

УДК 004.942

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261021.76.804

## ЗАСТОСУВАННЯ ОФІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО РЕЗЕРВУВАННЯ СИСТЕМ

НАСОНОВА С. С., канд. техн. наук, доц.

Кафедра економічної та інформаційної безпеки, Державний вищий навчальний заклад «Дніпропетровський державний університет внутрішніх справ», пр. Гагаріна, 26, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 940-98-56, e-mail: [ms.nasonova.s@gmail.com](mailto:ms.nasonova.s@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7228-7499

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Задачі оптимального резервування систем, як правило, формуються у вигляді нелінійної задачі математичного програмування з цілочисловними змінними, а для їх розв'язання зазвичай застосовуються різноманітні методи оптимізації, що потребує розроблення спеціальних алгоритмів і відповідного програмного забезпечення. Але в разі уточнення вихідної задачі оптимального резервування часто виникає необхідність у корегуванні розроблених алгоритмів та програмного забезпечення. Усе це значно ускладнює отримання шуканих результатів. Іншим підходом до розв'язання задач оптимального резервування систем стало використання офісних інформаційних технологій, інструментальне середовище яких адаптоване для розв'язання математичних задач, у тому числі задач оптимізації. Такий підхід не вимагає розроблення спеціальних алгоритмів та програмного забезпечення. Проте питання, пов'язані з результативністю використовуваної інформаційної технології для розв'язання поставленої задачі, вимагають подальшого наукового і практичного опрацювання. У статті сформульовано модель оптимального проектування резервованих систем за критерієм мінімальної вартості при забезпеченні необхідного рівня надійності протягом заданого напрацювання. Числова реалізація цієї моделі здійснена в операційному середовищі табличного процесора Excel для випадку 6-елементного основного об'єкта. Отримано оптимальні варіанти резервування цього об'єкта за схемами «гарячого» і «холодного» резервування. *Мета статті* – показати результативність та ефективність табличного процесора MS Excel для розв'язання задач оптимального резервування систем. *Висновки.* Розглянуто питання, пов'язані з проблемою оптимального проектування резервованих систем в інструментальному середовищі табличного процесора MS Excel. На прикладах розв'язання задач роздільного «гарячого» і роздільного «холодного» резервування 6-елементного об'єкта доведено результативність і ефективність MS Excel для вирішення цієї проблеми. Крім того, розроблена оптимізаційна модель може успішно використовуватися в практичних задачах забезпечення надійності технічних систем на ранніх стадіях їх проектування.

**Ключові слова:** офісні інформаційні технології; резервована система; задачі оптимізації; вартість; надійність

## APPLICATION OF OFFICE INFORMATION TECHNOLOGIES TO SOLVE THE PROBLEMS OF OPTIMAL STRUCTURAL RESERVATION OF SYSTEMS

NASONOVA S.S., PhD, Assoc. Prof.

Department of Economic and Information Security, State Higher Educational Institution "Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs", 26, Naharina Ave., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 940-98-56, e-mail: [ms.nasonova.s@gmail.com](mailto:ms.nasonova.s@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7228-7499

**Abstract. Problem statement.** The problems of optimal structural redundancy of systems are usually formulated as a nonlinear problem of mathematical programming with integer variables, and to solve them, usually, various optimization methods are used, which requires the development of special algorithms and appropriate software. However, in the case of clarifying the original task of optimal redundancy, there is often a need to adjust the developed algorithms and software. All this greatly complicates obtaining the desired results. Another approach to solving problems of optimal redundancy of systems is the use of office information technology, the tool environment of which is adapted to solve mathematical problems, including optimization problems. This approach does not require the development of special algorithms and software. However, issues related to the effectiveness of the information technology used to solve this problem require further scientific and practical study. This article formulates a model of

optimal design of redundant systems according to the criterion of minimum cost while ensuring the required level of reliability during a given time. This model is written in terms of a nonlinear problem of mathematical programming with integer variables and is numerically implemented in the operating environment of an Excel spreadsheet when the main object of the designed system consists of 6 elements. The optimal options for reserving this object according to the schemes of "hot" and "cold" redundancy are obtained. *The purpose of the article* is to show the effectiveness and efficiency of the MS Excel spreadsheet to solve problems of optimal structural redundancy of systems. *Conclusions.* This article discusses issues related to the problem of solving problems of optimal design of redundant systems in the tool environment of the MS Excel spreadsheet. Examples of solving the problems of separate "hot" and separate "cold" redundancy of a 6-element object prove the effectiveness and efficiency of the MS Excel spreadsheet to solve this problem. In addition, the developed optimization model can be successfully used in practical tasks to ensure the reliability of technical systems in the early stages of their design.

**Keywords:** *office information technologies; redundant system; optimization problems; price; reliability*

**Постановка проблеми.** Задачі оптимального структурного резервування систем, як правило, формуються у вигляді нелінійної задачі математичного програмування з цілочисловими змінними, а для їх розв'язання зазвичай застосовуються різноманітні методи оптимізації, що пов'язано з розробленням спеціальних алгоритмів і відповідного програмного забезпечення. Але в разі уточнення вихідної задачі оптимального резервування часто виникає необхідність у корегуванні розроблених алгоритмів та програмного забезпечення. Усе це значно ускладнює отримання шуканих результатів.

Інший підхід до розв'язання задач оптимального резервування систем полягає у використанні офісних інформаційних технологій, інструментальне середовище яких адаптоване для розв'язання математичних задач, у тому числі задач оптимізації. Такий підхід не вимагає розроблення спеціальних алгоритмів та програмного забезпечення. Проте питання, пов'язані з результативністю використовуваної інформаційної технології для розв'язання поставленої задачі вимагають подальшого наукового і практичного опрацювання.

У статті сформульовано модель оптимального проектування резервованих систем за критерієм мінімальної вартості при забезпеченні необхідного рівня надійності протягом заданого напруцювання. Ця модель записана в термінах нелінійної задачі математичного програмування з цілочисловими змінними і числово реалізована в операційному

середовищі табличного процесора Excel, коли основний об'єкт проекрованої системи складається з 6 елементів. Отримано оптимальні варіанти резервування цього об'єкта за схемами «гарячого» і «холодного» резервування.

**Аналіз публікацій.** Як зазначено в [1; 5; 9], недостатня проектна надійність технічних систем викликає значне збільшення частки експлуатаційних витрат у загальних витратах на їх проектування, виготовлення і застосування. Тому надійність технічних систем повинна забезпечуватися, насамперед, на етапі їх проектування. Відповідно до [2], одним з основних методів підвищення надійності технічних систем на етапі проектування виступає метод структурного резервування, що передбачає використання в системі надлишкових (резервних) елементів.

У разі структурного резервування завжди виникає питання прийняття оптимального рішення, оскільки, з одного боку, бажано забезпечити якомога більший рівень надійності системи, а, з іншого, немає сенсу проектувати систему з дуже великою вартістю, масою або габаритами. Тому в прикладних задачах структурного резервування зазвичай необхідно вирішити, якими повинні бути складові резервованої системи, щоб за мінімальних витрат забезпечити її безвідмовну роботу із заданим рівнем надійності або за обмеження вартості забезпечити максимально можливе підвищення надійності [7; 8].

Аналіз публікацій [3; 4; 6–8] показує, що проблема застосування офісних інформаційних технологій, інструментальне

середовище яких адаптоване до розв'язання задач оптимізації, для числової реалізації моделей оптимального резервування систем вивчена мало. Тому питання, пов'язані з результативністю та ефективністю використовуваної інформаційної технології для розв'язання поставленої задачі оптимального резервування, вимагають подальшого наукового і практичного опрацювання.

**Мета і завдання дослідження.** Мета статті – показати результативність та ефективність табличного процесора MS Excel для розв'язання задач оптимального резервування систем.

Відповідно до мети ставляться такі завдання:

1. Розробити модель оптимального структурного резервування систем за критерієм мінімуму їх вартості при забезпеченні необхідного рівня надійності протягом заданого напрацювання.

2. Використовуючи можливості інструментального середовища MS Excel, провести числові розрахунки за цією моделлю для випадків оптимального резервування  $n$ -елементного об'єкта за схемами «гарячого» та «холодного» роздільного резервування.

**Результати досліджень.** На етапі формалізації задачі оптимального структурного резервування основний об'єкт будемо розглядати як систему, що складається з  $n$  різних елементів, з'єднаних логічно послідовно. Логічне рівняння безвідмовності такої системи має вигляд

$$y = x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n,$$

де  $y$  – бінарна змінна, яка дорівнює 1, якщо система працездатна, і  $y = 0$ , якщо система непрацездатна;  $x_i$  – бінарна змінна, яка дорівнює 1, якщо  $i$ -й елемент системи працездатний, і  $x_i = 0$ , якщо  $i$ -й елемент системи непрацездатний.

Рівень надійності резервованої системи оцінюється імовірністю її безвідмовної роботи. Приймається, що потік відмов елементів, включених у роботу, описується потоком Пуассона [1]. Можливі варіанти

резервування основного об'єкта обмежуються розглядом типових схем роздільного «гарячого» резервування (рис. 1) і роздільного «холодного» резервування з цілою кратністю при ідеальному перемикачі (рис. 2).

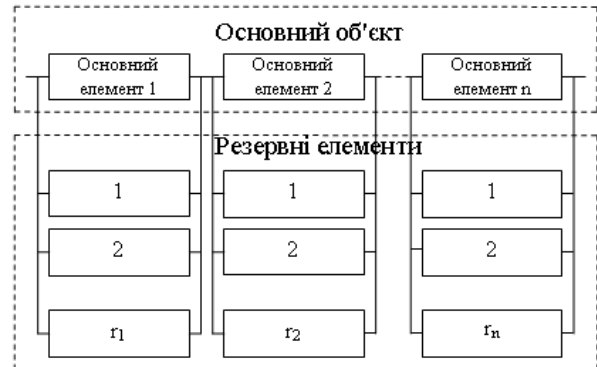


Рис. 1. Структурна схема надійності за схемою роздільного «гарячого» резервування

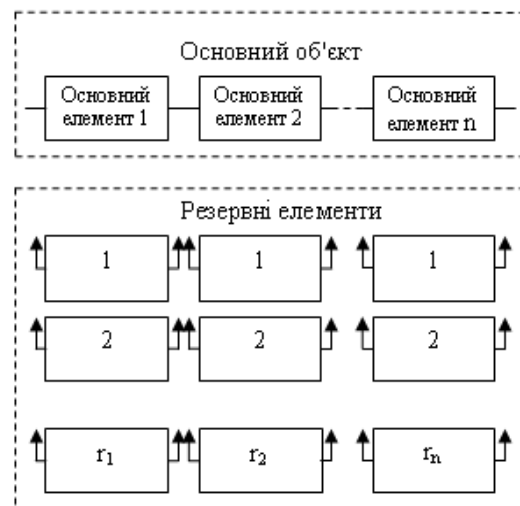


Рис. 2. Структурна схема надійності за схемою роздільного «холодного» резервування

Задача оптимального структурного резервування систем може бути записана у вигляді такої оптимізаційної моделі:

$$C_s(r_1, r_2, \dots, r_n) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$P_s(r_1, r_2, \dots, r_n, t) \geq P^*, \quad (2)$$

де  $C_s(r_1, r_2, \dots, r_n)$  – вартість резервованої системи:

$$C_s(r_1, r_2, \dots, r_n) = \sum_{k=1}^n C_k(r_k); \quad (3)$$

$C_k(r_k)$  – вартість  $k$ -ї резервованої групи елементів:

$$C_k(r_k) = g_k r_k; \quad (4)$$

$g_k$  – вартість одного елемента  $k$ -го типу;  
 $r_k$  – кратність резервування основного елемента  $k$ -го типу;  $P^*$  – необхідний (гарантований) рівень надійності системи протягом заданого напрацювання  $t$ ;  
 $P_s(r_1, r_2, \dots, r_n, t)$  – імовірність безвідмовної роботи резервованої системи при напрацюванні  $t$ , яка відповідно до правила множення ймовірностей обчислюється за формулою:

$$P_s(r_1, r_2, \dots, r_n, t) = \prod_{k=1}^n P_k(r_k, t), \quad (5)$$

де  $P_k(r_k, t)$  – імовірність безвідмовної роботи  $k$ -ї резервованої групи елементів при напрацюванні  $t$ .

У разі застосування схеми роздільного «гарячого» резервування, яка передбачає одночасне включення і паралельну роботу елементів системи (рис. 1), імовірність  $P_k(r_k, t)$  обчислюється за формулою:

$$P_k(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_k t})^{r_k+1}, \quad (6)$$

де  $\lambda_k$  – інтенсивність відмов  $i$ -го елемента.

У випадку застосування схеми роздільного «холодного» резервування, яка передбачає включення в роботу резервних елементів шляхом заміщення ними відповідних основних елементів, що відмовили (рис. 2), імовірність  $P_k(r_k, t)$  у випадку «ідеального» перемикача визначається за формулою Ерланга [2]:

$$P_k(t) = e^{-\lambda_k t} \sum_{i=0}^{r_k} \frac{(\lambda_k t)^i}{i!}. \quad (7)$$

Слід зазначити, що модель (1) – (2) – це нелінійна задача математичного програмування розмірності  $n$  (невідомими виступають кратності резервування елементів основного об'єкта  $r_1, r_2, \dots, r_n$ ). Розв'язати цю задачу означає знайти такі значення невідомих  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , які

забезпечують необхідний рівень надійності системи за найменших витрат.

Модель (1) – (2) була числово реалізована для випадків «гарячого» і «холодного» роздільного резервування з використанням надбудови MS Excel «Пошук рішення» за наступних вихідних даних:  $n = 6$ ;  $P^* = 0,999$ ;  $T = 10000$  годин. Інтенсивності відмов і вартості елементів приймалися такими:  $\lambda_1 = 0,02 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 0,014 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>;  $\lambda_3 = 0,09 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>;  $\lambda_4 = 0,30 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>;  $\lambda_5 = 0,11 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>;  $\lambda_6 = 0,01 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>;  $g_1 = 25$  тис. грн;  $g_2 = 52$  тис. грн;  $g_3 = 12$  тис. грн;  $g_4 = 17$  тис. грн;  $g_5 = 29$  тис. грн;  $g_6 = 43$  тис. грн. Значення невідомих варіювалися діапазоном цілих чисел від 0 до 10.

Знайдені оптимальні кратності резервування елементів основного об'єкта для випадків «гарячого» і «холодного» роздільного резервування наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Оптимальні кратності резервування основних елементів

Тип резерву	Оптимальні кратності резервування					
	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$
Гарячий	2	2	3	6	4	2
Холодний	1	1	2	3	2	1

Розрахункові оцінки надійності і вартості оптимальних систем за «гарячого» і «холодного» резервування показані в таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінки надійності та вартості оптимальної системи

Тип резерву	Гарантований рівень надійності системи	Вартість системи, тис. грн
Гарячий	0,99931	546
Холодний	0,99904	447

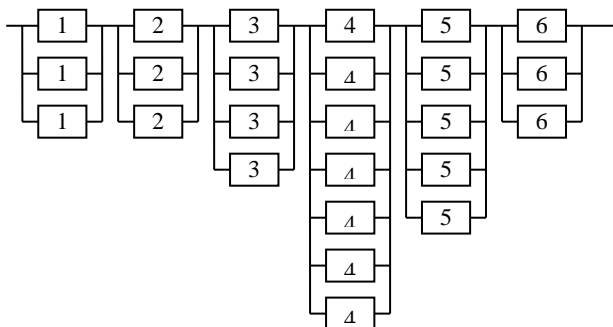


Рис. 3. Оптимальна структурна схема надійності системи, резервованої за схемою роздільного «гарячого» резервування

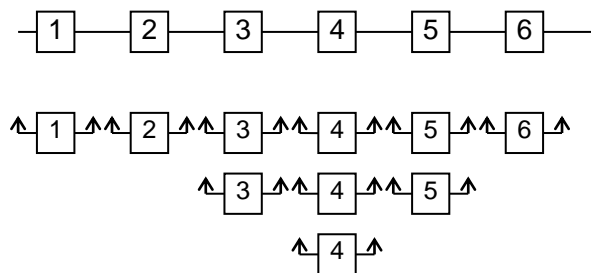


Рис. 4. Оптимальна структурна схема надійності системи, резервованої за схемою роздільного «холодного» резервування

Відповідні структурні схеми надійності резервованих систем показані на рисунках 3 та 4.

**Висновки.** Розглянуто питання, пов'язані з проблемою розв'язання задач оптимального резервування систем в інструментальному середовищі табличного процесора MS Excel. На прикладах розв'язання задач роздільного «гарячого» і роздільного «холодного» резервування

6-елементного об'єкта доведено результативність і ефективність табличного процесора MS Excel для вирішення цієї проблеми.

Крім того, розроблена оптимізаційна модель може успішно використовуватися в практичних задачах забезпечення надійності технічних систем на ранніх стадіях їх проектування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. Пер. с англ. Москва : Мир, 1980. 604 с.
2. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем : учеб. пособ. Москва : Физматлит, 2010. 606 с.
3. Креденцер Б. П., Могилевич Д. И., Кононова И. В., Пантась І. О. Оцінка надійності телекомунікаційного обладнання мережі спеціального призначення з урахуванням збоїв. *Збірник наукових праць ВІТІ*. Київ : ВІТІ, 2019. № 1. С. 41–48.
4. Креденцер Б. П., Могилевич Д. И., Кононова И. В. Оцінка виграшу в надійності при комплексному використанні надлишковості в об'єктах телекомунікацій. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2017. № 2. С. 48–57.
5. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. Санкт-Петербург : БХВ, 2006. 702 с.
6. Сазонова С.А., Манохин В. Я., Манохин М. В., Николенко С. Д. Математическое моделирование резервирования систем теплоснабжения в аварийных ситуациях. *Известия КГАСУ*. 2015. № 4 (34). С. 440–447.
7. Семенец С. Н., Насонова С. С., Семенец Г. И. Оптимальное структурное резервирование технических систем. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 4. С. 60–67.
8. Семенец С. Н., Насонова С. С., Власенко Ю. Е., Кривенкова Л. Ю. Оптимизация структуры системы при «холодном» резервировании. *Вісник ПДАБА*. 2017. № 6. С. 59–64.
9. Шишмарев В. Ю. Надёжность технических систем : учеб. Москва : Академия, 2010. 304 с.

### REFERENCES

1. Kapur K. and Lamberson L. *Nadezhnost i proektirovanie sistem*. Per. s angl. [Reliability and system design. Per. from English]. Moscow : Mir Publ., 1980, 604 p. (in Russian)
2. Kashtanov V.A. and Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnyih sistem : uchebnoe posobie* [Reliability theory of complex systems: a tutorial]. Moscow : Fizmatlit Publ., 2010, 606 p. (in Russian)
3. Kredentser B.P., Mogilevich D.I., Kononova I.V. and Pantas I.O. *Otsinka nadiynosti telekomunikatsiynogo obladnannya merezhi spetsialnogo pryznachennya z urahuvannyam zboyiv* [Estimation of reliability of the telecommunication equipment of a network of a special purpose taking into account failures]. *Zbirnik naukovih prats VITI* [Collection of scientific works of VITI]. 2019, no. 1, pp. 41–48. (in Ukrainian)
4. Kredentser B.P., Mogilevich D.I. and Kononova I.V. *Otsinka vigrashu v nadiynosti pri kompleksnomu vikoristanni nadlishkovosti v ob'ektah telekomunikatsiy* [Estimation of reliability gain in integrated use of redundancy

in telecommunications facilities]. *Zbirnik naukovih prats VITI* [Collection of scientific works of VITI]. 2017, no. 2, pp. 48–57. (in Ukrainian)

5. Polovko A.M. and Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. St. Petersburg : BHV, 2006, 702 p. (in Russian)

6. Sazonova S.A., Manohin V.Ya., Manohin M.V. and Nikolenko S.D. *Matematicheskoe modelirovanie rezervirovaniya sistem teplosnabzheniya v avariyniyh situatsiyah* [Mathematical modeling of redundancy of heat supply systems in emergency situations]. *Izvestiya KGASU* [Izvestia KGASU]. 2015, no. 4 (34), pp. 440–447. (in Russian)

7. Semenets S.N., Nasonova S.S. and Semenets G.I. *Optimalnoe strukturnoe rezervirovanie tehnichestikh sistem* [Optimal structural redundancy of technical systems]. *Nauka ta progres transportu* [Science and progress in transport]. 2018, no. 4, pp. 60–67. (in Russian)

8. Semenets S.N., Nasonova S.S., Vlasenko Yu.E. and Krivenkova L.Yu. *Optimizatsiya strukturyi sistemi pri «holodnom» rezervirovanii* [Optimization of the system structure with "cold" backup]. *Visnyk Prydniprovskoi dergavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 6, pp. 59–64. (in Russian)

9. Shishmarev V.Yu. *Nadyozhnost tehnichestikh sistem : uchebnik* [Reliability of technical systems : a textbook]. Moscow : Akademiya Publ., 2010, 304 p. (in Russian)

Надійшла до редакції: 19.10.2021.