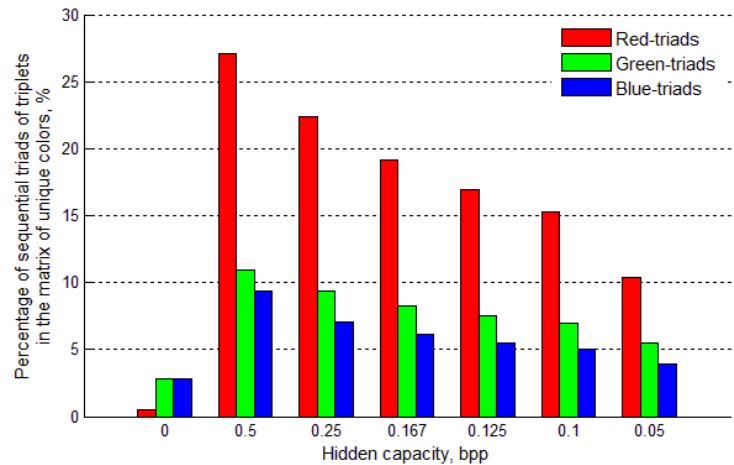
a



b



c



d

**Fig. 2.** The quantity of sequential triads of triplets in the matrix of unique colors of digital images: a – digital image stored in lossless format from Set 1; b – quantity of triads in the container and stego, formed by embedding of additional information into red color component of digital image from Set 1; c – digital image stored in losses format from Set 4; d – quantity of triads in the container and stego, formed by embedding of additional information into red color component of digital image from Set 4

From Table 1 and Fig. 2 implies that the embedding of additional information into containers initially stored in losses formats leads to unevenly increase of quantity of sequential triads of triplets, such stego are characterized by large differences of quantity values of sequential triads, even in cases when additional information was embedded into two or three color components. Stego, formed on the basis of containers in lossless formats, are characterized by stable, practically unchanged, high quantity of sequential triads of triplets regardless of the degree of filling, what is feature of digital images in a lossless format, which can be used to identify the format of the original digital content-container.

According to the results of the experiments we will formulate main steps of the method aimed to detect the fact of compression in digital images, which allows separate color images, stored in lossless formats initially, from digital imaged, resaved into lossless format from losses formats. For color digital image  $I$  of size  $M \times N$  with color components  $R, G, B$  :

**Step 1.** Forming of the matrix  $UCT$  of size  $U \times 3$  of unique colors  $(r_i, g_i, b_i)$ ,  $i = \overline{1, U}$  for digital image  $I$  .

**Step 2.** Counting of Red-, Green-, Blue-triads.

- 2.1. If for the current triplet  $(r_i, g_i, b_i)$ ,  $i = \overline{1, U}$  in the  $UCT$  at the same time there are triplets  $(r_i + 1, g_i, b_i)$  and  $(r_i - 1, g_i, b_i)$ ,  
then  $countR = countR + 1$ ,  $countR$  – quantity of Red-triads in  $UCT$  ;
- 2.2. If for the current triplet  $(r_i, g_i, b_i)$ ,  $i = \overline{1, U}$  in the  $UCT$  at the same time there are triplets  $(r_i, g_i + 1, b_i)$  and  $(r_i, g_i - 1, b_i)$ ,  
then  $countG = countG + 1$ ,  $countG$  – quantity of Green-triads in  $UCT$  ;
- 2.3. If for the current triplet  $(r_i, g_i, b_i)$ ,  $i = \overline{1, U}$  в  $UCT$  in the  $UCT$  at the same time there are triplets  $(r_i, g_i, b_i + 1)$  and  $(r_i, g_i, b_i - 1)$ ,  
then  $countB = countB + 1$ ,  $countB$  – quantity of Blue-triads in  $UCT$  .

**Step 3.** To compute the percentage of middle triplets in relation to total number of unique colors (%):

$$pR = \frac{\text{count}R}{U} \cdot 100, \quad pG = \frac{\text{count}G}{U} \cdot 100, \quad pB = \frac{\text{count}B}{U} \cdot 100.$$

**Step 4.** Determining of format of original digital content:

If  $((pR > T_{\text{lim}}) \& (pG > T_{\text{lim}}) \& (pB > T_{\text{lim}}))$  when  $pR \approx pG \approx pB$ ,  
 then original format of  $I$  is lossless format,  
 else original format of  $I$  is losses format,

where  $T_{\text{lim}}$  – threshold separating the digital content in a lossless format from digital content in a losses format. From Fig. 1, we can take the value  $T_{\text{lim}}$  from the range[5,10].

The algorithm that implements the proposed method can be used as an integral part of steganalytic methods and independently. It should be noted that the method of detection the fact of compression in digital images is intended to detect the original format of only color digital content, for grayscale images its use is impossible.

Analyze efficiency of the developed method performing the analysis of spatial domain of digital contents by determination of type I errors (False Negative  $FN$ ) – the pass of the fact of compression in case of its presence and type II errors (False Positive  $FP$ ) – false determination of uncompressed digital content as undergone to compression.

In the computational experiment aimed at efficiency analysis of the proposed steganalytic algorithm, 400 digital images from Set 1-4 (200 images in losses format, resaved as lossless format, and 200 images in lossless format), of which  $\frac{1}{4}$  of all the images is unfilled containers,  $\frac{1}{2}$  - stego formed by embedding of additional information into one arbitrary color component with different values of hidden capacity,  $\frac{1}{4}$  - stego, formed by embedding of additional information into two or three color components with different values of hidden capacity. As a threshold  $T_{\text{lim}}$  separating digital content in lossless format from digital content in losses format, accept the  $T_{\text{lim}} = 7.5$ , under condition  $pR \approx pG \approx pB$  we will understand the case when  $\max(pR, pG, pB) - \min(pR, pG, pB) \leq 6$ .

By results of experiment type I errors are  $FN=3\%$ , type II errors are  $FP=4.5\%$ , which allows to speak about high efficiency of the proposed method. It is noted that type I errors has been observed only in case of stego formed by embedding of additional information into all three color components of digital images initially stored in losses format. In the case when the fact of compression was detected in digital images initially stored in lossless format embedding of additional information into one arbitrary color component leads to similar perturbations of the matrix of unique colors as when using as containers digital images in losses format, that allows to determine the fact of presence/absence of additional information in such digital contents.

## Conclusions

In this article the method of detection the fact of compression in color digital images analyzing spatial domain of digital contents, that allows avoid additional accumulation of a computing error, is proposed. The developed method is based on the accounting sequential color triads in the matrix of unique colors, and can be used to define the format of the original container in steganalysis.

As a results of computational experiments that conducted on the basis of both unfilled containers and stego formed under different conditions of embedding of additional information, the type I errors are 3%, the type II errors - 4.5%, indicating the high efficiency of this method.

The computational complexity of the algorithmic realization of proposed method of detection the fact of compression in digital image of size  $M \times M$  is defined as  $Q(M^4)$ .

## References

1. Bohme, R. Advanced statistical steganalysis / R. Bohme. – Springer, 2010. – 302 p.
2. Кобозева, А.А. Стеганоаналитический метод для цифровых контейнеров, хранящихся в формате без потерь / А.А. Кобозева, А.В. Ахметьева, А.А. Ефименко // Інформаційна безпека. – 2014. – №1(13). – С. 31-42.
3. Ахметьева, А.В. Усовершенствование стеганоаналитического метода, основанного на анализе пространственной области цифровых контейнеров / А.В. Ахметьева // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2015. – Т.5. – № 4. – С. 367-375.
4. Ахметьева, Г.В. Стеганоаналітичний алгоритм для цифрових контейнерів, збережених в форматах з втратами / Г.В. Ахметьева // Сучасна спеціальна техніка. – 2016. – № 3(46). – С. 31-38.
5. Ахметьева, А.В. Стеганоанализ цифровых изображений, хранящихся в формате с потерями / А.В. Ахметьева // Захист інформації. – 2016. – Випуск 23. – С.135-145.
6. Ахметьева, Г.В. Детектування стеганоповідомлень, вбудованих методом LSB Matching у цифрові контейнери в форматах з втратами / Г.В. Ахметьева // V Міжнародна науково-технічна конференція «Захист інформації і безпека інформаційних систем», Львів, 2-3 червня 2016 р. – С.106-107.
7. Ахметьева, А.В. Выявление области применения стеганоаналитического подхода, основанного на анализе пространственной области цифровых контентов / А.В. Ахметьева // Problemele energeticii regionale [Проблемы региональной энергетики]. Электронный журнал Академии наук Республики Молдова. – 2016. – № 2 (31). – С.104-111.
8. Узун, И.А. Стеганоанализ цифровых изображений, хранящихся в произвольных форматах / И.А. Узун // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2013. – Т. 3. – № 2. – С. 179-189.
9. Бобок, И.И. Выявление цифровых изображений, пересохраненных в формат без потерь из формата с потерями, как составная часть стеганоанализа / И.И. Бобок // Сучасна спеціальна техніка. – 2013. – №3. – С.64-70.
10. NRCS Photo Gallery: [Електронний ресурс] // United States Department of Agriculture. Washington, USA. Режим доступа: <http://photogallery.nrcs.usda.gov> (Дата обращения: 26.07.2012).

## МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ФАКТУ СТИСКУ У ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ ЯК СКЛАДОВА ЧАСТИНА СТЕГАНОАНАЛІЗУ

Г.В. Ахметієва

Одеський національний політехнічний університет,  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: anna-odessitka@mail.ru

Запропоновано новий метод виявлення факту стиску у кольорових цифрових зображеннях, що дозволяє відокремлювати цифрові зображення, початково збережені в форматі без втрат, від цифрових зображень, перезбережених з формату з втратами в формат без втрат, який аналізує просторову область цифрових контентів, що дозволяє уникнути додаткового накопичення обчислювальної похибки. Розроблений метод оснований на врахуванні послідовних кольорних триад триплетів у матриці унікальних кольорів та може бути використаний для визначення формату оригінального контейнера при стеганоаналізі.

**Ключові слова:** цифрове зображення, стиск, формат з втратами, формат без втрат, просторова область, послідовні кольорні триади триплетів

## МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ФАКТА СЖАТИЯ В ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ СТЕГАНОАНАЛИЗА

А.В. Ахметієва

Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: anna-odessitka@mail.ru

Предложен новый метод выявления факта сжатия в цветных цифровых изображениях, позволяющий отделять цифровые изображения, изначально хранящиеся в формате без потерь, от цифровых изображений, пересохраненных из формата с потерями в формат без потерь, который анализирует пространственную область цифровых контентов, что позволяет избежать дополнительного накопления вычислительной погрешности. Разработанный метод основан на учете последовательных цветовых триад триплетов в матрице уникальных цветов, и может использоваться для определения формата оригинального контейнера в стеганоанализе.

**Ключевые слова:** цифровое изображение, сжатие, формат с потерями, формат без потерь, пространственная область, последовательные цветовые триады триплетов

# ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АДАПТИВНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ СЛОЖНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Е.С. Ленков<sup>1</sup>, Г.Б. Жиров<sup>2</sup>, Т.В. Бондаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военный институт телекоммуникаций и информатизации,  
ул. Московская, 45/1, 01011, г. Киев, Украина; e-mail: lenkov\_s@ukr.net

<sup>2</sup> Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,  
ул. Ломоносова, 81, 03189, г. Киев, Украина

В статье предложена математическая модель процесса технического обслуживания сложного технического объекта. Параметрами модели являются параметры технического обслуживания. Модель предназначена для построения имитационной модели процесса технического обслуживания и ремонта с целью прогнозирования показателей надежности и стоимости эксплуатации объекта с учетом проведения различных стратегий технического обслуживания и плановых ремонтов.

**Ключевые слова:** математическая модель, техническое обслуживание, диффузные распределения, имитационная модель, стратегия адаптивного обслуживания по состоянию

## Введение и постановка задачи

Эксплуатация сложных современных технических объектов, таких, например, как объекты радиоэлектронной техники (РЭТ), невозможна без качественно налаженной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Такая система необходима как для обеспечения требуемого уровня надежности данных объектов, так и для продления их ресурса. Необходимость проведения технического обслуживания (ТО) заключается в своевременной замене элементов, которые находятся в предотказовом состоянии, а ремонт проводится с целью восстановления исправного или работоспособного состояния объекта, а также восстановления ресурса всего объекта или его части [1, 2].

Показатели надежности и стоимости эксплуатации объектов РЭТ зависят как от свойств безотказности и ремонтпригодности самого объектов, так и от параметров процесса проведения ТОиР. Для того чтобы иметь возможность оптимизировать характеристики объекта (на этапе его разработки), а также параметры системы ТОиР, необходимо предварительно построить модели, которые устанавливали бы связь между параметрами объекта, системы и прогнозируемыми показателями надежности и стоимости эксплуатации объекта РЭТ.

На сегодняшний день, в зависимости от критерия, который используется при определении сроков проведения ТО, существуют две основные стратегии организации проведения ТО: ТО “по ресурсу” (ТОР) и ТО “по состоянию” (ТОС) [3-6].

При проведении ТО “по ресурсу” осуществляется контроль за текущим ресурсом (наработкой) объекта, и в случае, если остаточный ресурс (остаточная наработка) снижается до некоторого заданного предельного значения, производятся работы по его ТО. При ТО “по состоянию” осуществляется контроль за текущим техническим

состоянием объекта, и ТО проводится в случае, если техническое состояние объекта ухудшается до некоторого заданного недопустимого уровня. В свою очередь, при проведении ТОС можно выделить 2 стратегии: ТОС с постоянной периодичностью контроля и ТОС с переменной периодичностью контроля (адаптивное ТОС);

В статье решается задача построения формализованной модели процесса технического обслуживания сложного технического объекта при выборе стратегии адаптивного ТО по состоянию.

## Результаты исследования

Сущность стратегии адаптивного ТО по состоянию состоит в том, что расчет периодов проведения контроля технического состояния (КТС) производится при проведении очередного ТО с учетом статистических данных всех предыдущих ТО, расчет предварительного времени следующего ТО производится также при текущем ТО и уточняется в процессе эксплуатации при проведении КТС. Очевидное преимущество адаптивного КТС состоит в том, что для двух объектов, техническое состояние (ТС) которых разное, периоды проведения контроля ТС должно быть также разным. Периоды времени между КТС для объекта, показатели которого лучше, должны быть больше, чем для второго объекта. Будем полагать [1], что ТС объекта определяется ТС его элементов, а для определения ТС элемента будем использовать понятие определяющий параметр.

В качестве моделей отказов элементов будем использовать вероятностно-физические модели, а именно: для отказов электро-радиокомпонентов –  $DN$ -распределение, механических элементов –  $DM$ -распределение [7]. В качестве основной характеристики определяющего параметра  $i$ -го элемента –  $u_i(t)$ , берем среднюю скорость деградации этого параметра –  $a_i(t)$ , измеренную в момент времени  $t$ :

$$a_i(t_k) = \frac{u_i(t_k) - u_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}, \quad (1)$$

где  $u_i(t_k)$  и  $u_i(t_{k-1})$  - нормированные значения определяющего параметра  $i$ -го элемента в моменты времени  $t_k$  и  $t_{k-1}$  соответственно;

$t_{k-1}$  – момент времени последнего КТС, при котором определялось значение определяющего параметра  $i$ -го элемента или производилось его обновление (замена);

$i = \overline{1, |E_0|}$ ,  $E_0$  – множество всех конструктивных элементов, которые входят в структурную схему надежности объекта,  $|E_0|$  – количество элементов множества  $E_0$ .

Нормированные значения определяющего параметра вычисляются по известной формуле [1]:

$$u_i(t) = \frac{|x_i(t) - x^0|}{|x_i^{don} - x^0|},$$

где  $x_i(t)$  - значение определяющего параметра, измеренное в момент времени  $t$ ;

$x^0$  - исходное (номинальное) значение определяющего параметра;

$x_i^{don}$  – предельно допустимое значение определяющего параметра, при достижении которого возникает отказ.

Соответственно, если  $u_i(t) = 0$  - элемент полностью исправен, а если  $u_i(t) = 1$  - в

элементе возникает отказ. Техническое обслуживание необходимо проводить при приближении определяющих параметров  $u_i(t)$  к граничному состоянию. Исходя из вышеизложенного, можно найти нормированное значение определяющего параметра, при достижении которого требуется проведение ТО:

$$u_i^{TO}(t) = \frac{|x_i^{TO}(t) - x^0|}{|x_i^{don} - x^0|},$$

где  $x_i^{TO}(t)$  – значение определяющего параметра, при достижении которого необходимо проведение ТО;  $x_i^{TO}(t) < x_i^{don}(t)$  и, следовательно  $u_i^{TO}(t) < 1$ .

Обновление элемента происходит при его восстановлении после отказа или при выполнении операций по его ТО. Далее будем полагать, что как при восстановлении, так и при проведении ТО происходит полное обновление элемента, следовательно, в (1)  $u_i(t_{k-1}) = 0$ .

Так как нами рассматриваются сложные технические объекты, предполагается наличие у них встроенной автоматической системы технического диагностирования (АСТД), средствами которой осуществляется измерение определяющих параметров  $u_i(t_k)$ , вычисление оценки средней скорости деградации параметров  $\tilde{a}_i(t_k)$  и сохранение этих оценок в долговременной памяти системы. Прогнозирование оценки средней скорости деградации можно проводить с использованием одной из перечисленных ниже моделей прогнозирования временных рядов: регрессионная модель; авторегрессионные модели (ARIMAX, GARCH, ARDLM); модели экспоненциального сглаживания (ES); модель по выборке максимального подобия (MMSP); модель на нейронных сетях (ANN); модель на цепях Маркова (Markov chains); модель на классификационно-регрессионных деревьях (CART); модель на основе генетического алгоритма (GA); модель на опорных векторах (SVM); модель на основе передаточных функций (TF); модель на нечеткой логике (FL). В статье предлагается использовать модели экспоненциального сглаживания, достоинством которых есть простота моделирования; единообразие анализа и проектирования, а недостаток модели - недостаточная гибкость и узкая применимость моделей. Из трех основных моделей предлагается использовать, в отличие от [1,8], не простое экспоненциальное сглаживание, а двухпараметрическое и трехпараметрическое экспоненциальное сглаживание.

Таким образом, можно предложить следующую методику по прогнозированию времени проведения ТО для стратегии адаптивного ТО по состоянию.

1. Определяем множество  $E_0$  – конструктивных элементов, которые входят в структурную схему надежности объекта, а система АСТД имеет возможность измерять их определяющие параметры.

2. Определяем скорость деградации элементов из множества  $E_0$  в момент времени проведения КТС,  $t_k$  – время проведения  $k$ -го КТС:

$$a_i(t_k) = \frac{u_i(t_k) - u_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}. \quad (2)$$

3. Прогнозируем скорость деградации элементов объекта для момента времени проведения следующего КТС,  $t_{k+1}$  – время проведения  $k+1$ -го КТС:

3.1. Оценка средней скорости деградации – модель двухпараметрического экспоненциального сглаживания:

$$\tilde{a}_i(t_{k+1}) = L(t_k) + T(t_k), \quad (3)$$

где  $L(t_k)$  - сглаженная величина на текущее время контроля  $t_k$ ;

$T(t_k)$  - значение тренда на текущее время

$$\begin{aligned} L(t_k) &= \alpha \cdot a_i(t_k) + (1 - \alpha)[S(t_{k-1}) - T(t_{k-1})], \\ T(t_k) &= \beta(S(t_k) - S(t_{k-1})) + (1 - \beta) \cdot T(t_{k-1}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент сглаживания ряда;

$\beta$  – коэффициент сглаживания тренда;  $\alpha, \beta \in (0,1)$ .

Если есть необходимость прогнозирования скорости деградации элементов объекта для момента времени проведения  $k+l$ -го КТС, используется следующее выражение:

$$\tilde{a}_i(t_{k+l}) = L(t_k) + l \times T(t_k).$$

3.2. Оценка средней скорости деградации – модель трехпараметрического экспоненциального сглаживания:

$$\tilde{a}_i(t_{k+l}) = [L(t_k) + T(t_k)] \times S(t_{k+l-s}), \quad (5)$$

$S(t_k)$  - значение сезонности на текущий момент времени (за предыдущий период),  $s$  - период сезонности (для квартальных изменений  $s = 4$ , для ежемесячных  $s = 12$ ). При проведении ТО наиболее информативными могут быть изменения полугодовые  $s = 2$  или сезонные  $s = 4$ .

$$\begin{aligned} L(t_k) &= \alpha \cdot \frac{a_i(t_k)}{S(t_{k-s})} + (1 - \alpha)[S(t_{k-1}) - T(t_{k-1})], \\ T(t_k) &= \beta(S(t_k) - S(t_{k-1})) + (1 - \beta) \cdot T(t_{k-1}), \\ S(t_k) &= \gamma \cdot \frac{a_i(t_k)}{L(t_k)} + (1 - \gamma) \cdot S(t_{k-s}), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент сглаживания сезонности;

$S(t_{k-s})$  – коэффициент сезонности за этот же период в предыдущем сезоне.

Если есть необходимость прогнозирования скорости деградации элементов объекта для момента времени проведения  $k+l$ -го КТС, используется следующее выражение:

$$\tilde{a}_i(t_{k+l}) = [L(t_k) + T(t_k)] \times S(t_{k+l-s}).$$

4. Вычисляем прогнозное время проведения следующего ТО для каждого элемента:

$$\tilde{T}_i^{TO}(t_{n+1}) = \frac{u_i^{TO}}{\tilde{a}_i(t_{k+1})}, \quad (7)$$

где  $u_i^{TO}$  – нормированное значение определяющего параметра  $i$ -го элемента, при

достижении которого необходимо проведение его ТО или замена (значение задано производителем).

Если принять  $u_i^{TO}(t) = u_i^{don}(t) = 1$  и подставить в (7), получим среднюю наработку до отказа  $i$ -го элемента:

$$\tilde{T}_{cpi} = \frac{1}{\tilde{a}_i(t_{k+1})}. \quad (8)$$

Выражение (8) соответствует утверждению, что в качестве математической модели (ММ) безотказности элементов можно использовать  $DN$ -распределение, если при расчете показателей безотказности используется структурная схема надежности, элементы которой соединены последовательно.

5. Определяем относительное прогнозное время проведения следующего ТО объекта:

$$\tilde{T}^{TO}(t_{n+1}) = \min_i \tilde{T}_i^{TO}(t_{k+1}),$$

где  $n$  – количество проведенных ТО на объекте,  $n = 1, 2, \dots$ , в отличие от  $k$  – количество проведенных КТС на объекте, время начала проведения КТС и ТО могут совпадать.

6. Определяем календарное время проведения следующего ТО объекта:

$$\tilde{t}_{n+1}^{TO} = t_n^{TO} + \tilde{T}^{TO}(t_{n+1}),$$

где  $t_n^{TO}$  – календарное время проведения предыдущего ТО.

Рассмотренная методика легла в основу при построении формализованной модели проведения технического обслуживания сложного технического объекта по стратегии адаптивного ТО по состоянию. Параметрами формализованной модели являются параметры технического обслуживания.

Таким образом, формализованная ММ процесса адаптивного ТО по состоянию при использовании двухпараметрического экспоненциального сглаживания имеет такой:

$$P_{Adapt\ TOC}^2 = \{\tau_{TOa}; E^{TO}; U^{TO}; T_k; \alpha; \beta\},$$

а формализованная ММ процесса адаптивного ТО по состоянию при использовании трехпараметрического экспоненциального сглаживания:

$$P_{Adapt\ TOC}^3 = \{\tau_{TOa}; E^{TO}; U^{TO}; T_k; \alpha; \beta; \gamma\},$$

где  $\tau_{TOa}$  – административное время, т.е. время перевода объекта из состояния «функционирование по назначению» в состояние «проведение ТО»;

$E^{TO}$  – множество обслуживаемых элементов объекта (при ТО не все элементы подвергаются обслуживанию или замене)  $E^{TO} \subset E_0$ ;  $U^{TO}$  – вектор уровней нормированных значений определяющих параметров,

$$U^{TO} = \{u_i^{TO}, i = \overline{1, E^{TO}}\};$$

$T_k$  – вектор времени проведения КТС.

## Выводы

В статье представлена методика прогнозирования времени проведения адаптивного ТО по состоянию, которая учитывает тренд и сезонность изменения определяющего параметра.

Построена математическая модель процесса ТО сложного технического объекта, которая может быть взята за основу для построения имитационной модели процесса технического обслуживания и ремонта. Предложенная модель отличается от существующих использованием дополнительных параметров процесса технического обслуживания и позволяет прогнозировать время проведения очередного ТО с учетом сезонных погодных условий. Имитационная модель позволит прогнозировать показатели надежности и стоимости эксплуатации объекта.

## Список литературы

1. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей / С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В. Банзак, В.О. Браун, В.А. Осыпа, С.А. Пашков, В.Н. Цыцарев, Ю.В. Березовская. – Одесса: Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.
2. Основы надежности и техническое обеспечение радиоэлектронных средств РТВ ПВО / А.Н. Буточнов, Б.П. Креденцер, В.Г. Тоценко, В.Н. Цыцарев и др. – К.:КВИРТУ ПВО, 1982. – 226 с.
3. Барзилович, Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высш. школа, 1982. – 231 с.
4. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Т.8. Эксплуатация и ремонт. М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
5. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов / А.К. Быкадоров и др. – М.: Высш. школа, 1978. – 320 с.
6. Ленков, С.В. Определение оптимальных параметров технического обслуживания по состоянию сложных объектов РЭТ / С.В. Ленков, А.В. Селюков, В.В. Зубарев, В.Н. Цыцарев // Информатика та математичні методи в моделюванні. – 2013. –Т.3., №3. – С. 215 – 224.
7. Стрельников, В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
8. Жердев, Н.К. Контроль устройств на интегральных схемах / Н.К. Жердев, Б.П. Креденцер, Р.Н. Белоконь. – К.:Техніка, 1986. – 160 с.

**ФОРМАЛІЗОВАНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АДАПТИВНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ СКЛАДНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

Є.С. Ленков<sup>1</sup>, Г.Б. Жиров<sup>2</sup>, Т.В. Бондаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Військовий інститут телекомунікацій і інформатизації,  
вул. Московська, 45/1, 01011, м. Київ, Україна; e-mail: lenkov\_s@ukr.net

<sup>2</sup> Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка,  
вул. Ломоносова, 81, 03189, м. Київ, Україна

У статті запропонована математична модель процесу ТО складного технічного об'єкта. Параметрами моделі є параметри технічного обслуговування. Модель призначена для побудови імітаційної моделі процесу технічного обслуговування і ремонту з метою прогнозування показників надійності і вартості експлуатації об'єкта з урахуванням проведення різних стратегій технічного обслуговування і планових ремонтів.

**Ключові слова:** технічне обслуговування, дифузні розподілу, імітаційна модель, стратегія адаптивного обслуговування за станом

**FORMAL MATHEMATICAL MODEL OF ADAPTIVE MAINTENANCE DIFFICULT RADIO ELECTRONIC TECHNIQUE**

E. Lenkov<sup>1</sup>, G. Zhyrov<sup>2</sup>, T. Bondarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Military Institute of Telecommunications and Information Technologies,  
45/1 Moskowska str., 01011, Kyiv, Ukraine; e-mail: lenkov\_s@ukr.net

<sup>2</sup> Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kiev,  
81, Lomonosova str., 03189, Kyiv, Ukraine

The article suggests a mathematical model of the process is a complex technical object. The model parameters are the maintenance parameters. The model is designed to build a simulation model of the process of maintenance and repair in order to predict reliability and cost of the facility, taking into account the various maintenance strategies and planned repairs.

**Keywords:** maintenance, diffuse distribution, simulation model, an adaptive service strategy as

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ З РОЗРИВНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ У ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ ЗА УМОВИ НЕТОЧНИХ ВИХІДНИХ ДАНИХ

С.А. Положаєнко, В.С. Савіч

Одеський національний політехнічний університет,  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: savichsp@gmail.com

Запропоновано процедуру розв'язання задачі фільтрації з розривними коефіцієнтами у гетерогенних системах (середовищах), засновану на застосуванні вейвлет-перетворення диференційної моделі. Особливість процедури полягає у можливості отримання розв'язку при неповному або неточному векторі вихідних даних. На підставі кратномасштабного аналізу отримано коефіцієнти вейвлет-функцій розкладання з компактними носіями у просторах Соболева.

**Ключові слова:** гетерогенна система (середовище), фільтрація з розривними коефіцієнтами, вейвлет-розкладання, кратномасштабний аналіз, простір Соболева.

## Вступ

Загальну теорію можливості розв'язування крайових задач для лінійних та квазілінійних диференційних рівнянь параболічного типу з розривними коефіцієнтами розроблено О.А. Ладиженською в роботах [1, 2]. На основі цієї теорії було розв'язано низку прикладних задач однофазної фільтрації як для стаціонарного [1], так і для нестаціонарного [1, 2] випадків.

Однак досі не віднайшла свого розв'язання задача нестаціонарної фільтрації для багатофазних та гетерогенних систем, що описуються рівняннями параболічного типу з розривними коефіцієнтами та з коефіцієнтами, що квадратично інтегруються. В практичних додатках, за умови застосування неточних даних ця задача ускладнюється може бути віднесена до класу некоректних задач через виникнення несталості розв'язку. Для розв'язування такої задачі скористаємося проекційним методом Гальоркіна, в якому базисна (координатна) система функцій співпадає з проекційною системою. В якості базисних функцій приймемо багатомірні вейвлети Добеші [3], які залежать як від просторової змінної  $r$ , так і від часової змінної  $t$ , а коефіцієнти розкладання розв'язку задачі визначаються в рамках регулярного кратномасштабного вейвлет-аналізу [4]. Варіаційну задачу, що при цьому утворюється, будемо розв'язувати регуляризуючим методом О.М. Тихонова [5] із застосуванням принципу узагальнюючої нев'язки [6].

## Мета роботи

Розробка вейвлет-методу розв'язування задачі нестаціонарної фільтрації з розривними коефіцієнтами у гетерогенних системах для випадку неточних або неповних вихідних даних, зокрема даних вимірювання.

## Основна частина

Розглянемо диференціальне рівняння несталого плоско-радіального осесиметричного фільтраційного потоку в круговому пласті радіуса  $R$ . В центрі якого розташовано свердловину радіусом  $r_0$ :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{k(r, t)}{\mu} r \frac{\partial P(r, t)}{\partial r} \right) = \frac{\partial P(r, t)}{\partial t}, \quad r_0 < r < R, \quad t \in (t_0, t_1), \quad (1)$$

при початковій умові

$$P(r, t_0) = \psi_0(r), \quad r \in (r_0, R) \quad (2)$$

та крайових умовах

$$P(r_0, t) = P_0(t), \quad P(R, t) = 0, \quad t \in (t_0, t_1). \quad (3)$$

У виразах (1)-(3)  $P(r, t) = \Delta p(r, t) = p_0 - p(r, t)$ ;  $p(r, t)$  – тиск рідини в точці  $r$  в момент часу  $t$ ;  $p_0$  – початковий пластовий тиск;  $k(r, t)$  – проникність пласта;  $\mu$  – густина рідини (або гетерогенної системи), що фільтрується.

Будемо вважати, що функції  $\psi_0(r)$  та  $P_0(t)$  задовольняють наступним умовам:

–  $\psi_0(r) = W_2^0(Q_r)$ , тобто така, що квадратично інтегрується на  $[r_0, R]$  разом з узагальненою похідною  $(d\psi_0/dr)$  в смислі Соболева [1, 2], та приймає «в середньому квадратичному» нульові граничні значення;

$$- \quad \|P_0(t)\|_{t_0|t_0, t_1} \leq \nu_1, \quad \|P_0'(t)\|_{t_0|t_0, t_1} \leq \nu_2.$$

Нехай  $Q_{r_0, R} = \Omega_{r_0, R} \times (t_0, t_1)$  – циліндр на площині змінних  $(r, t)$ .  $\Omega_{r_0, R} = (r_0, R)$ , і функція  $k(r, t)$  задовольняє на  $Q_{t_0, t_1}$  умовам:

$$- \quad \nu_3 \leq k(r, t) \leq \nu_4, \quad \nu_3 > 0;$$

$$- \quad k(r, t) \text{ має узагальнену похідну } [\partial k(r, t)/\partial r], \text{ для якої } \max_{Q_{t_0, t_1}} \left| \frac{\partial k(r, t)}{\partial r} \right| < \infty.$$

Передостання умова забезпечує рівномірну (по  $r$  та  $t$ ) параболічність рівняння (1).

Для однорідного пласта ( $k(r, t) = \text{const}$ ) крайові задачі з крайовими умовами першого та другого роду розглянуто в [7, 8]. Необхідність врахування гетерогенної структури пористого середовища в гідродинамічних задачах відмічається у багатьох відомих роботах з фільтрації (наприклад, [8, 9-13]), але не має остаточного розв'язання. Дослідження задач фільтрації у гетерогенних середовищах в основному орієнтовані на *точні вихідні дані* (або *дані вимірювань*, в той час коли на практиці ці дані можуть бути отримані (або виміряні) лише наближено. Неврахування даного факту може спричинити значні відхилення отриманого розв'язку від розв'язку при точних даних (несталій розв'язок). Крім того, існуючі методи розв'язування задач фільтрації (зокрема, методи засновані на застосуванні перетворення Фур'є) не дають можливості визначити структурні особливості процесу, що надто важливо для гетерогенних систем, і можуть бути використані лише у випадку існування класичного розв'язку задачі.

Після очевидних перетворень (замін змінних) задача (1)-(3) зводиться до наступної задачі:

$$Lu(r,t) \equiv \frac{\partial}{\partial t} u(r,t) - Mu(r,t) = f(r,t), \quad r \in (0,l), \quad t \in (0,l), \quad (4)$$

$$u(r,t) = \psi_0(r), \quad r \in (0,l), \quad (5)$$

$$u(0,t) = 0, \quad u(l,t) = 0, \quad t \in (0,T). \quad (6)$$

Тут  $T = l$ ,  $l = 2m - 1$ ;  $m$  – порядок вейвлетів, які будуть використовуватися у подальшому для вейвлет-розкладань функцій  $k(r,t)$ ,  $f(r,t)$  та  $u(r,t)$ :

$$Mu \equiv \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{c}{R-r_0} k(r,t) u_r \right] + \frac{c k(r,t) \cdot u_r}{r_0 l + r(R-r_0)}, \quad c = \frac{l(t_1 - t_0)}{\mu(R-r_0)},$$

$$f(r,t) = \frac{\partial f_1(r,t)}{\partial r} - f_0(r,t), \quad f_1(r,t) = -\frac{c k(r,t)}{l(R-r_0)} \cdot P_0(t), \quad (7)$$

$$f_0(r,t) = \frac{c}{l} \cdot \frac{k(r,t)}{r_0 l + r(R-r_0)} \cdot P_0(t) + \left(1 - \frac{r}{l}\right) \cdot P_0'(t).$$

З метою спрощення запису після заміни змінних збережено позначення для  $k(r,t)$ ,  $\psi_0(r)$ ,  $P_0(t)$  та  $P_0'(t)$ .

Задачу (4)-(6) назвемо умовно задачею  $A_{1,0}(Q_T)$ , де  $Q_T = \Omega \times (0,T)$ ,  $\Omega = (0,l)$ ; перший з індексів в позначенні задачі означає, що крайові умови є умовами першого роду, а другий – що ці умови однорідні (тобто нульові).

У подальшому будемо використовувати введені в [1, 2] функціональні простори  $W_2^{1,0}(Q_T)$ ,  $W_2^{1,1}(Q_T)$ ,  $W_2^{2,1}(Q_T)$ ,  $V_2(Q_T)$  та  $V_2^{1,0}(Q_T)$ , а також відповідні їм простори  $W_2^{1,0}(Q_T)$ ,  $W_2^{1,1}(Q_T)$ ,  $W_2^{2,1}(Q_T)$ ,  $V_2(Q_T)$  та  $V_2^{1,0}(Q_T)$ . Нуль зверху над позначенням простору означає, що беруться лише ті елементи даного простору, які обертаються на нуль у «середньому квадратичному» на боковій границі  $S_T = \{(r,t): r=0 \cup r=l\}$  циліндру  $Q_T$ .

Під розв'язком задачі  $A_{1,0}(Q_T)$  будемо розуміти узагальнений розв'язок в смислі визначення з [1, 2]. А саме узагальненим розв'язком з  $V_2^{1,0}(Q_T)$  ( $W_2^{1,0}(Q_T)$ ) задачі  $A_{1,0}(Q_T)$  будемо називати функцію  $u(r,t)$  з  $V_2^{1,0}(Q_T)$  ( $W_2^{1,0}(Q_T)$ ), яка задовольняє рівнянню (4) та початковій умові (5) в смислі інтегральної тотожності

$$\int_{Q_T} \left[ u \eta_t - \frac{c}{R-r_0} k(r,t) u_r \eta_r + \frac{k(r,t)}{r_0 l + r(R-r_0)} u_r \eta \right] dr dt =$$

$$= \int_{Q_T} \left\{ \frac{c k(r,t)}{l(R-r_0)} \cdot P_0(t) \eta_r - \left[ \frac{c}{l} \cdot \frac{c k(r,t)}{l(R-r_0)} \cdot P_0(t) + \right. \right. \quad (8)$$

$$\left. \left. + \left(1 - \frac{r}{l}\right) P_0'(t) \right] \eta \right\} dr dt + \int_{\Omega} \psi_0(r) \eta(r,0) dr$$

при будь-якій функції  $\eta(r, t)$  з  $W_2^{1,1}(Q_T)$ , що дорівнює нулю при  $t = T$ . Відповідність крайовим умовам (6) міститься в тому, що  $u \in V_2^{1,0}(Q_T)$  ( $u \in W_2^{1,0}(Q_T)$ ), тобто умови (6) задовольняються у «середньому квадратичному». При цьому похідні  $u_r$ ,  $\eta_r$  та  $\eta_t$  в (8) є узагальненими похідними. Будь-який узагальнений розв'язок з  $u \in W_2^{1,0}(Q_T)$  задачі  $A_{1,0}(Q_T)$  буде її узагальненим розв'язком з  $V_2^{1,0}(Q_T)$  [1].

З доведених теорем у роботі [2] витікає, що за умов, зазначених вище для функцій  $\psi_0(r)$ ,  $k(r, t)$  та  $P_0(t)$  існує єдиний узагальнений розв'язок задачі  $A_{1,0}(Q_T)$  з  $u \in W_2^{1,0}(Q_T)$ , що належить  $W_2^{2,1}(Q_T)$  та задовольняє рівнянню  $Lu = f$ ,  $f \in L_2(Q_T)$  ( $f \equiv \frac{\partial f_1}{\partial r} - f_0$ ) майже скрізь в  $Q_T$ .

Виконаємо вейвлет-представлення розв'язку задачі. В крупномасштабному аналізі (КМА) в  $L_2(\mathbb{R}^2)$ , який використовує ортонормовані базиси вейвлетів, будь-якій функції  $u(x)$  з  $L_2(\mathbb{R}^2)$  відповідає ряд [4]

$$u(x) = \langle u, f \rangle \times \varphi(x) + \sum_{\lambda \in \cup_{j=0}^{\infty} \Lambda_j} \langle u, \psi_\lambda \rangle \times \psi_\lambda(x), \quad (9)$$

$\psi_\lambda(x) = 2^j \psi_\ell(2^j \cdot x - k)$ ,  $\Lambda_j = \{\lambda = (\ell, j, k) : 1 \leq \ell \leq 3, k \in Z^2\}$ ,  $Z^2 = Z \times Z$ ,  $Z$  – множина цілих невід'ємних чисел;  $k = (k_1, k_2) \in Z^2$ ;  $x = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$  (для задачі  $A_{1,0}(Q_T)$   $x_1 = r, x_2 = t$ );  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  – знак скалярного добутку.

Функції

$$\varphi(x - k), \psi_\lambda(x) = 2^j \psi_\ell(2^j \cdot x - k), \lambda = (\ell, j, k), 1 \leq \ell \leq 3, k \in Z^2, \quad (10)$$

де

$$\begin{aligned} \varphi(x - k) &= \varphi(x_1 - k_1) \varphi(x_2 - k_2), \varphi_1(x - k) = \varphi(x_1 - k_1) \varphi(x_2 - k_2), \\ \psi_2(x - k) &= \psi(x_1 - k_1) \varphi(x_2 - k_2), \psi_3(x - k) = \psi(x_1 - k_1) \psi(x_2 - k_2) \end{aligned}$$

утворюють сепарабельний ортонормований базис (ОНБ) в  $L_2(\mathbb{R}^2)$ .

Функції  $\varphi(x)$  та  $\psi(x)$  при  $x \in \mathbb{R}^1$ , які називаються відповідно скейлінг-функції (така, що масштабує) та вейвлет-функції, мають компактні носії в  $(0, l)$  та визначаються як ряд [14]

$$\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^l h_k^{(m)} \times \varphi(2x - k), \psi(x) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^l g_k^{(m)} \times \varphi(2x - k), \quad (11)$$

$l = 2m - 1$  ( $m \geq 1$  — ціле додатне число);  $g_k^{(m)} = (-1)^k \times h_k^{(m)}$ . Коефіцієнти  $h_k^{(m)}$  для вейвлетів Хаара ( $m = 1$ ) мають значення  $h_0^{(1)} = h_1^{(1)} = 1/\sqrt{2}$ , а для вейвлетів Добеші  $m$  порядку  $m > 1$  значення  $h_k^{(m)}$  для  $m = \overline{2, 10}$  наведено в [15].

Локальну та глобальну регулярність вейвлетів з компактними носіями детально досліджено в [15]. При цьому методами Фур'є встановлено, що для вейвлетів  $\varphi(x)$ ,  $x \in \mathfrak{R}$ , значення глобального показника Гельдера не менше за 2.158 при  $m \geq 7$ .

Кратномасштабний аналіз в  $L_2(\mathfrak{R}^2)$  складається з послідовності просторів апроксимацій  $\{V_j\}(j \geq 0) V_0 \subset V_1 \subset \dots \subset V_j \subset \dots$ , де  $V_j$  – замкнутий простір в  $L_2(\mathfrak{R}^2)$  з базисом

$$\varphi_j(x) = 2^j \varphi(2^j \cdot x - k), \quad x = (x_1, x_2) \in \mathfrak{R}^2, \quad k = (k_1, k_2) \in Z^2.$$

Оскільки функція  $\varphi(x)$ ,  $x \in \mathfrak{R}^1$ , фінітна на  $[0, l]$  при будь-якому  $m \geq 1$  та двічі неперервно диференціюється на  $[0, l]$  при  $m \geq 7$ , то послідовність  $\{V_j\}(j \geq 0)$  при виборі базису  $\{\varphi_j(x - k)\}$  на основі функції  $\varphi(x)$  з  $l = 2m - 1$ ,  $m \geq 7$  буде породжувати (за визначенням у [4]) 2-регулярний КМА в  $L_2(\mathfrak{R}^2)$ . Це означає, що для будь-якого цілого  $m$  і для будь-якого мультиіндексу  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$ , що задовольняє умові  $|\alpha| \leq 2$  ( $|\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2$ ), для функції  $g(x) = \varphi(x_1) \cdot \varphi(x_2)$  виконується нерівність

$$|\partial^\alpha g(x)| \leq C_m \left(1 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2}\right)^{-m}.$$

Якщо  $P_j$  – ортогональний проектор простору  $L_2(\mathfrak{R}^2)$  на  $V_j$ , то на підставі теореми, сформульованої та доведеної в [4], для будь-якої функції з простору Соболева  $W_2^1(Q_T)$  послідовність  $P_j f$  збігається до  $f$  в  $W_2^1(Q_T)$ -нормі, тобто:

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \|\partial^\alpha P_j f - \partial^\alpha f\|_{L_2(Q_T)} = 0, \quad |\alpha| \leq 1. \quad (12)$$

У відповідності до вище згаданої теореми з [4], розподіл (узагальнена функція)  $f$  належить  $W_2^1(Q_T)$  тоді і тільки тоді, коли її вейвлет-коефіцієнти  $\alpha\langle\lambda\rangle = \langle f, \psi_\lambda \rangle$  в базисі (10), що відповідає 2-регулярному КМА, задовольняють умові

$$\sum_{j=0}^{\infty} \sum_{\lambda \in \Lambda} 4^j |\alpha\langle\lambda\rangle|^2 < \infty. \quad (13)$$

Для виконання умови (13) достатньо вважати, що вейвлет-коефіцієнти  $d_{i,j,k_1,k_2} = \langle f, \psi_{i,j,k_1,k_2} \rangle$  функції  $f$  задовольняє нерівностям

$$d_{i,j,k_1,k_2} \leq 2^{-2j} \eta_j \left( i = \overline{1, 3}; j \geq 0; k_1, k_2 = \overline{0, 2^j - 1} \right), \quad (14)$$

де  $\sum_{j=0}^{\infty} \eta_j^2 < \infty$ , наприклад,  $\eta_j = j^{-(1+\gamma)/2}$ ,  $\gamma > 0$ .

## Висновок

Виконано розв'язання задачі фільтрації з розривними коефіцієнтами у гетерогенному середовищі, здійснене у вигляді вейвлет-перетворення. Відмінність

запропонованого підходу полягає в тому, що розв'язок задачі можна отримати у випадках, коли вихідні дані є неточними (або неповними) внаслідок похибок вимірювань.

### Список літератури

1. Ладыженская, О.А. Краевые задачи математической физики / О.А. Ладыженская. — М.: Наука, 1975. — 407 с.
2. Ладыженская, О.А. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа / О.А. Ладыженская, В.А. Солонников, Н.Н. Уралцев. — М.: Наука, 1987. — 736 с.
3. Чуи, К.. Введение в вейвлеты / К. Чуи. — М.: Мир, 2004. — 412 с.
4. Новиков, И.Я. Основы теории всплесков / И.Я. Новиков, С.Б. Стечкин // Успехи математических наук. — 1998. — Т. 53, № 6. — С. 53-128.
5. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. — М.: Наука, 1979. — 285 с.
6. Гончарский, А.В. Обобщенный принцип невязки / А.В. Гончарский, А.С. Леонов, А.С. Ягола // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2009. — Т. 14. — № 2. — С. 295-302.
7. Соболев, С.Л. Некоторые применения функционального анализа в математической физике / С.Л. Соболев. — М.: Наука, 2001. — 255 с.
8. Басниев, К.С. Подземная гидравлика / К.С. Басниев, А.М. Власов, И.Н. Кочина и др. — М.: Недра, 2012. — 303 с.
9. Щелкачев, В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации. Ч. 1. / В.Н. Щелкачев. — М.: Нефть и газ, 2005. — 586 с.
10. Saez, A. The effective homogeneous behavior of homogeneous porous media // A. Saez, C.J. Otero, I. Rusinek // Transport in porous media. — 1989. — № 4. — Pp. 212-238.
11. Chauveteau, G. Rodlike Polymer Solution Flow Through Fines Pores: Influence of Pore Size on Rheological Behavior / G. Chauveteau // Journal of the Rheological. — 1999. — V. 26 (2). — P. 111-142.
12. Enevoldsen, J. Pressure Drop Through Gravel Packs / J. Enevoldsen, H. K. Rasmussen / J. Enevoldsen // Annual Transactions of the Nordic Rheology Society. — 1995. — V. 3. — P. 45-47.
13. Bayada, G. Inequations variationnelles elliptiques avec conditions aux limites periodiques / G. Bayada // J. Anal. Math. — 1978.— Vol. 34.— P. 47-53.
14. Дремин, И.М. Вейвлеты и их использование // И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи математических наук. — 2011. — Т. 171. — № 5. — С. 465-501.
15. Quintard, M. Two phase flow in heterogeneous porous media: the method of large-scale averaging / M. Quintard, S. Whitaker // Transport in porous media. — 1988. — № 3. — Pp. 357-413.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ С РАЗРЫВНЫМИ  
КОЭФФИЦИЕНТАМИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ НЕТОЧНЫХ ВХОДНЫХ  
ДАнных**

С.А. Положаенко, В.С. Савич

Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: savichsp@gmail.com

Предложена процедура решения задачи фильтрации с разрывными коэффициентами в гетерогенных системах (средах), основанная на применении вейвлет-преобразования дифференциальной модели. Особенность процедуры состоит в возможности получения решения при неполном или неточном векторе входных данных. На основе кратномасштабного анализа получены коэффициенты вейвлет-функций разложения с компактными носителями в пространствах Соболева.

**Ключевые слова:** гетерогенная система (среда), фильтрация с разрывными коэффициентами, вейвлет-разложение, кратномасштабный анализ, пространство Соболева.

**MATHEMATICAL MODELLING OF FILTERING WITH DISCONTINUOUS COEFFICIENTS IN  
HETEROGENEOUS SYSTEM IN TERMS OF UNCERTAINTY OF THE INPUT DATA**

S. Polozhaenko, V. Savich

Odesa National Polytechnic University,  
1 Shevchenko Str., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: savichsp@gmail.com

A procedure for solving the problem of filtration with discontinuous coefficients in heterogeneous systems (environments), based on the application of wavelet transform of the differential model. The peculiarity of the procedure is the ability to produce solutions with incomplete or inaccurate vector input. Based on multiresolution analysis obtained coefficients of wavelet decomposition function with compact support in Sobolev spaces.

**Keywords:** heterogeneous system (medium), filtration with discontinuous coefficients, wavelet decomposition, multiresolution analysis, Sobolev space.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНОГО ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ОБЪЕКТА БЕЗ УЧЕТА ЕГО СТРУКТУРЫ

И.В. Толлок

Департамент военного образования и науки Министерства обороны Украины,  
Воздушнофлотский пр-т 28, 03049, г. Киев, Украина; e-mail: tolok@ukr.net

В статье приведен анализ особенности технического обслуживания сложного восстанавливаемого объекта без учета его структуры и разработана соответствующая математическая модель.

**Ключевые слова:** математическая модель, техническое обслуживание, сложный объект.

## Введение и постановка задачи

Сложные восстанавливаемые изделия и системы эксплуатируются в различных отраслях и сферах деятельности. Это бытовые приборы, компьютеры, автомобили, производственные линии, системы связи, электростанции и т.п. Эти объекты состоят из отдельных агрегатов, устройств, подсистем, отдельных компонентов, номенклатура и количество которых насчитывает сотни, тысячи, иногда миллионы разнообразных составляющих, и поэтому структуру системы по классическим понятиям не учитывать не возможно.

Обеспечение надежности этих объектов – очень важная и сложная задача, которая решается как при проектировании, так и при эксплуатации путем планирования и проведения технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Контроль надежности, а также стратегия и тактика ТОиР проводится с учетом ряда факторов, в том числе, надежностных показателей всех составляющих компонентов объекта в их взаимосвязи.

Вместе с тем бывают случаи, когда достаточная информация о свойствах (надежности) безотказности отдельных элементов объекта отсутствует. Кроме того, конструктивная структура объекта бывает такой, что при эксплуатации нет доступа к отдельным ее элементам, необходимым для замены или технического обслуживания (ТО). При решении задачи оценки надежности объекта и планирования ТО необходимо рассматривать объект без учета его структуры. Это характерно для элементов объекта, структура которых в целом известна, но при эксплуатации нет возможности менять (восстанавливать) отдельные его составляющие, тогда при отказе составная часть меняется в целом. Кроме того, сам объект может входить в состав какой-либо системы и рассматриваться как элемент, внутренняя структура которого не важна.

В таком случае основной информацией о свойствах надежности объекта (элемента) является функция распределения наработки на отказ  $F(t)$ . Даже если аналитическое представление функции  $F(t)$  отсутствует, а сама функция  $F(t)$  задана гистограммой. Для нижних уровней комплектующих элементов: метизы, пружины, прокладки, трубки, резисторы, микросхемы, микропроцессоры и т.п. вид функции  $F(t)$

может быть задан на основании данных, полученных при априорных исследованиях и испытаниях на надежность. Для элементов более высоких конструктивных уровней, например, для блоков, узлов, агрегатов, и для всего объекта аналитическое выражение для функции может быть задано также на основании данных, полученных на испытаниях. Вместе с тем, для объектов высших конструктивных уровней и для объекта в целом получить аналитические модели очень сложно.

В данной статье рассматривается имитационная статистическая модель, пригодная для применения, когда структура сложного объекта не может быть учтена. С помощью этой модели можно получить оценки основных показателей надежности: средняя наработка на отказ, коэффициент готовности, коэффициент технического использования и т.п. [1]. Рассматриваются только периодические стратегии ТО по ресурсу [2], хотя нет никаких ограничений на возможность применения модели и в случае других стратегий.

### Анализ процесса технического обслуживания

Практически все сложные восстанавливаемые объекты содержат значительное количество механических, электромеханических, электронных, гидравлических и других элементов. Известно, что механизмы процессов изнашивания и старения для разных типов элементов бывают различными. Для микроэлектронных изделий типичны такие процессы: скопления дефектов и кристаллических дислокаций, диффузионные процессы в объеме и на поверхностях материалов, сорбционные и электролитические процессы и т.п. [3, 4]. Для механических элементов наиболее характерными причинами отказов и старения является усталость металлов, микротрещины, коррозия, деструкция керамических, резиновых и полимерных материалов и т.п. Все эти деградационные процессы имеют свои внутренние параметры, которые, как правило, хорошо изучены и учитываются разработчиками. Большая часть из них измеряется (выявляется) только при специальных лабораторных исследованиях. При проектировании таких объектов всегда ищутся какие-либо вторичные параметры, техническое состояние которых можно контролировать.

При этом определяются закономерности этих внутренних параметров, что определяет выбор модели отказов.

Модель отказов – это математическая модель в виде функции распределения наработки на отказ [5]. Принято различать «постепенные» и «внезапные» отказы [4]. Невзирая на условность такой классификации, для потребителя отказы всегда возникают внезапно. Понятие «постепенный отказ» часто используется, когда необходимо подчеркнуть, что причиной отказа являются процессы изнашивания и старения. Процесс деградации элемента описывается некоторым определяющим параметром  $x(t)$ , в результате влияния внешних факторов и внутренних физико-химических процессов значения определяющего параметра  $x(t)$  в процессе эксплуатации ухудшается и в некоторый момент времени достигает предельного значения, в этот момент времени и фиксируется отказ. Такая картина механизма отказов является упрощенной, но в ней отображена главная гипотеза, что отказ – это событие, порождаемое выходом определяющего параметра за пределы допустимых норм.

Характерной чертой постепенных (деградационных) отказов является то, что для них функция интенсивности отказов  $\lambda(t)$  является растущей функцией времени:

$$\lambda(t) = f(t)/(1 - F(t)),$$

где  $F(t)$  – функция распределения наработки на отказ.

Законы распределения наработки постепенных отказов часто называют распределением растущих функций интенсивности [3, 5]. Для элементов электротехники и радиоэлектроники наиболее адекватной моделью отказов являются диффузионное распределение.

Законом распределения, для которого  $\lambda(t) = \lambda = const$ , является экспоненциальное распределение, которое, по сути, является моделью «внезапных» отказов, т.е. отказами нестареющих элементов. Естественно то, что нестареющих элементов в природе не существуют, и потому применение модели экспоненциального распределения допустимо, лишь когда нужно получить грубые оценки показателей надежности или в случаях очень медленного старения.

ТО в соответствии с [1, 6] – это комплекс операций по поддержке работоспособности или исправности объекта при использовании его по назначению. Его сущность заключается в частичном или полном возобновлении объекта. Возобновление элемента – это частичное или полное возобновление его ресурса. Содержание операций ТО может быть разным в зависимости от типов и конструкции элементов. Если элемент – это сложный функциональный узел, состояние которого характеризуется одним или несколькими техническими параметрами, то операция ТО, включает две составляющие:

- измерение значения параметра,
- установку номинального его значения.

Установка номинального значения параметра является компенсацией деградационных изменений. Она может производиться регулировкой или путем частичной замены комплектующих элементов. Иногда в качестве заменяемых элементов могут быть масла или другие технические жидкости. Иногда элементы вообще не имеют регулируемых параметров и восстановление их ресурса возможно только путем его замены на новый.

Для определения степени восстановления ресурса объекта при ТО принят коэффициент возобновления ресурса  $k_{wr}$ . При полной замене объекта  $k_{wr} = 1$ . Если операции ТО заключаются в регулировке и (или) частичной замене составных частей, то  $k_{wr} < 1$ . Для точного определения коэффициента  $k_{wr}$  необходимы длительные испытания, стоимость которых может превышать стоимость полезного эффекта. С помощью коэффициента  $k_{wr}$  можно учитывать частичное возобновление ресурса при ТО. Для моделирования процессов ТО достаточно задавать приближенное значение  $k_{wr}$ , назначаемое экспертом.

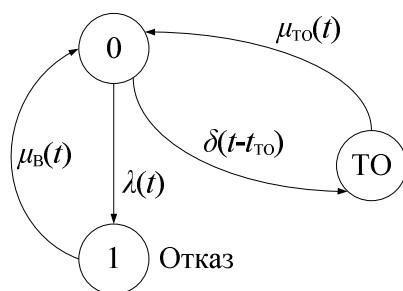
В упрощенном виде процесс восстановления ресурса объекта представлен в таком виде. При полном восстановлении объекта ( $k_{wr} = 1$ ) функция плотности вероятности наработки на отказ смещается «вправо» на время  $t_{то}$ . После проведения ТО ожидаемое среднее время использования ресурса объекта определяется выражениями:

$$t_{то} + T_{cp} \text{ при } k_{wr} = 1, \quad (1)$$

$$t_{то} + T_{cp} k_{wr} \text{ при } k_{wr} < 1. \quad (2)$$

### Математическая модель технического объекта без учета его структуры

Процесс ТО объекта без учета его структуры можно описать графом состояний и переходов (рис. 1).



**Рис.1.** Граф состояний переходов процесса ТО объекта без учета его структуры

На графе состояние 0 – работоспособное состояние, состояние 1 – неработоспособное состояние т.е. объект восстанавливается. Переходы между состояниями происходят в случайные моменты времени с интенсивностями, которые имеют такие обозначения:

$\lambda(t)$  – интенсивность отказов;

$\mu_{\text{в}}(t)$  – интенсивность восстановления;

$\mu_{\text{то}}(t)$  – интенсивность перехода от состояния ТО в состояние 0;

$\delta(t-t_{\text{то}})$  – интенсивность переходов в состояние ТО, которая представлена с помощью  $\delta$ -функции:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & \text{при } x = 0; \\ 0, & \text{при } x \neq 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1. \quad (4)$$

Затем имитируются детерминированные переходы в состояние ТО в неслучайные моменты времени  $t_{\text{то}}$  с использованием  $\delta$ -функции  $\delta(t-t_{\text{то}})$ .

Этот граф состояний и переходов определяет случайный процесс ТО и ТОиР объекта. На основании этого графа по известным правилам [7] построим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -[\lambda(t) + \delta(t-t_{\text{то}})]P_0(t) + \mu_{\text{в}}(t)P_1(t) + \mu_{\text{то}}(t)P_{\text{то}}(t); \\ P'_1(t) = \lambda(t)P_0(t) - \mu_{\text{в}}(t)P_1(t); \\ P'_{\text{то}}(t) = \delta(t-t_{\text{то}})P_0(t) - \mu_{\text{то}}(t)P_{\text{то}}(t); \\ P_0(t) + P_1(t) + P_{\text{то}}(t) = 1; \end{cases} \quad (5)$$

где  $P_0(t)$ ,  $P_1(t)$  и  $P_{\text{то}}(t)$  – это вероятности того, что в момент времени  $t$  объект находится соответственно в состояниях 0, 1 и ТО.

Система уравнений (5) практически и является математической моделью процесса ТО объекта. Следует отметить, что решение этой системы дифференциальных уравнений несколько затруднено, поскольку интенсивность  $\lambda(t)$  является функцией времени и ее вид не всегда известен. То же касается функций  $\mu_{\text{в}}(t)$  и  $\mu_{\text{то}}(t)$ , однако их влияние на окончательное решение не очень важно, поскольку среднее время восстановления и средняя длительность ТО на порядки меньше, чем средняя наработка на отказ.

В данной статье предлагается использовать имитационную статистическую модель и с ее помощью получить оценки показателей надежности объекта с учетом проведения ТО. Задав в качестве исходных данных для модели информацию об объекте, состоящего из единственного элемента, получим приближенное решение системы уравнений (5). Как результат моделирования получается функция параметра потока отказов объекта  $\Omega(t)$  на заданном интервале времени эксплуатации. Функция  $\Omega(t)$  связана с вероятностью  $P_1(t)$ , входящей в (5), соотношением

$$\Omega(t) \cong \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_1(t, t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (6)$$

где  $P_1(t, t + \Delta t)$  – вероятность того, что объект в течение интервала времени  $(t, t + \Delta t)$  находится в состоянии отказа (в состоянии 1).

Это позволяет констатировать, что  $\Omega(t) dt \cong P_1(t)$ , получаемая с помощью представления информации по автомобильной технике [8] и модели, построенной для радиоэлектронных объектов [9], функция  $\Omega(t)$  удовлетворяет системе уравнений (5).

Средняя наработка на отказ объекта по функции  $\Omega(t)$  [7] определяется следующим образом:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\int_0^{T_E} \Omega(t) dt}, \quad (7)$$

где  $\bar{T}_0$  – оценка средней наработки на отказ объекта на интервале эксплуатации  $(0, T_E)$ ;  $T_E$  – заданный период эксплуатации.

Оценка  $\bar{T}_0$  в этом случае получается с учетом проведения ТО, поскольку используется функция параметра потока отказов  $\Omega(t)$ .

## Выводы

Получена математическая модель технического обслуживания сложного восстанавливаемого объекта без учета его структуры, которая адекватно отображает физическое содержание этого процесса и подтверждает возможность применения имитационной статистической модели для исследования процессов ТОиР.

## Список литературы

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Введ. 01.01.1996. – 96 с.
2. Барзилович, Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высш. школа, 1982. – 231 с.
3. Стрельников, В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
4. Зубарев, В.В. Вплив дефектів функціональних матеріалів на надійність електроніки: Монографія / В.В. Зубарев, С.В. Ленков, В.А. Мокрицький, Д.О. Перегудов. – Одеса: Друк, 2003. – 454 с.
5. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.1999. – 98 с.
6. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – Введ. 01.01.1980. – 27 с.

7. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
8. Толок, И.В. Построение информационной базы системы технического обслуживания и ремонта автомобильной техники / И.В. Толок // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Харків, 2008. – Вип. 3(18). – С.146 – 148.
9. Браун, В.О. Моделирование процессов технического обслуживания сложных восстанавливаемых объектов радиоэлектронной техники / В.О. Браун, К.Ф. Боряк, О.Б. Лантвойт, В.Н. Цыцарев. // Вісник інженерної академії України. – 2008. – №2. – С. 8-14.

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СКЛАДНОГО ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ БЕЗ УРАХУВАННЯ ЙОГО СТРУКТУРИ**

І.В. Толок

Департамент військової освіти та науки Міністерства оборони України,  
Повітрофлотський пр-т 28, 03049, м. Київ, Україна; e-mail: tolok@ukr.net

У статті приведений аналіз особливості технічного обслуговування складного відновлюваного об'єкту без урахування його структури і розроблена його відповідна математична модель.

**Ключові слова:** математична модель, технічне обслуговування, складний об'єкт.

## **MATHEMATICAL MODEL OF TECHNICAL MAINTENANCE OF DIFFICULT REFURBISHABLE OBJECT WITHOUT ACCOUNT OF HIS STRUCTURE**

I. Tolok

Department of Military Education and Science of the Ministry of Defence of Ukraine,  
28 Povitroflotcky Ave, Kyiv, 03049, Ukraine; e-mail: tolok@ukr.net

To the article the analysis of feature of technical maintenance of difficult refurbishable object is driven without the account of his structure and a corresponding mathematical model is worked out.

**Keywords:** mathematical model, technical service, difficult object.

# ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ АЛГОРИТМОВ ПОКРЫТИЯ

О.Н. Паулин

Одесский Национальный Политехнический Университет,  
пр. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: paolenic@yandex.ua

В статье ставится и решается проблема построения вычислительных моделей для класса комбинаторных задач. Практически важной в этом классе является задача о покрытии, использующая переборный механизм. Такого рода задачи возникают, например, при необходимости оптимального выбора поставщиков при сборке сложного изделия. Вычислительные процессы решения задачи о покрытии имеют много общих функционально законченных компонент, названных нами макрооперациями, которые могут быть выделены как вычислительные модели из этого процесса. Такое выделение позволит собрать библиотеку макроопераций для разных классов задач, что упростит и ускорит анализ программ ещё на стадии построения алгоритмов (вычислительных процессов). Рассматриваются 2 метода и соответственно 2 алгоритма решения задачи о покрытии: полного перебора подмножеств и граничного перебора по вогнутому множеству. Приводятся словесные описания алгоритмов, их схемы, а также описания и схемы вычислительных модулей. Выделяются макрооперации как вычислительные модели, которые частично обобщаются.

**Ключевые слова:** комбинаторные задачи, вычислительные процессы, вычислительные модели, макрооперации, алгоритмы покрытия, полный перебор, граничный перебор, вычислительные модули.

## Введение

В настоящее время широко распространён класс задач, в которых осуществляется поиск оптимальных решений. Такая задача обладает некоторым множеством решений, на котором задаётся функция стоимости; критерием оптимальности в таких задачах является минимальное значение функции стоимости решения. Этот класс задач является по сути комбинаторным [1]. Задачу покрытия [2] можно рассматривать как вариант задачи поиска в некотором конечном множестве определённых подмножеств с заданными свойствами. Она возникает при необходимости выбора таких компонент из множества возможных, которые покрывают заданную их совокупность, при условии, что выбор будет оптимальным. Например, в производстве сложного изделия, скажем, авиадвигателя, может понадобиться некоторое множество деталей от различных поставщиков с разными комплектами деталей и с разными ценами. При этом производителю надо минимизировать либо общую цену поставок, либо количество поставщиков. Другой пример – логические задачи о покрытии множеств, о поиске минимальных разбиений и др. [3] при синтезе и анализе цифровых схем на программируемых логических матрицах.

Расширение понятия «покрытия» выполнено в [4]; здесь синтез логического модуля проводится на основе специальным образом построенной таблицы покрытия, в которой отношение принадлежности отмечается непосредственным указанием элементов, которые входят в множество термов фундаментальных симметрических функций [5].

Существуют различные методы и алгоритмы для решения задачи покрытия (РЗП), отличающиеся точностью и сложностью вычислительного процесса (ВП); зачастую оказывается, что множество решений – подмножества с заданными свойствами – является выпуклым по отношению включения. В таком случае нахождение множества всех решений сводится к нахождению его нижней границы, что может иногда существенно сократить объём производимых при поиске вычислений.

В этих ВП имеется немало общего и задача состоит в выделении этого общего в виде макроопераций (МО) как вычислительных моделей компонент ВП. Первый опыт подобного выделения приведен в [6]. Отлаженные с помощью сети Петри МО [7] могут быть собраны в библиотеку МО для разных классов задач, что позволит «собирать» новые ВП. В свою очередь, это позволит упростить и ускорить анализ программ, реализующих разнообразные вычислительные процессы, ещё на стадии построения алгоритмов (организации вычислительных процессов) [8, 9]. Последнее особенно важно в свете того, что программы усложняются, растёт число ошибок, и их отладка часто занимает в разы большее время, чем само написание программ [10].

*Целью* работы является ускорение анализа программ за счёт выделения макроопераций из вычислительного процесса покрытия. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- составить словесные описания и построить схемы алгоритмов перебора;
- проанализировать словесные описания и выявить макрооперации;
- составить общий список макроопераций.

### Задача о покрытии и методы её решения

**Постановка задачи о покрытии.** Пусть  $B = \{b_1, \dots, b_n\}$  – опорное множество. Имеется множество  $A$ , состоящее из  $m$  подмножеств  $A_i$  ( $A = \{A_1, \dots, A_m\}$ ) множества  $B$  таких, что  $A_i \subseteq B, \bigcup_{i=1}^m A_i = B$ . Каждому подмножеству  $A_i$  сопоставлено число  $c_i$ , называемое *ценой*. Множество  $P = \{A_{k_1}, \dots, A_{k_l}\}$  ( $k_j \in \{1, \dots, m\}, l \leq m, k$  – номер варианта выборки подмножеств) называется *решением задачи о покрытии* или просто *покрытием*, если выполняется условие

$$\bigcup_{j=1}^l A_{k_j} = B, \quad (1)$$

при этом цена  $C = \sum_{j=1}^l c_{k_j} \rightarrow \min$ .

Термин покрытие означает, что совокупность множеств  $A_{k_1}, \dots, A_{k_l}$  содержит все элементы множества  $B$ , т.е. «покрывает» множество  $B$ .

**Определение 1.** *Безизбыточным* называется покрытие, если при удалении из него хотя бы одного элемента оно перестает быть покрытием. Иначе – покрытие избыточно.

**Определение 2.** Покрытие  $P$  называется *минимальным*, если его цена  $C = \sum_{j=1}^l c_{k_j}$  – наименьшая среди всех покрытий данной задачи.

**Определение 3.** Покрытие  $P$  называется *кратчайшим*, если  $l$  – наименьшее среди всех покрытий данной задачи.

Отметим, что в этом случае цены всех подмножеств  $A_i$  приняты по умолчанию одинаковыми и равными 1.

**Теорема 1.** Минимальные и кратчайшие покрытия – *безизбыточны*.

Удобным и наглядным представлением исходных данных и их преобразований в задаче о покрытии является *таблица покрытий*. Таблица покрытий – это матрица  $T$  отношения принадлежности элементов множеств  $A_i \in A$  опорному множеству  $B$ ; столбцы матрицы  $T$  сопоставлены элементам  $b_j$  множества  $B$ , строки – элементам  $A_i$  множества  $A$ :

$$T = \begin{cases} 1, & \text{если } b_j \in A_i \\ 0, & \text{если } b_j \notin A_i \end{cases} \quad (2)$$

Нули в матрице  $T$  не проставляются.

**Пример 1.** Некий писатель выпустил множество сборников  $A = \{A_1, \dots, A_7\}$ , содержащее в совокупности все множество  $B = \{b_1, \dots, b_9\}$ , его сочинений (табл. 1). Каждый сборник  $A_i$  содержит некоторое подмножество сочинений из  $B$  ( $A_i \subseteq B$ ) и имеет некоторую цену  $c_i$ . Необходимо найти такое множество  $P = \{A_{k_1}, \dots, A_{k_l}\}$ , ( $i_j \in \{1, \dots, 7\}, l \leq 7$ ) сборников, чтобы в их совокупности содержались все сочинения данного автора  $\bigcup_{j=1}^l A_{k_j} = B$  и чтобы при этом либо цена  $C = \sum_{j=1}^l c_{k_j}$  такого полного собрания сочинений была *наименьшей*, либо количество  $l$  сборников было *наименьшим*.

**Таблица 1.**

Матрица отношения принадлежности элементов множества  $A_i \in A$  опорному множеству  $B$

$T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$C$
$A_1$							1	1	1	1.5
$A_2$	1	1		1				1		2
$A_3$			1							2
$A_4$				1	1	1	1			1
$A_5$	1				1			1	1	3
$A_6$		1				1				1
$A_7$			1		1	1	1		1	5

Возможные решения примера 2 – следующие покрытия:

$P_1 = \{A_2, A_7\}, A_2 \cup A_7 = B; C_1 = 2 + 5 = 7; l_1 = 2$  – кратчайшее покрытие;

$P_2 = \{A_1, A_3, A_4, A_6\}, A_1 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_6 = B; C_2 = 1.5 + 2 + 1 + 1 = 5.5; l_2 = 4$  – минимальное покрытие;

$P_3 = \{A_3, A_4, A_5\}, A_3 \cup A_4 \cup A_5 = B; C_3 = 2 + 1 + 3 = 6; l_3 = 3$  – неоптимальное покрытие.

Табл. 1 может рассматриваться как таблица покрытия в сборочном производстве изделия, состоящего из комплектующих  $b_1, \dots, b_9$ , которые могут быть частично поставлены разными производителями  $A_1, \dots, A_7$  с разной ценой  $c$  (ТП), чтобы в совокупности строк, входящих в  $P_i$ , во всех столбцах были 1 (единицы в некотором столбце могут повторяться). Такое подмножество строк ТП называется покрытием.

Имеются следующие варианты формулировки задачи о покрытии.

1. Требуется найти *все* покрытия. Для решения задачи необходимо выполнить полный перебор всех подмножеств множества  $A$ .

2. Требуется найти *только* безизбыточные покрытия. Не существует простого и эффективного алгоритма, не требующего построения всех избыточных покрытий; хорошо, если уменьшается их количество. Используется граничный перебор либо разложение по столбцу ТП.

3. Требуется найти *одно* безизбыточное покрытие. Решение задачи основано на сокращении ТП.

Задачи о покрытии могут быть решены *точно* (при небольшой размерности) либо *приближенно*.

Для нахождения точного решения используются следующие алгоритмы:

1. *Алгоритм полного перебора* основан на методе упорядочения перебора подмножеств множества  $A$ .

2. *Алгоритм граничного перебора по вогнутому множеству* основан на одноименном методе сокращения перебора.

3. *Алгоритм разложения по столбцу ТП* основан на методе сокращения перебора, который состоит в рассмотрении только тех строк ТП, в которых имеется 1 в выбранном для разложения столбце.

4. *Алгоритм сокращения ТП* основан на использовании теорем о свойствах ТП. Результатом работы алгоритма является множество ядерных строк и циклический остаток ТП, покрытие для которого далее строится методами граничного перебора либо разложения по столбцу.

Приближенное решение задачи о покрытии основано на следующем соображении. Даже сокращённый перебор приводит к очень трудоёмкому процессу решения, поэтому для получения результата приходится отказываться от гарантий построения оптимального решения (минимального либо кратчайшего); однако при этом целесообразно получить не самый худший результат – хотя бы безизбыточное покрытие, удовлетворяющее необходимому условию (1). Тогда, в ущерб качеству, можно значительно упростить процесс решения.

Алгоритм построения покрытия, близкого к кратчайшему, основан на методе минимального столбца – максимальной строки.

Ниже рассматриваются первые два из упомянутых алгоритмов точного решения задачи о покрытии.

**Алгоритм полного перебора.** Будем считать, что подмножества множества  $A$  пронумерованы  $A_1, \dots, A_m$  и таким образом упорядочены. Естественный на первый взгляд метод перебора *всех* подмножеств  $D$  строк таблицы покрытий строится так: пустое подмножество строк, подмножества из одной строки, из двух строк, ..., из всех строк, т.е. всего  $2^m$  подмножеств:

$$D = \{\emptyset, \{A_1\}, \dots, \{A_m\}, \{A_1, A_m\}, \dots, \{A_1, \dots, A_m\}\}.$$

Этот метод перебора громоздкий, поскольку требует большое число циклов. Более эффективный алгоритм требует всего 2 цикла.

**Описание алгоритма перебора по вогнутому множеству.**

*Структуры данных:*

$T$  – таблица покрытия (ТП), содержащая  $n$  строк и  $m$  столбцов;

$D$  – текущее подмножество (список), элементами которого являются номера строк ТП;

$P, C$  – покрытие и список покрытий.

*Словесное описание алгоритма полного перебора:*

1. Вводим в текущее подмножество номер 1-й строки ТП ( $D = \{A_1\}$ ),  $i := 0$ .

2.  $i := i + 1$ . Реалізуємо модуль «Формирование признака  $p$  покрытия» (ФПП); если  $p = 1$  (имеет место покрытие), запоминаем множество  $D$ , как очередное покрытие  $P_i$  и вносим его в список покрытий.

3. Находим наибольший номер  $j$  элемента  $A_j \in D$ .

3.1. Если  $j \neq n$  ( $n$  – количество подмножеств  $A_j$ ), то переходим к п.4.

3.2. Если  $j = n$ , то удаляем  $A_n$  из  $D$  ( $A_n \leftarrow D$ ) и если  $D = \emptyset$ , то заканчиваем построение подмножеств и переходим на п. 5.; если  $D \neq \emptyset$ , то находим наибольший номер  $j$  элемента  $A_j \in D$  и удаляем  $A_j$  из  $D$  ( $A_j \leftarrow D$ ).

4.  $j := j + 1$ . Вводим в  $D$  элемент  $A_j$  ( $A_j \rightarrow D$ ). Переходим к п.2.

5. Вывод на печать всех покрытий.

6. Конец.

В качестве элемента в этом алгоритме рассматривается номер строки ТП. По этому описанию построена схема алгоритма (рис.1а). Модуль ФПП описан далее.

**Пример 2.** Для  $n = 4$  определить список всех подмножеств, не выделяя покрытий. Имеем:  $D_1 = \{A_1\}$ ,  $D_2 = \{A_1, A_2\}$ ,  $D_3 = \{A_1, A_2, A_3\}$ ,  $D_4 = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ ,  $D_5 = \{A_1, A_2, A_4\}$ ,  $D_6 = \{A_1, A_3\}$ ,  $D_7 = \{A_1, A_3, A_4\}$ ,  $D_8 = \{A_1, A_4\}$ ,  $D_9 = \{A_2\}$ ,  $D_{10} = \{A_2, A_3\}$ ,  $D_{11} = \{A_2, A_3, A_4\}$ ,  $D_{12} = \{A_2, A_4\}$ ,  $D_{13} = \{A_3\}$ ,  $D_{14} = \{A_3, A_4\}$ ,  $D_{15} = \{A_4\}$ .

**Метод и алгоритм граничного перебора по вогнутому множеству.** Алгоритм основан на методе генерации подмножеств и их целенаправленном отборе. Алгоритм генерации подмножеств должен гарантировать, что при его последовательном применении можно построить, начиная с некоторого начального подмножества, все возможные подмножества; при этом не должно быть повторов и должен существовать критерий окончания перебора. В алгоритме полного перебора упорядочение перебора произведено сначала по числу  $i$  элементов, а затем для фиксированного  $i$  – по лексикографическому правилу относительно номеров подмножеств.

Более удобный для дальнейшего упрощения процесса решения алгоритм полного перебора заключается в следующем: сначала строятся все подмножества  $D_i$ , содержащие  $A_1$ , затем – содержащие  $A_2$ , но не содержащие  $A_1$ ; если построено подмножество  $D_i$ , то за ним строится подмножество  $D_{i+j}$ , целиком содержащее  $D_i$  ( $D_i \subset D_{i+j}$ ).

Во многих приложениях достаточно находить только безизбыточные покрытия (теорема 1), что естественным образом сокращает перебор. Однако не удаётся найти простой и эффективный алгоритм, не требующий построения всех избыточных покрытий. Идея улучшения алгоритма перебора (генерации) подмножеств заключается в следующем: если текущее подмножество – покрытие, то в это подмножество не нужно вводить новые элементы.

**Теорема 2.** Если  $P$  покрытие, то и  $P'$ ,  $P' \supseteq P$ , тоже покрытие, т.е. множество всех возможных покрытий *вогнуто*.

Безизбыточные покрытия – это граница вогнутого множества всех покрытий, поэтому модифицированный алгоритм носит название «Алгоритм граничного перебора по вогнутому множеству».

**Описание алгоритма перебора по вогнутому множеству.**

*Структуры данных:*

$T$  – таблица покрытия (ТП), содержащая  $n$  строк и  $m$  столбцов;

$D$  – текущее подмножество (список), элементами которого являются номера строк ТП;

$P$  – покрытие (список номеров строк, дающих покрытие).

Относительно списка примем следующие соглашения:

- имеется специальный указатель **first** на первый элемент списка;
- связность элементов списка обеспечивается указателем  $i$  на следующий элемент  $(x.i)$ ;
- имеется указатель **free** на первую свободную ячейку списка;
- для доступа к срединному элементу списка просматривается цепочка элементов от первого до искомого;
- операционная система регулярно осуществляет чистку списков от мусора (вычищает удалённые элементы) и проводит перенумерацию элементов.

**Операции** над списком  $L$ :

- **вставить** элемент  $x$  ( $x \rightarrow L$ );
- **удалить** элемент  $x$  ( $x \leftarrow L$ );
- **считать** значение элемента  $x$  ( $x \leftrightarrow L$ ) с сохранением его в списке.

Отметим, что при вставке/удалении элемента  $x$  модифицируется указатель, а сам список упорядочивается (происходит перенумерация элементов).

*Словесное описание алгоритма граничного перебора:*

1. Текущее подмножество  $D := \{A_1\}, i := 0$ .
2. Выясняем, является ли  $D$  покрытием, для чего формируем признак  $p$  покрытия (ФПП). Если очередное построение в  $D$  – покрытие ( $p=1$ ), то упорядочиваем список покрытий (УСП).
3. Находим наибольший номер  $j$  элемента в подмножестве  $D$ .
  - 3.1. Если  $j \neq n$  и  $D$  – не покрытие ( $p=0$ ), то выполняем п.5.
  - 3.2. Если  $j \neq n$  и  $D$  – покрытие ( $p=1$ ), то выполняем п.4.
  - 3.3. Если  $j = n$ , то удаляем  $A_n$  из  $D$  ( $A_n \leftarrow D$ ), и если  $D = \emptyset$ , то заканчиваем построение всех безизбыточных покрытий и переходим на п. 6, иначе – снова находим наибольший номер  $j$  элемента в  $D$ .
4. Удаляем элемент  $A_j$  из  $D$  ( $A_j \leftarrow D$ ).
5.  $j := j+1$ . Вводим элемент  $A_j$  в  $D$  ( $A_j \rightarrow D$ ) и выполняем п.2.
6. Выводим на печать список безизбыточных покрытий.
7. Конец.

Из полученных безизбыточных покрытий можно выбрать покрытия с минимальным количеством строк (кратчайшее покрытие) либо покрытие с минимальной ценой (минимальное покрытие) в соответствии с (2).

**Пример 3.** Задана таблица покрытий  $T$  (табл. 2), в которой  $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$  – опорное множество,  $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$  – множество подмножеств  $D$  множества  $B$ . Работа алгоритма иллюстрируется последовательностью построения подмножеств  $D$ :

$D = \{A_1\}$ ,  $D = P_1 = \{A_1, A_2\}$ ,  $D = \{A_1, A_3\}$ ,  $D = P_2 = \{A_1, A_3, A_4\}$ ,  $D = \{A_1, A_4\}$ ,  $D = \{A_2\}$ ,  $D = \{A_2, A_3\}$ ,  $D = P_3 = \{A_2, A_3, A_4\}$ ,  $D = \{A_2, A_4\}$ ,  $D = \{A_3\}$ ,  $D = P_4 = \{A_3, A_4\}$  - упорядочение списка покрытий:  $P_2 \supset P_4$ ,  $P_3 \supset P_4 \Rightarrow P_1 = \{A_1, A_2\}$ ,  $P_2 = \{A_3, A_4\}$ ;  $D = \{A_1\}$ ;  $D = \emptyset$ .  $P_1$  и  $P_2$  - кратчайшие покрытия.

На рис. 1, б представлена схема алгоритма граничного перебора, построенная в соответствии с его словесным описанием.

Рассмотрим алгоритмические модули ФПП и УСП.

Таблиця 2.

Матриця отношения принадлежности элементов множества  $A_i \in A$  опорному множеству  $B$

$T$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
$A_1$	1		1		1
$A_2$	1	1		1	
$A_3$	1			1	1
$A_4$		1	1		

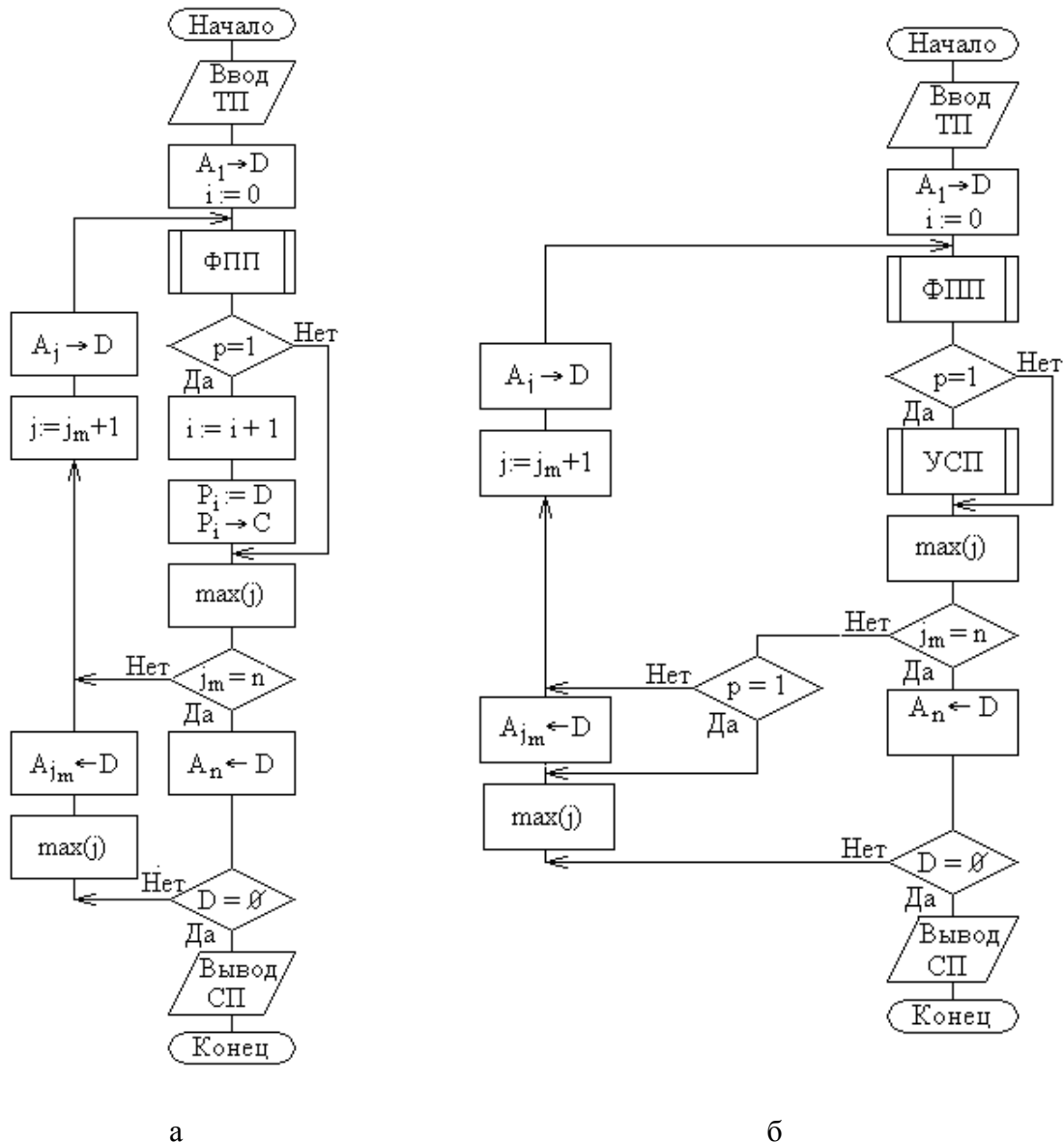


Рис. 1. Схема алгоритма перебора: а – полного; б – граничного

**Описание модуля ФПП.** Сформулируем признак покрытия:  $p=1$ , если в процессе перебора строк ТП, заданных подмножеством (списком)  $D$ , выяснится, что все 0-позиции покрыты. Покрытие может наступить до исчерпания строк, входящих в подмножество  $D$ .

*Структуры данных:*

$T$  – таблица покрытия (ТП), содержащая  $n$  строк и  $m$  столбцов;

$D$  – текущее подмножество (список) из  $s$  номеров строк ТП;

$L$  – список из  $r$  позиций, на которых находятся нули (0-позиции);

$V$  – двоичный вектор;

$t$  – номер 0-позиции,  $t = L[j]$ ;

$q$  – номер строки в ТП.

*Словесное описание вычислительного процесса в модуле ФПП.*

1. Если в  $D$  всего одна строка (принимается по умолчанию, что одна строка не образует покрытия), то переход на п. 8 (возврат значения признака  $p = 0$ ).

2. Определяется номер первой в  $D$  строки ( $q := D[1]$ ) и считывается сама строка  $A_q$  из ТП ( $A_q \leftrightarrow T$ ). Она представляется в виде двоичного вектора (ДВ)  $V$ , ( $V \div A_q$ ).

3. Просматриваются позиции  $V$ ; номера 0-позиций заносятся в список  $L$  ( $V[j] = 0 \Rightarrow j \rightarrow L$ ).

4. Определяется номер следующей строки из  $D$  и, соответственно, считывается сама строка, которая далее представляется в виде ДВ,  $V \div A_q$ .

5. Просматриваются в  $V$  все те позиции  $t$ , которые занесены в  $L$ ; если в текущей позиции находится 1, то номер этой позиции удаляется из  $L$  ( $t \leftarrow L$ ).

6. Если  $L = \emptyset$ , то  $p := 1$  ( $D$  – покрытие); переход на п. 8;

7. Если не все строки в  $D$  обработаны, то переход на п.4, иначе  $p := 0$ .

8. Возврат значения  $p$  в основную программу.

**Пример 4.** Пусть  $D = \{A_2, A_7, A_8\}$ . Это означает, что  $D$  содержит номера 2, 7 и 8 строк из ТП. Вначале выбирается 2-я строка, в которой определяются номера 0-позиции; эти номера заносятся в список  $L$ . В последующих строках нас интересуют только номера 0-позиций и значения вектора на них. Если некоторые из этих значений равны 1, то соответствующие номера исключаются из списка  $L$ .

Пусть далее первая в  $D$  строка  $A_2$  содержит 10 элементов с таким распределением значений:  $A_2 = 1101001111$ . Тогда  $L = \{3, 5, 6\}$ . Рассмотрим очередную строку со следующим распределением значений:  $A_7 = 1000100111$ . Для нахождения результирующего вектора (РВ) надо рассматривать в  $A_7$  только позиции 3, 5, 6. Видно, что РВ принимает значение  $V = 010$ . Это означает, что номер пятый 0-позиции может быть исключён из  $L$ . Результат:  $L = \{3, 6\}$ .

На рис. 2, а представлена схема алгоритма вычислительного модуля ФПП, построенная по его словесному описанию.

**Описание вычислительного модуля УСП.** Идея упорядочения списка покрытий состоит в удалении по очереди из ранее построенных покрытий тех покрытий, которые поглощают (включают в себя)  $D$ , т.е. избыточных покрытий, при этом уменьшая  $i$  каждый раз на 1; запоминаем последнее  $D$  как покрытие  $P_i$  ( $i := i + 1$ ;  $P_i := D$ ).

Отметим, что возможны 4 варианта результата проверки на включение множеств  $A$  и  $B$ :

1.  $A \subset B$ .

2.  $A \supset B$ .

3.  $A = B$ .

4.  $A$  и  $B$  несравнимы. В данном случае возможны по построению подмножеств  $D$  только 1-й и 4-й варианты. Следовательно, достаточно убедиться в том, что все элементы  $B$  входят/не входят в множество  $A$ .

Примем по умолчанию, что множества  $A$  и  $B$  представлены списками и упорядочены по возрастанию.

*Структуры данных:*

$C$  – список покрытий;

$P^*$  – текущее покрытие;  
 $i$  – номер покрытия,  $i = 1 \dots q$ .

*Исходные данные:* список покрытий  $C$ , очередное покрытие  $P^*$ , не вошедшее ещё в список  $C$ , номер последнего в списке покрытия –  $q$ .

*Словесное описание вычислительного процесса в модуле УСП.*

1. Организуем цикл по  $i$  перебора покрытий в списке  $C$  ( $i := i + 1$ ). Если  $i > q$ , то переходим на п. 5.
2. Считываем очередное покрытие из  $C$  ( $P_i \leftrightarrow C$ ).
3. Определяем, не является ли оно избыточным относительно  $P^*$  (сравнение покрытий  $P_i$  и  $P^*$  на избыточность – модуль СПИ). Если  $P_i$  не является избыточным ( $g = 0$ ), то переходим на п.1.
4. Удаляем избыточное покрытие  $P_i$  из списка  $C$  ( $P_i \leftarrow C$ ), переходим на п.1.
5. Процедура оканчивается и возвращается результирующий список покрытий  $C'$ .

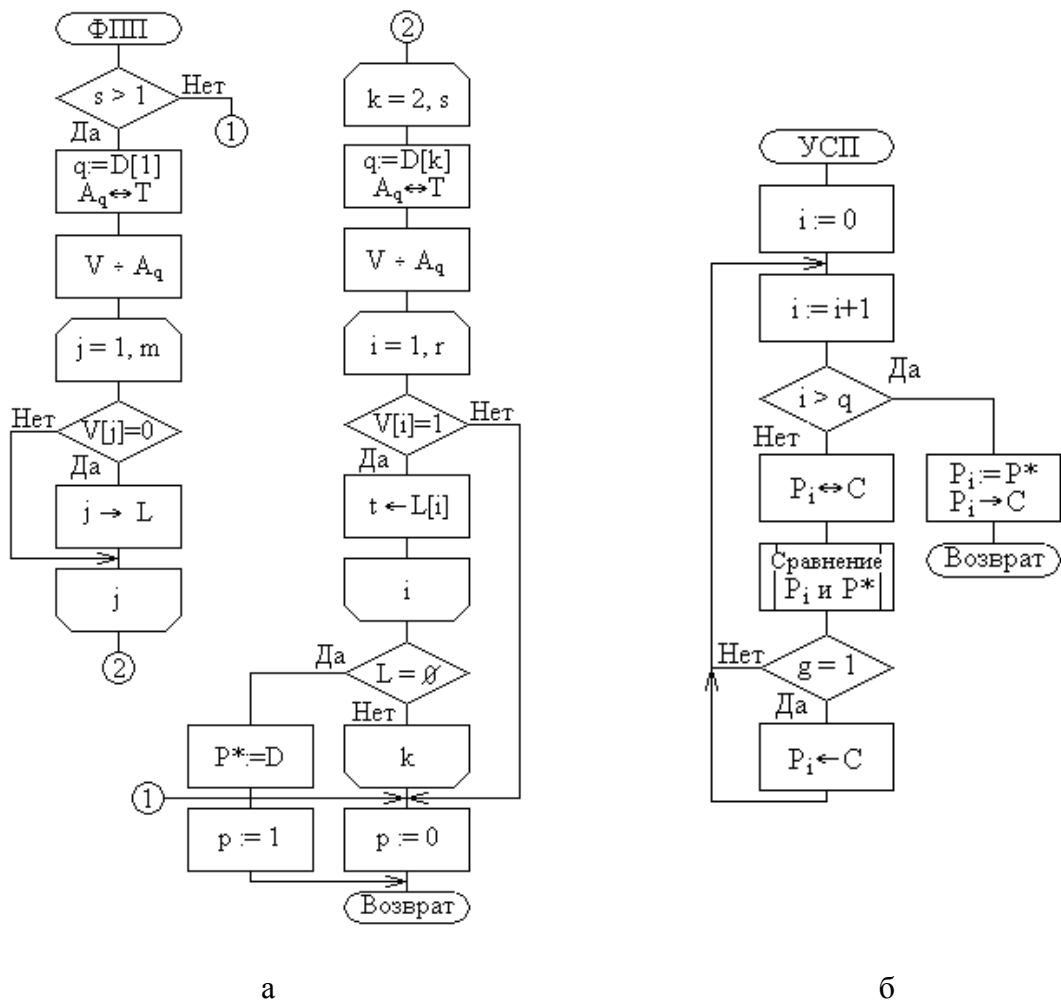


Рис. 2. Выделенные алгоритмические модули: а – ФПП; б – УСП

**Описание вычислительного модуля СПИ.** Переобозначим:  $A := P_i$ ,  $B := P^*$ . Отметим, что количество элементов в  $P_i$  всегда больше, чем в  $P^*$ , что определяется методом построения подмножеств  $D$ ; при этом число вариантов сравнения уменьшается до двух: избыточно/неизбыточно. Обозначим  $g$  признак избыточности. Тогда  $g = 1$  означает избыточность  $P_i$  относительно  $P^*$ .

Идея решения состоит в исключении из обоих множеств их пересечения  $A \cap B$ ; в случае  $B = \emptyset$  это будет означать, что  $P_i$  избыточно относительно  $P^*$ .

*Словесное описание алгоритма для модуля СПИ*

1. Перебираем элементы  $y_j$  множества  $B$ .
2. Просматриваем элементы  $x_k$  множества  $A$ .
3. Если элементы  $x_k$  и  $y_j$  совпадают, то они удаляются из обоих множеств; переход к п.2. Иначе множества несравнимы ( $g := 0$ ) – переход на п. 5.
4. Проводится модификация указателей множеств и перенумерация элементов (по умолчанию – автоматическая)
5. Если  $B = \emptyset$ , то  $g := 1$ , иначе переход на п. 1.
6. Процесс заканчивается; возвращается значение  $g$ .

**Пример 5.** Пусть  $C = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$ , очередное покрытие –  $P^*$ . Требуется упорядочить список покрытий  $C$ .

Поочерёдно сравниваем  $P_i$  с  $P^*$  ( $i=1..4$ ). Пусть покрытия  $P_2$  и  $P_3$  – избыточны относительно покрытия  $P^*$ . Тогда  $P_2$  и  $P_3$  удаляются из списка  $C$ , а у оставшегося элемента списка ( $P_4$ ) номер уменьшится на 2. Таким образом, результирующий список примет вид:  $C' = \{P'_1, P'_2, P'_3\}$ , где  $P'_1 := P_1$ ,  $P'_2 := P_2$ ,  $P'_3 := P_3$ .

## Выделение макроопераций из рассмотренных ВП и ВМ

Анализ вычислительного процесса позволяет выделить из него макрооперации как функционально законченные объекты.

**Сводный список МО в ВП решения задачи о покрытии.** В результате просмотра словесных описаний основных алгоритмов и их вычислительных модулей были выявлены МО для каждого из них, а затем они были сведены в единый список:

1. Счётный цикл.
2. Условный цикл.
3. Увеличение значения счётчика на 1.
4. Проверка на истинность отношения.
5. Считывание строки таблицы покрытия и преобразование типа: строки в вектор.
6. Проверка множества (списка) на пустоту.
7. Считывание значения элемента множества (списка).
8. Вставка элемента в множество (список).
9. Удаление элемента из множества (списка).
10. Определение максимального номера элемента множества (списка).
11. Перенумерация элементов множества (списка).
12. Присвоение номера текущему подмножеству и его запоминание в виде элемента списка.

Проведём анализ сводного списка. Видно, что первые 3 МО определяют разные варианты повторения фрагмента ВП. Четвёртая МО является стандартной проверкой истинности предиката с отношениями разного типа ( $=$ ,  $\neq$ ,  $>$  ... и т.д.). Пятая МО может быть организована поэлементно. МО 12 простая, но важная операция. МО 6-11 определяют работу со списком, причём МО 6 и 11 выполняются операционной системой, МО 8 и 9 – забота пользователя, МО 10 реализуется с использованием указателя **free** ( $j_{\max} := \text{free} - 1$ ); МО 7, если это не предусмотрено в языке высокого

уровня, может быть выполнена в 3 шага: удаление элемента, присвоение его значения некоторой переменной, вставка в список.

Проведенный анализ позволил построить следующие обобщённые МО.

**Обобщённая МО «Формирование подмножества (при  $j_{\text{тек}} = n$ )»** включает в себя следующие операции:

- удаление последнего элемента из подмножества ( $A_n \leftarrow D$ );
- определение номера предпоследнего элемента ( $j_m$ );
- удаление элемента с номером  $j_m$ ;
- определение номера нового элемента  $j = j_m + 1$ .

**Обобщённая МО «Упорядочение списка покрытий»** включает в себя следующие операции:

- сравнение покрытия  $P^*$  из таблицы покрытия с текущим покрытием  $P_i$  в списке;
- удаление избыточного покрытия;
- перенумерация элементов списка;
- введение в список текущего покрытия.

## Выводы

Рассмотрены 2 метода и алгоритма перебора при решении задачи о покрытии: полный и граничный. Отметим, что полный перебор элементов некоторого множества пригоден не только для решения задачи о покрытии – он имеет широкий круг применения; при этом модуль ФПП заменяется на другой модуль со своим конкретным признаком отбора элементов с особыми свойствами. Метод граничного перебора используется при малом числе строк ТП и, в основном, в связке с методом сокращения ТП с помощью теорем, в результате применения которых получается т.н. циклический остаток (ЦО). Для дальнейшей обработки ЦО как раз и предназначен метод граничного перебора.

Для каждого алгоритма в ВП выделены МО, которые затем сведены в общий список с незначительными модификациями обобщающего плана.

Реализацию МО можно осуществить различными способами (различными ВП), отличающимися сложностью. Сравнение вариантов алгоритмов по сложности не проводилось – автор полагался на свой достаточно большой опыт проведения практических занятий и курсового проектирования по теории алгоритмов.

Отметим, что обобщенное представление программ в виде классов и методов скрывает количество реально выполняемых операторов и затрудняет анализ. Нами предлагается создание библиотеки отлаженных с помощью сетей Петри МО разного уровня сложности.

## Список литературы

1. Рейнгольд, Э. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика / Э. Рейнгольд, Ю. Нивергельт, Н. Део. – М.: Мир, 1980. – 480 с.
2. Кнут, Д. Искусство программирования. Т.3. – Сортировка и поиск / Д. Кнут. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2000. – 832 с.
3. Закревский, А.Д. Логический синтез каскадных схем / А.Д. Закревский. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
4. Паулин, О.Н. Расширение принципа покрытия при построении универсальных логических модулей на основе симметрических функций [Текст] / О.Н. Паулин / Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 10 (86). – с. 105-110.
5. Паулин, О.Н. Основы теории симметрических булевых функций / О.Н. Паулин – Саабрюкен (Германия): Lambert Academic Publisher, 2013. – 66 с.

6. Паулин, О.Н. О выделении макроопераций из вычислительных процессов сортировки массивов данных [Текст] / О.Н. Паулин, Н.О. Комлевая, С.Ю. Марулин // Проблемы програмування. – 2016. – № 2-3. – С. 87 – 95. (Scopus).
7. Паулин, О.Н. Представление вычислительных процессов сетями Петри [Текст] / О.Н. Паулин, Ю.С. Поляков, В.А. Шульгин // Научные труды SWorld. – 2015. – Вып. 4 (41), Т. 2. – С. 64-70.
8. Паулин, О.Н. Об управлении вычислительными процессами [Текст] / О.Н. Паулин, Н.О. Комлевая, С.Ю. Марулин // Труды XVII МНПК «Современные информационные и электронные технологии», Киев, 2016. – С. 20-21.
9. Паулин, О.Н. О функциональной полноте элементов управления вычислительными процессами [Текст] / О.Н. Паулин // Научные труды SWorld. – 2016. – Вып. 4, Том 4. – С. 4-8.
10. Yang, Y. Phase Distribution of Software Development Effort / Y. Yang, M. He, M. Li, Q. Wang, V. Boehm // International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM), Kaiserslautern, Germany, 2008. – Pp. 384–392.

### ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МОДЕЛІ АЛГОРИТМІВ ПОКРИТТЯ

О.Н. Паулін

Одеський національний політехнічний університет,  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: paolenic@yandex.ua

У статті ставиться і вирішується проблема побудови обчислювальних моделей для класу комбінаторних задач. Практично важливою в цьому класі є задача про покриття, що використовує переборний механізм. Такого роду задачі виникають, наприклад, при необхідності оптимального вибору постачальників при збиранні складного виробу. Обчислювальні процеси розв'язання задачі про покриття мають багато загальних функціонально закінчених компонент, названих нами макроопераціями, які можуть бути виділені як обчислювальні моделі цього процесу. Таке виділення дозволить зібрати бібліотеку макрооперацій для різних класів задач, що спростить і прискорить аналіз програм ще на стадії побудови алгоритмів (обчислювальних процесів). Розглядаються 2 методи і відповідно 2 алгоритми розв'язання задачі про покриття: повного перебору підмножин і граничного перебору по увігнутій множині. Наводяться словесні описи алгоритмів, їх схеми, а також описи і схеми обчислювальних модулів. Виділяються макрооперації як обчислювальні моделі, які частково узагальнюються.

**Ключові слова:** комбінаторні задачі, обчислювальні процеси, обчислювальні моделі, макрооперації, алгоритми покриття, повний перебір, граничний перебір, обчислювальні модулі.

### COMPUTATIONAL MODELS OF COVERAGE ALGORITHMS

O.N. Pauline

Odessa National Polytechnic University,  
av. Shevchenko, 1, Odessa, 65044, Ukraine; e-mail: paolenic@yandex.ua

The article raises and solves the problem of building computational models for a class of combinatorial tasks. Important for practice in this class is the coverage task using mechanism of iterates through of the elements. Such tasks arise, for example, on necessity of optimal selection of suppliers for the assembly of complex products. The computational process of solving the task of the coverage have a lot in common functionally complete component called us macrooperation, which can be picked out as computational models of this process. This detachment will allow to build the library of macrooperations for different classes of tasks, which will simplify and speed up the analysis of programs at the stage of construction of algorithms (computational processes). Discusses 2 method and 2 respectively of algorithm for solving the task of covering: complete iterates through of the subsets and boundary iterates through in the concave set. Given the verbal descriptions of algorithms, their schemes, and descriptions and schemes of the computing modules. Pick out macrooperation as computational models, which are partially summarized.

**Keywords:** combinatorial tasks, computational processes, computational models, macrooperation, the algorithms of cover, full choice iterating through, boundary choice iterating through, compute modules.

# РОЗПОДІЛ ГАРМОНІК НА ДІЛЯНЦІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРИ НАЯВНОСТІ ГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВОК, ЩО ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮТЬ З МЕРЕЖЕЮ

О.В. Бялобржеський, Н.Г. Чередник

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна; e-mail: natali\_alex\_2008@mail.ru

Впровадження когенерації в енергетиці, на підприємствах дозволяє підвищити маневрену потужність, енергобезпеку підприємств. Виникає комплексна задача раціонального використання потужностей когенераційних установок та зовнішньої електричної мережі. У разі наявності в структурі підприємства, або його технологічної ділянки споживачів з нелінійним характером навантаження питання забезпечення якості електричної енергії суттєво загострюється. Мета роботи - розробка моделі ділянки електроспоживання з генеруючою установкою та дослідження показників якості електричної енергії за умови наявності споживачів з нелінійним навантаженням. В системах електроспоживання в останній час широко застосовуються генеруючі установки середньої потужності, які підключається до системи без суттєвої модернізації останньої, що певним чином змінює електроенергетичні процеси та показники їх якості. Раціональне використання генерованих потужностей паралельно із централізованою системою електропостачання за умов наявності декількох агрегатів може бути виконано шляхом використання відомих оптимізаційних методів з урахуванням структури системи електропостачання. Зважаючи на тотальне запровадження напівпровідникових перетворювачів електричної енергії, як засобу її регулювання та перетворення для технологічних потреб, актуальним стає питання обліку та керування показниками якості електричної енергії на ділянках, де використовуються генератори електричної енергії. Шляхом експериментального дослідження в середовищі візуального програмування моделі електроенергетичної системи продемонстровано деякі випадки перерозподілу потоків енергії між генеруючою установкою та трансформатором централізованого електропостачання, та зміну показників спотворення струму зазначених елементів. Відмічено, що характер перерозподілу показників якості відрізняється від характеру поточкорозподілу. Зазначені особливості є причиною для застосування систем технічного обліку електричної енергії та її якості.

**Ключові слова:** когенераційна установка, спотворення електричної енергії, нелінійне навантаження.

## Вступ

Комбіноване вироблення електричної і теплової енергії або когенерація, одна з найбільш ефективних енергозберігаючих технологій. У сучасних когенераційних установок на базі газопоршневих двигунів коефіцієнт використання теплоти згорання палива доходить до 85-90%. Економія палива при виробленні енергії може досягати 40% в порівнянні з роздільним виробництвом тієї ж кількості електроенергії і теплової енергії [1]. Когенераційна установка дозволяє економити на підключенні до електро- та тепломереж, так само забезпечує енергетичну незалежність від збоїв в

електропостачанні і аварій в системах тепlopостачання у разі використання разом з магістральною мережею.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

В Україні виробляють достатньо електроенергії, але вона використовується неефективно. Проблема в тому, що маневреність енергосистем України спадає. Широке впровадження когенерації в енергетиці, на підприємствах дозволить підвищити маневрену потужність, енергобезпеку підприємств. Впровадження когенерації скоротить втрати електроенергії в мережах, які досить великі. З'являються шляхи вирішення "пікових" потужностей [1].

При цьому виникає комплексна задача раціонального використання потужностей когенераційних установок та зовнішньої, зокрема електричної, мережі. Останнім часом енергомережі набувають певної інтелектуалізації, активно розвивається технологія *Smart Grid*, яка інтегрує в єдиний комплекс мережі енергопостачання та комп'ютерні телекомунікаційні мережі, засновані на системах передачі інформації. Головна задача технології полягає в забезпеченні моніторингу та оптимізації витрат енергоресурсів, а також підвищення безпеки функціонування енергомереж [2].

Технологія *Smart Grid* найбільш істотно змінює принципи функціонування енергомереж, пропонуючи нові рішення активної і децентралізованої взаємодії. Сучасні споживачі, що використовують комп'ютерні телекомунікаційні системи для передачі інформації в мережі *Smart Grid*, можуть автоматично вибрати режим роботи найбільш енерговитратного обладнання та власних генеруючих установок протягом тижня, з точністю до години, з урахуванням оптимального комерційного тарифу [2]. Відповідно, енергозбутова компанія, маючи поточні дані про плановане енергоспоживання окремих споживачів, може оптимально конфігурувати свої потужності, наприклад, використовуючи акумулятори електроенергії та активні розподільні пристрої, закупити необхідну електроенергію у мережевого постачальника за оптимальними тарифами і т.д. весь ланцюжок постійно обмінюється інформацією, яка активно використовується керуючими елементами для забезпечення збалансованого графіка споживання/генерації, підтримки якості електричної енергії, безпечної трансформації і передачі. У разі наявності в структурі підприємства, або його технологічної ділянки споживачів з нелінійним характером навантаження питання забезпечення якості електричної енергії суттєво загострюється.

*Метою* роботи є розробка моделі ділянки електроспоживання з малою генеруючою установкою та дослідження показників якості електричної енергії за умови наявності споживачів з нелінійним навантаженням.

### **Виклад основного матеріалу**

Використання когенеруючої установки (установок) в системі електроспоживання підприємства по-перше ставить завдання оптимального розподілу активної потужності. Початковий генеруючий елемент ланцюга кола постійної генерації максимальної кількості електричної енергії видає оптимальну потужність відповідно до реальних балансів потужності/споживання електроенергетичної системи в поточний момент часу [3]. Сумарна потужність генеруючих установок на підприємстві, як правило, не перевищує сумарну споживану потужність. Тому в робочий режим включаються не всі агрегати, а якась їх частина. Однією з основних вимог, що пред'являються до електроенергетичної системи, є економічність її режиму роботи, що відповідає мінімальним витратам на одиницю виробленої електроенергії. У зв'язку з цим постає оптимізаційна задача економічного розподілу активної потужності між окремими

агрегатами в енергетичній системі та зовнішньою мережею. В якості критерію оптимальності приймається мінімум сумарних витрат на енергоносії  $B_{\Sigma}$  при виконанні балансу потужності

$$\sum P_G = \sum P_H + \sum P_{CH} + \Delta P_{\Sigma} = \sum P_{II},$$

де  $\sum P_G$  - сумарна генерована активна потужність;  $\sum P_H$  - сумарна активна потужність споживачів в мережі;  $\sum P_{CH}$  - сумарна потужність власних потреб генеруючої установки;  $\Delta P_{\Sigma}$  - сумарні втрати активної потужності;  $\sum P_{II}$  - сумарне споживання активної потужності.

Задачу оптимального розподілу активної потужності розглядають для когенераційної установки, яка працює паралельно із мережею на виділене навантаження  $\sum P_{II}$ . Вводять [3] питомі витрати на одиницю потужності  $B(P_G)$  когенераційної установки та мережі, які визначають залежність вартості  $B$  від потужності, що видається генератором  $P_G$ . Таким чином функція сумарних витрат, що підлягає оптимізації, матиме вигляд

$$B_{\Sigma} = \sum_{I=1}^n B_I(P_{GI}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Мінімум функції шукається за умови виконання балансу активної потужності. Цю умову записують у вигляді

$$\sum_{I=1}^n P_{GI} - \sum P_{II} = 0. \quad (2)$$

Для цільової функції (1) і балансу активної потужності (2) записують функцію Лагранжа і замість умовного мінімуму цільової функції шукають безумовний мінімум функції Лагранжа

$$L = \sum_{I=1}^n B_I(P_{GI}) + \lambda \left( \sum_{I=1}^n P_{GI} - \sum P_{II} \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – невизначений множник Лагранжа.

Мінімум функції Лагранжа досягається при рівності нулю її похідних по всім змінним, тобто при умовах

$$\begin{aligned} \partial L / \partial P_{GI} &= \partial B_I / \partial P_{GI} + \lambda = 0, \\ \partial L / \partial P_{II} &= \partial B_{II} / \partial P_{II} + \lambda = 0, \\ \partial L / \partial \lambda &= \left( \sum_{I=1}^n P_{GI} - \sum P_{II} \right) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

З рівнянь (4) видно, що шуканому рішенню відповідає умова рівності між собою похідних

$$\partial B_I / \partial P_{GI} = \dots = \partial B_I / \partial P_{GI} = \dots = \partial B_{II} / \partial P_{II} = -\lambda = \text{const}.$$

Ці похідні називають відносними приростами  $\varepsilon_I$  ( $I = 1, 2, \dots, n$ ). Оптимальний розподіл активної потужності між когенераційною установкою, та мережею як

показано в [4], здійснюється при рівності відносних приростів витрат на енергоносії, що може бути закладене в алгоритм регулювання за активною потужністю генератора когенераційної установки, за умов реалізації технології *Smart Grid*.

Економічність режиму роботи енергетичної системи визначається не тільки сумарною витратою на енергоносії, але і втратами потужності в електричних мережах. Втрати активної потужності в мережах залежать від перетоків по ним потужностей, пов'язаних з розподілом сумарного навантаження між окремими джерелами. Чим довші і завантажені лінії зв'язку підприємства, тим сильніший вплив втрат потужності в мережі на економічний режим роботи системи електропостачання і тим відчутніші поправки до розподілу потужностей між когенераційною установкою та зовнішньою системою електропостачання. Таким чином, питання про економічний розподіл активної потужності слід вирішувати з урахуванням ряду додаткових умов, що характеризують роботу конкретної системи електропостачання [3].

Електричну мережу промислового підприємства характеризують не тільки великою кількістю вузлів і гілок, а і наявністю замкнутих контурів з загальними гілками. Потокорозподіл в гілках складної мережі залежить не тільки від навантажень, але і від параметрів гілок мережі. Додаткові труднощі у визначенні параметрів сталих режимів вносить нелінійний характер навантажень. Вводячи балансуєчий по струму (потужності) вузол, у якості якого може бути прийнятий будь-який вузол, за законами Кірхгофа складають рівняння для інших вузлів мережі. Для мережі змінного струму провідності всіх гілок, що задають струми джерел і навантажень, шукані напруги і струми гілок вважають величинами комплексними. Напруга в базисному вузлі задають, як правило, дійсним числом.

З урахуванням зазначеної систему рівнянь вузлових напруг для мережі змінного струму розглядають [5] в матричній формі запису

$$\dot{Y}\dot{U} = \dot{J} - \dot{Y}_o U_o,$$

де  $\dot{Y} = G - jB$  - матриця власних і взаємних провідностей;  $\dot{U} = U^* + jU^{**}$  - вектор-стовпчик напруг в вузлах;  $\dot{J} = J^* + jJ^{**}$  - вектор-стовпчик струмів у вузлах;  $\dot{Y}_o U_o$  - вектор-стовпчик добутку базисної напруги на взаємні провідності між базисним вузлом і іншими вузлами  $\dot{Y}_o = G_o - jB_o$ .

В результаті отримують

$$(G - jB)(U^* + jU^{**}) = (J^* + jJ^{**}) - (G_o - jB_o)U_o.$$

Розділивши в останньому матричному рівнянні дійсні та уявні частини, переходять до системи лінійних алгебраїчних рівнянь порядку  $2(N-1)$  з дійсними елементами

$$\begin{cases} GU^* + B_y U^{**} = J^* - G_o U_o; \\ -BU^{**} + GU^{**} = J^{**} - B_o U_o. \end{cases}$$

В загальному випадку наведений розрахунок є розрахунком складно замкненої схеми в якій протікають струми та діють напруги, що гармонійно змінюються з частотою 50Гц. Реальна електрична мережа і система електропостачання підприємства є електромагнітним середовищем, в якому відбувається генерування, поширення та вплив електромагнітних завад електроприймачами, що певним чином діють на інші електроприймачі. Виникає завдання їх електромагнітної сумісності, під якою розуміється здатність електрообладнання, апаратів і приладів нормально

функціонувати в електромагнітному середовищі, не створюючи неприпустимих перешкод для іншого обладнання, яке функціонує в тому ж середовищі [4].

Допустимі величини напруг вищих гармонік в мережах загального призначення для різних номінальних напруг визначаються стандартами якості електричної енергії. У стандартах регламентуються коефіцієнти спотворення синусоїдальності напруги і струму  $K_U$ ,  $K_I$  і коефіцієнти вищих гармонік  $K_{U(n)}$ ,  $K_{I(n)}$  [3]. Виконання вимог національного стандарту до якості електричної енергії є обов'язковим для всіх мереж загального призначення.

Розподіл та транспорт електричної енергії на території промислових підприємств здійснюється мережами низької та середньої напруги. До цих мереж підключено велику кількість дрібних споживачів енергії, в тому числі і таких, що спотворюють потужність потоку енергії - електротранспорт, верстати з регулюванням швидкості обертання, тиристорно-регульовані електроприводи технологічних механізмів і інші об'єкти. Для мереж цього класу характерні високі рівні вищих гармонік, значна кількість навантажень і наявність пристроїв по забезпеченню якості електричної енергії, пов'язаних з вищими гармоніками напруги [5].

Як показано в [6] якщо джерелом гармонік є перетворювач, можна використовувати спрощені формули, при яких враховуються тільки гармоніки до 13-ї включно. Частотні характеристики розподільної мережі і енергосистеми приймаються лінійними, що дозволяє певною мірою врахувати зростання коефіцієнту спотворення синусоїдальності  $K_I$  за рахунок гармонік  $\nu < 13$ .

При резонансі струмів у вузлі мережі з боку вищої напруги на частоті  $\nu$ -ї гармоніки опір мережі виявляється чисто активним. У цьому випадку найбільше значення коефіцієнта несинусоїдальності за [6]

$$K_I^{(\max)} = \frac{1}{k_R} \sqrt{\sum_{\nu=2}^n [I_{\nu\Sigma^*} \nu \sqrt{\nu}]^2},$$

де  $k_R = \frac{R_k}{X_k}$ ,  $R_k$ ,  $X_k$  - еквівалентні активний і індуктивний опори короткого замикання у вузлі;  $I_{\nu\Sigma^*}$  - відносне значення сумарного струму  $\nu$ -ї гармоніки джерел;  $\nu$  - номер останньої з врахованих гармонік.

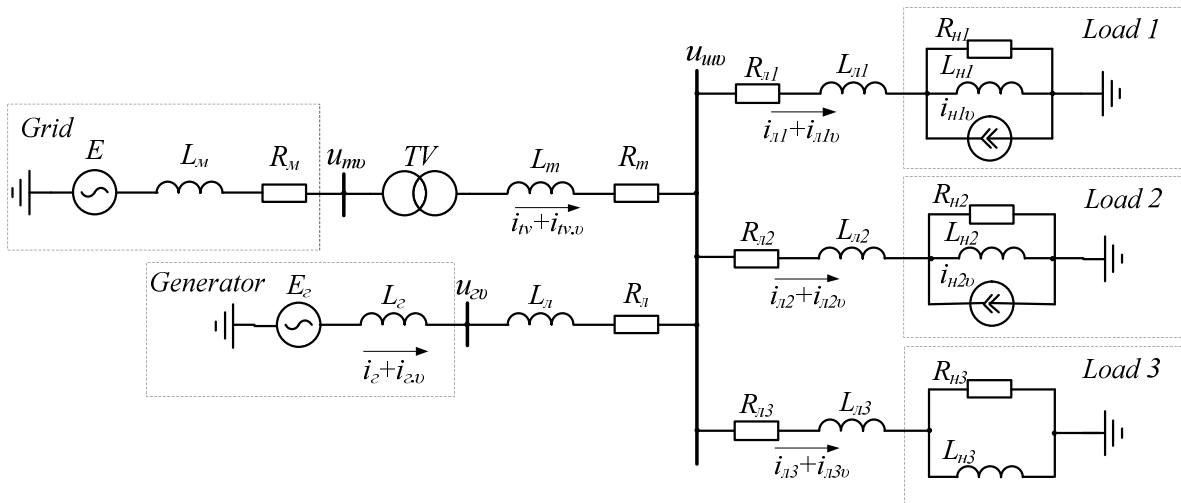
Відносне значення струму  $\nu$ -ї гармоніки кожного джерела беруть в частках відповідного номінального струму. Підсумовування гармонік струму одного порядку, що генеруються окремими джерелами, здійснюється з урахуванням початкових фаз. Значення  $K_I^{(\max)}$  будуть практично однакові як у вузлі мережі енергосистеми, так і на шинах 6-10 кВ підприємства. Останнє пояснюють [6] тим, що при резонансі струмів на частоті гармонік через трансформатор зв'язку проходить дуже малий струм, яким можна знехтувати, і відповідним падінням напруги теж. Але якщо одна з обмоток трансформатора з'єднана в трикутник, то відповідне припущення перестає бути дійсним.

Якщо до шин підстанції 6-10 кВ підключене лінійне навантаження, опір якого на частотах вищих гармонік  $X_{\nu\ell}$  то

$$K_U^{(\max)} = \frac{\sqrt{3 \sum_{\nu=2}^n [I_{\nu\Sigma^*}^{(\max)} X_{\nu\ell}]^2}}{U_{\text{ном}}}.$$

## Результати

Аналітичний розрахунок показників якості електричної енергії у вузлах електричної мережі з генеруючими установками середньої та малої потужності є досить складним. Складність зумовлена наявністю автоматичних регуляторів в структурі системи управління генеруючою установкою, окрім того постійна зміна режиму роботи технологічного обладнання збільшує кількість еквівалентних електричних схем заміщення для відповідного режиму. Таким чином, в роботі виконано моделювання режимів електроенергетичної системи, яка певною мірою є еквівалентом системи електроспоживання малого промислового підприємства [6]. Аналітичний метод розрахунку за системою (1), базується на рівняннях певної електричної схеми, складених за законами Кірхгофа. Для аналізу складено спрощену схему електричної мережі підприємства - рисунок 1. Синхронний генератор (*Generator*) когенераційної установки залежно від часу підключається паралельно до електричної мережі (*Grid*) в якій наявні група трифазних споживачів (*LOAD 3*) з лінійним характером навантаження та двох груп споживачів, які еквівалентизують тиристорні випрямлячі з активно-індуктивним навантаженням (*LOAD 1*) та входні схеми частотних перетворювачів – випрямляч з активно ємнісним навантаженням (*LOAD 2*).

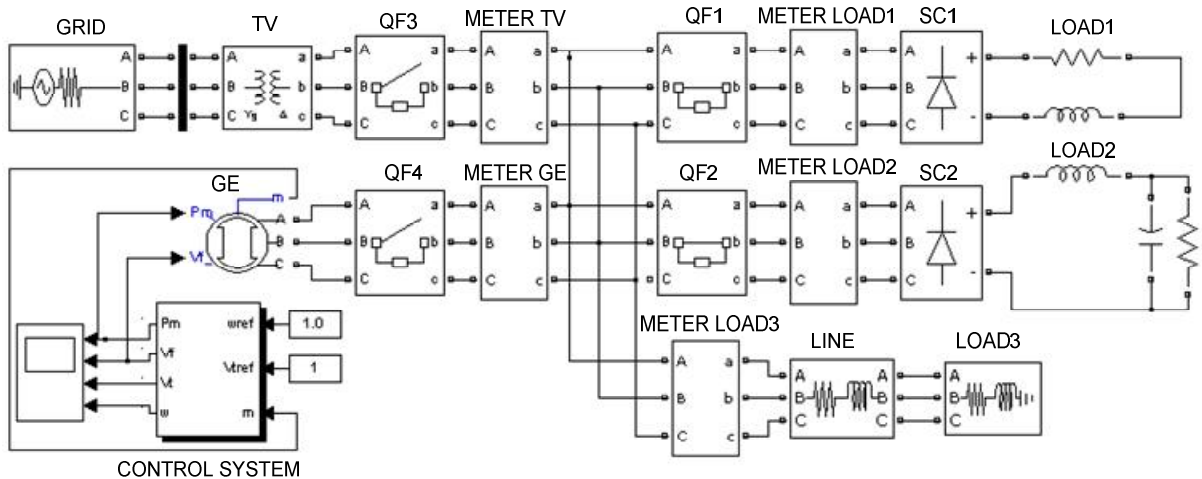


**Рис.1.** Спрощена схема електричної мережі підприємства

Перетворювач для мережі живлення є нелінійним навантаженням, що генерує певний спектр гармонік струму. Проте реальні мережі мають власний опір і обмежену потужність. Внаслідок цього відбувається викривлення форми напруги, що впливає через мережу на роботу інших споживачів, а також і на сам перетворювач через його систему керування.

Для дослідження впливу вищих гармонік на процеси розподілу електричної енергії в системі електроспоживання за схемою (рис.1) у середовищі візуального програмування побудована імітаційна модель (рис.2).

Схема включає: *GRID* - джерело живлення; *TV* - трансформатор типу ТМ/400/10 потужністю 400 кВА; *GE* – синхронний генератор потужністю 315 кВт; *LOAD1*, *LOAD2* – гілки трифазного навантаження з тиристорними випрямлячами; *LOAD3* – трифазне навантаження. Параметри елементів схеми обрано наступними: *LOAD1* ( $P=46$  кВт,  $Q=26$  кВАр), *LOAD2* ( $P=41$ кВт,  $Q=23$  кВАр), *LOAD3* ( $P=185$  кВт,  $Q=68$  кВАр).



**Рис.2.** Модель схеми вузла системи електроспоживання підприємства

Проведено п'ять експериментів з дослідження розподілу вищих гармонік в мережі при конфігурації моделі:

Ехр 1 – паралельна робота мережі і генератора на 3 групи споживачів;

Ехр 2 – паралельна робота мережі і генератора з ввімкненими гілками *LOAD1* і *LOAD3*;

Ехр 3 – паралельна робота мережі і генератора з ввімкненими гілками *LOAD2* і *LOAD3*;

Ехр 4 – робота мережі на 3 групи споживачів без використання генеруючої установки;

Ехр 5 – автономна робота генеруючої установки на 3 групи споживачів.

Коли говорять про гармоніки в електромережі, то в першу чергу мають на увазі гармоніки струму. Ніякий корисний висновок неможливо зробити без аналізу спектру гармонік фактичного сигналу, але все ще загальноприйнятим є визначення значення сумарних гармонійних спотворень. Коли гармоніки поширюються по мережі електропередачі, тобто по відгалуженням, що не призначені для передачі струмів гармонік, то вони проявляються як гармоніки напруги. Для визначення показників електроспоживання, викривлення струму та напруги у контрольованому вузлі використано вимірювальну систему приведену на рис.3.

Визначення параметрів виконується за відомими [7] виразами коефіцієнту загальних гармонійних спотворень:

$$THD(f) = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1},$$

де  $U_1$  – діюче значення напруги основної (першої) гармоніки;  $U_2, U_3, \dots$  - діюче значення напруги другої та, відповідно, вищих гармонік.

Активна потужність визначається скалярним добутком напруги та струму в кожній фазі

$$p = \langle u_a i_a \rangle + \langle u_b i_b \rangle + \langle u_c i_c \rangle.$$

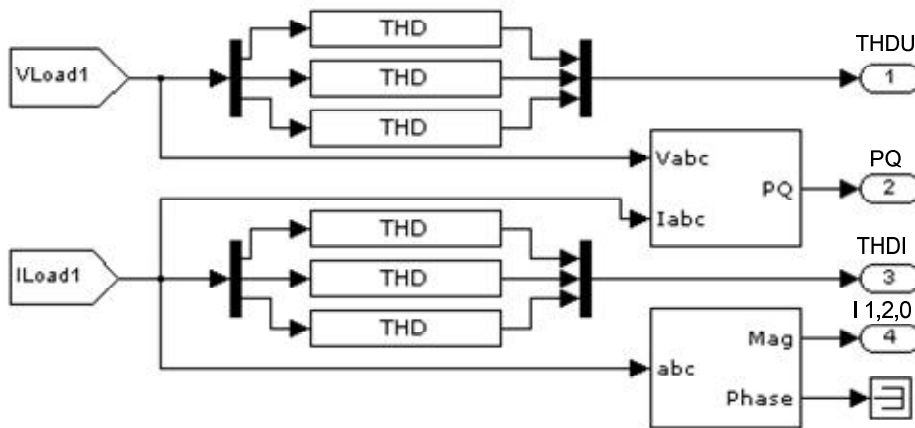
Реактивна потужність визначається векторним добутком струму та напруги в кожній фазі

$$q = (u_a \times i_a) + (u_b \times i_b) + (u_c \times i_c).$$

Зважаючи на можливість виникнення складових струму зворотної послідовності, що впливає на роботу генератора, визначаються струми прямої, зворотної та нульової послідовностей

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha \dot{I}_b + \alpha^2 \dot{I}_c); \quad \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_b + \alpha \dot{I}_c); \quad \dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c),$$

де  $\dot{I} = |i|e^{j \arg(i)}$  - комплекс струму.



**Рис.3.** Вимірвальна система досліджуваних параметрів

На рис.4 наведено фрагменти діаграм струму та напруги генератора та трансформатора для експерименту № 1. Зведені результати показників напруги та струмів прямої та зворотної послідовностей, активної та реактивної потужностей та коефіцієнти спотворень представлені для кожного з експериментів у табл.1.

Аналізуючи чисельні данні наведені у таблиці 1 слід відзначити загальну нерівномірність розподілу нелінійних спотворень струму, і як наслідок напруги в генеруючих елементах електроенергетичної системи. Зокрема порівнюючи спотворення струму синхронного генератора відмічено суттєве збільшення рівня спотворення струму та напруги в п'ятому експерименті, за умов відключення силового трансформатора. Але цей рівень спотворень не відповідає рівню спотворень струму трансформатора в четвертому експерименті при відключеному генераторі, що вочевидь пояснюється різницею параметрів схем заміщення зазначених елементів. Також слід зазначити, що у разі паралельної роботи генератора та трансформатора рівень спотворення струму останнього в перших трьох експериментах залишався суттєво більшим, що, вірогідно, пояснюється непропорційним завантаженням генератора і трансформатора струмом та потужністю. Значення потужності перерозподіляються між трансформатором та генератором за умов зміни не тільки величини а й характеру навантаження. В досліджуваних випадках складові зворотної послідовності не перевищують одного відсотка від складових прямої послідовності, у зв'язку з чим до уваги не приймаються.

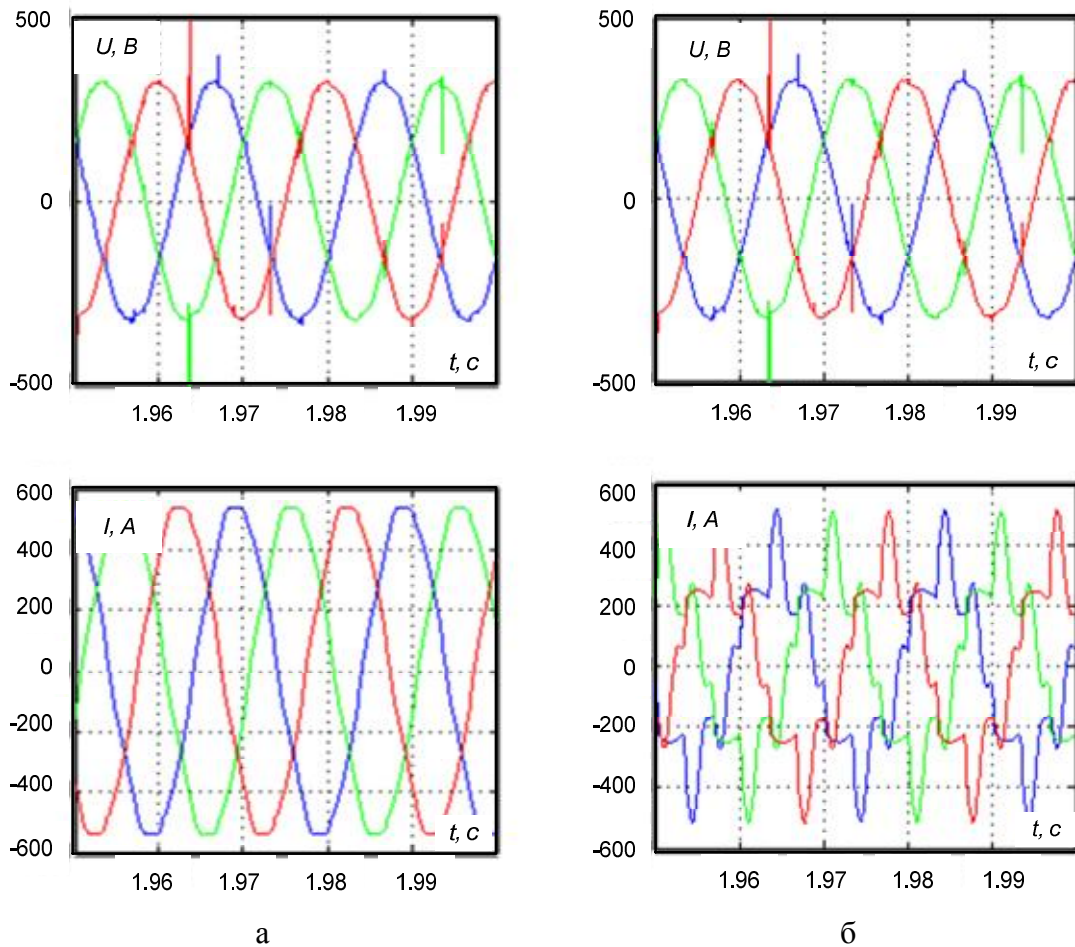


Рис.4. Напряга та струм: а – генератора, б – трансформатора

Таблиця 1.

Зведені результати вимірювань

Елемент	Параметри	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5
GE	$U_1, B$	372.2	372.5	372.1		352.53
	$U_2, B$	0.07347	0.08455	0.06302		0.2981
	$I_1, A$	535.2	471.9	490.7		652.5
	$I_2, A$	0.1599	0.1118	0.1348		0.6597
	$P, Bm$	182900	184700	178200		329200
	$Q, VA\rho$	188800	144700	158700		102200
	$THD_{I_a}, \text{в.о.}$	0.03118	0.008913	0.029		0.1392
	$THD_{I_b}, \text{в.о.}$	0.03101	0.009062	0.02886		0.1399
	$THD_{I_c}, \text{в.о.}$	0.03098	0.009199	0.02904		0.1402
	$THD_{U_a}, \text{в.о.}$	0.04632	0.02013	0.02221		0.1159
	$THD_{U_b}, \text{в.о.}$	0.04767	0.01803	0.0222		0.117
$THD_{U_c}, \text{в.о.}$	0.04485	0.01872	0.02194		0.1181	
TV	$I_1, A$	345.1	180.8	244.7	632.5	
	$I_2, A$	0.346	0.243	0.157	0.459	
	$P, Bm$	83020	42750	41260	25100	
	$Q, VA\rho$	-73950	-53500	-69310	10960	
	$THD_{I_a}, \text{в.о.}$	0.3277	0.1551	0.3955	0.2019	
	$THD_{I_b}, \text{в.о.}$	0.3273	0.158	0.3961	0.2021	
	$THD_{I_c}, \text{в.о.}$	0.328	0.1549	0.396	0.2034	

Продовження табл.1

Елемент	Параметри	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5
LOAD 1	$I_1, A$	112.6	112.9		109.9	110.5
	$I_2, A$	0.0962	0.1791		0.1212	0.0873
	$THD_{I_a, в.о.}$	0.2898	0.2929		0.2869	0.2668
	$THD_{I_b, в.о.}$	0.289	0.2951		0.2855	0.2665
	$THD_{I_c, в.о.}$	0.2884	0.2942		0.2853	0.267
LOAD 2	$I_1, A$	161.5		162.3	158.1	160
	$I_2, A$	0.1192		0.02558	0.2937	0.3584
	$THD_{I_a, в.о.}$	0.7276		0.7028	0.7415	0.5811
	$THD_{I_b, в.о.}$	0.7278		0.7026	0.7427	0.5835
	$THD_{I_c, в.о.}$	0.7244		0.703	0.7479	0.584

## Висновки

В системах електроспоживання в останній час широко застосовуються генеруючі установки середньої потужності, які підключається до системи без суттєвої модернізації останньої, що певним чином змінює електроенергетичні процеси та показники їх якості.

Раціональне використання генерованих потужностей паралельно із централізованою системою електропостачання за умов наявності декількох агрегатів може бути виконано шляхом використання відомих оптимізаційних методів з урахуванням структури системи електропостачання.

Зважаючи на тотальне запровадження напівпровідникових перетворювачів електричної енергії, як засобу її регулювання та перетворення для технологічних потреб, актуальним стає питання обліку та керування показниками якості електричної енергії на ділянках, де використовуються генератори електричної енергії.

Шляхом експериментального дослідження в середовищі візуального програмування моделі електроенергетичної системи продемонстровано деякі випадки перерозподілу потоків енергії між генеруючою установкою та трансформатором централізованого електропостачання, та зміну показників спотворення струму зазначених елементів. Відмічено, що характер парозподілу показників якості відрізняється від характеру поточорозподілу. Зазначені особливості є причиною для застосування систем технічного обліку електричної енергії та її якості.

## Список літератури

1. Практическое руководство по повышению энергоэффективности муниципальных систем. Под редакцией А.С. Копеца и Р.В. Кишканя – Донецк, 2007. – 204 с.
2. Лунтовский, А.О. Использование технологии SMART GRID для повышения эффективности энергосетей / А.О. Лунтовский, А.И. Семенко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №2 (30). – С. 21-26.
3. Костин, В.Н. Передача и распределение электроэнергетики. Учебное пособие / В.Н. Костин, Е.В. Распопов, Е.А. Радченко. – Санкт-Петербург, 2003. – 147 с.
4. Смирнов, С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения. – Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с.
5. Жежеленко, И.В. Расчеты показателей электромагнитной совместимости. / И.В. Жежеленко, Г.Г. Пивняк, Ю.В. Папаика. – Д.: НГУ, 2014. – 113 с.
6. Чередник, Н.Г. Дослідження режиму синхронного генератора когенераційної установки у складі системи електропостачання малого промислового підприємства / Н.Г. Чередник, О.В. Бялобржеський // Науково-техн. збірник Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. – Вип. 94. – С. 139-145.

7. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИК НА УЧАСТКЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК, РАБОТАЮЩИХ ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ

А.В. Бялобржеский, Н.Г. Чередник

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина; e-mail: natali\_alex\_2008@mail.ru

Внедрение когенерации в энергетике, на предприятиях позволяет повысить маневренную мощность, энергобезопасность предприятий. Возникает комплексная задача рационального использования мощностей когенерационных установок и внешней электрической сети. При наличии в структуре предприятия, или его технологического участка потребителей с нелинейным характером нагрузки вопрос качества электрической энергии существенно обостряется. Цель работы - разработка модели участка электропотребления с генерирующей установкой и исследования показателей качества электрической энергии при наличии потребителей с нелинейной нагрузкой. В системах электроснабжения в последнее время широко применяются генерирующие установки средней мощности, которые подключаются к системе без существенной модернизации последней, что определенным образом меняет электроэнергетические процессы и показатели их качества. Рациональное использование генерируемых мощностей параллельно с централизованной системой электроснабжения при условии наличия нескольких агрегатов может быть выполнено путем использования известных оптимизационных методов с учетом структуры системы электроснабжения. Несмотря на тотальное введение полупроводниковых преобразователей электрической энергии, как средства ее регулирования и преобразования для технологических нужд, актуальным становится вопрос учета и управления показателями качества электрической энергии на участках, где используются генераторы электрической энергии. Путем экспериментального исследования в среде визуального программирования модели электроэнергетической системы продемонстрированы некоторые случаи перераспределения потоков энергии между генерирующей установкой и трансформатором централизованного электроснабжения, и изменение показателей искажения тока указанных элементов. Отмечено, что характер перераспределения показателей качества отличается от характера потокораспределения. Указанные особенности являются причиной для применения систем технического учета электрической энергии и ее качества.

**Ключевые слова:** когенерационная установка, искажения электрической энергии, нелинейная нагрузка.

**DISTRIBUTION OF HARMONICS ON POWER CONSUMPTION SECTION IN THE PRESENCE OF GENERATING UNITS THAT WORK IN PARALLEL WITH THE NETWORK**

O. Bialobrzheskyi, N. Cherednyk

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,  
20, Pershotravneva str., Kremenchuk, 39600, Ukraine; e-mail: natali\_alex\_2008@mail.ru

The introduction of co-generation in the energy sector, can improve maneuverable power, energy security at the enterprises. There is a complex problem of rational use of cogeneration units and external power network. In the presence in the structure of the enterprise, or the technological area of consumers with non-linear nature of the load a question of quality of electric energy significantly exacerbated. Purpose of the work - to develop a model of the site with electricity-generating installation and research indicators of quality of electric energy in the presence of customers with non-linear load. The power supply systems in recent years is widely used medium power generating units, which are connected to the system without a substantial modernization, that in a certain way changes the power generation processes and indicators of quality. The rational use of the generated power along with a centralized power system subject to the availability of several units can be performed by using known optimization methods based on power system structure. Despite the total introduction of a semiconductor converters of electric energy, as a means of its regulation and transformation for technological needs, the question becomes relevant accounting and management indicators of quality of electric energy in areas where generators of electricity used. Through experimental research in the environment of visual programming model of the electric power system demonstrated some cases of redistribution of energy flows between the generating set and transformer centralized power, and change the current parameters of distortion of these elements. It is noted that the nature of indicators of quality of redistribution is different from the nature of flow distribution. These features are the reason for the application of technical accounting of electric energy and its quality systems.

**Keywords:** cogeneration plant, the distortion of electricity, non-linear load.

**ІНФОРМАТИКА ТА МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ В МОДЕЛЮВАННІ**

Том 6, номер 4, 2016. Одеса – 99 с., іл.

**ИНФОРМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ**

Том 6, номер 4, 2016. Одесса – 99 с., ил.

**INFORMATICS AND MATHEMATICAL METHODS IN SIMULATION**

Volume 6, No. 4, 2016. Odesa – 99 p.

---

**Засновник:** Одеський національний політехнічний університет

Зареєстровано Міністерством юстиції України 04.04.2011р.

Свідоцтво: серія КВ № 17610 - 6460Р

Друкується за рішенням Вченої ради Одеського національного політехнічного університету (протокол №1 від 06.09.2016)

**Адреса редакції:** Одеський національний політехнічний університет,  
проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044 Україна

Web: <http://www.immm.opu.ua>

E-mail: [immm.ukraine@gmail.com](mailto:immm.ukraine@gmail.com)

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали

© Одеський національний політехнічний університет, 2016