

УДК 519.86:00'4.94:004.89

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.2>**О. О. БАКАЄВ**

аспірант

Інститут програмних систем Національної академії наук України

ORCID: 0009-0004-5427-1196

А. І. ІСМАГІЛОВ

аспірант

Інститут програмних систем Національної академії наук України

ORCID: 0009-0002-1332-8147

І. О. СИВАЧЕНКО

аспірант

Інститут програмних систем Національної академії наук України

ORCID: 0009-0005-3248-3371

Ю. О. ВЬЮННІК

аспірант

Інститут програмних систем Національної академії наук України

ORCID: 0009-0002-3213-8058

В. Л. ШЕВЧЕНКОдоктор технічних наук, професор,
заступник з наукової роботи директора

Інститут програмних систем Національної академії наук України

ORCID: 0000-0002-9457-7454

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З ВЛАСТИВОСТЯМИ ЧАСТКОВОЇ РЕГУЛЬОВАНОЇ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ ПІДСИСТЕМ

Мета дослідження – розробка моделі оцінки рівня живучості інформаційної системи, яка дозволяє знаходити оптимальних розподіл ресурсів між своїми підсистемами з урахуванням рівня їх взаємозамінності. В складі системи забезпечення живучості інформаційної системи розглянуті: підсистема виявлення шкідливих впливів на основі вже відомих сценаріїв, підсистема виявлення атак «нульового дня», підсистема запобігання виявленим вторгненням. Найбільш адекватною визначена залежність корисного ефекту підсистеми від вхідних ресурсів на основі логістичних залежностей, які однозначно задаються параметрами: ординати асимптот, постійна величина логістичної залежності, що визначає швидкість максимального зростання логістичної залежності, та абсциса точки симетрії, що залежить від початкових умов. Для об'єднання ефектів підсистем в загальний ефект системи використані скалярні згортки. Запропоновано використовувати базові згортки з властивостями повної взаємозамінності підсистем (адитивна) та повної невзаємозамінності підсистем (мінімізуюча). Запропонована адитивно-мінімізуюча згортка, яка дозволяє налаштовувати модель на різні рівні взаємозамінності підсистем у всьому діапазоні можливих значень. Сформульовані залежності для пошуку оптимального розподілу ресурсів між підсистемами для забезпечення максимуму корисного ефекту системи. Оптимальне рішення знаходиться методом повного прямого перебору, що дозволило уникнути локальних оптимумів і впевнено знайти глобальний максимум. Оптимальна точка змінює своє положення в залежності від значень параметрів коефіцієнта рівня взаємозамінності та сумарного ресурсу системи. Побудовані траєкторії руху оптимальних рішень, для різних значень параметрів, що дозволяє не тільки знаходити оптимальне рішення для поточних параметрів, але й знаходити параметри, які б дозволили покращити ефект системи з урахуванням можливої зміни сценаріїв роботи.

Ключові слова: моделювання, оптимізація, логістичні залежності, ефект, живучість, ресурси, інформаційні системи.

О. О. БАКАІЕВ

Postgraduate Student
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0009-0004-5427-1196

А. І. ISMAGILOV

Postgraduate Student
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0009-0002-1332-8147

І. О. SYVACHENKO

Postgraduate Student
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0009-0005-3248-3371

Yu. O. VYUNNIK

Postgraduate Student
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0009-0002-3213-8058

V. L. SHEVCHENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Deputy Director for Scientific Work
Institute of Software Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-9457-7454

MODEL FOR ASSESSING THE LEVEL OF SURVIVAL OF AN INFORMATION SYSTEM WITH THE PROPERTIES OF PARTIAL REGULATED INTERCHANGEABILITY OF SUBSYSTEMS

The purpose of the study is to develop a model for assessing the level of survivability of an information system, which allows finding the optimal distribution of resources between its subsystems, taking into account the level of their interchangeability. The following subsystems are considered as part of the survivability system: a subsystem for detecting harmful effects based on already known scenarios, a subsystem for detecting “zero-day” attacks, and a subsystem for preventing detected intrusions. The most adequate is the dependence of the useful effect of the subsystem on the input resources based on logistic dependencies, which are uniquely specified by the parameters: the ordinates of the asymptotes, the constant value of the logistic dependency, which determines the rate of maximum growth of the logistic dependency, and the abscissa of the symmetry point, which depends on the initial conditions. Scalar convolutions are used to combine the effects of subsystems into the overall effect of the system. It is proposed to use basic convolutions with the properties of complete interchangeability of subsystems (additive) and complete non-interchangeability of subsystems (minimizing). An additive-minimizing convolution is proposed, which allows you to adjust the model to different levels of subsystem interchangeability in the entire range of possible values. Dependencies are formulated to find the optimal distribution of resources between subsystems to ensure the maximum useful effect of the system. The optimal solution is found by the method of complete direct search, which made it possible to avoid local optima and confidently find the global maximum. The optimal point changes its position depending on the values of the parameters of the interchangeability level coefficient and the total resource of the system. The trajectories of the optimal solutions are constructed for different parameter values, which allows not only to find the optimal solution for the current parameters, but also to find parameters that would allow improving the effect of the system, taking into account a possible change in work scenarios.

Key words: modeling, optimization, logistic dependencies, effect, survivability, resources, information systems.

Постановка проблеми

Інформаційні системи (ІС) знаходяться в стані щоденних загроз. Всіх зловмисників ми усунути не можемо. Але можемо захищати ІС. Відбувається постійне зростання витрат на захист інформації. З 2024 до 2028 року очікується зростання глобального ринку систем інформаційної безпеки від 183 млрд.дол. до 292 млрд.дол. [1]. В той же період очікується зростання ринку послуг щодо безпеки підприємств на 12.5 % (до 116.8 млрд.дол.), зростання ринку програмного забезпечення для безпеки підприємств на 14.1 % (до 132.4 млрд.дол.), ринку мережевої

безпеки підприємств на 10.6 % (до 33.1 млрд.дол.), ринку програмного забезпечення для безпеки споживачів на 4 % (до 9.7 млрд.дол.) [1]. На порядку денному питання живучості ІС, тобто збереження їх працездатності в умовах зловмисних впливів [2]. Вузькоспрямовані методи зазвичай мають локальний ефект і не вирішують проблеми на системному рівні, як, наприклад, підходи до безпечного формування ключів [3]. Для забезпечення захисту треба знати залежність рівня живучості ІС від ресурсного забезпечення. Практичні експерименти для виявлення закономірностей можуть коштувати занадто дорого. Особливо, якщо вони не вдалі. Високу ефективність мають методи імітаційного моделювання [4, 5]. Таким чином, **актуальною** є задача створення імітаційних моделей оцінки рівня живучості інформаційних систем. Такі моделі дозволяють прогнозувати наслідки управлінських рішень, щодо забезпечення живучості та знаходити оптимальне керування живучістю інформаційною системою, зокрема оптимальний розподіл ресурсів між підсистемами.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка багатofакторної моделі оцінки рівня живучості інформаційної системи, яка дозволяє знаходити оптимальний розподіл ресурсів між підсистемами з урахуванням рівня їх взаємозамінності.

Основні завдання дослідження:

1. Вивчити існуючий досвід щодо створення моделей такого роду та методів ресурсної оптимізації.
2. Визначити базові залежності перетворення вхідних ресурсів у вихідний корисний ефект системи – рівень живучості ІС.
3. Визначити адекватні скалярні згортки корисний ефектів підсистем в корисний ефект системи з урахуванням рівня взаємозамінності підсистем.
4. За допомогою створених моделей знайти оптимальні рішення щодо розподілу ресурсів між підсистемами та проаналізувати закономірності зміни цих рішень при зміні значень керуючих факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Концептуальні підходи щодо створення моделей складних багатofакторних систем розглянуті в [4, 5]. Було визначено, що узагальнену модель системи можна представити (рис. 1) у вигляді функціонального блоку $Ef(R)$, на вхід якого поступають ресурси R , а на виході отримуються корисний ефект Ef (далі – ефект). Ресурсами можуть бути: матеріальні ресурси, гроші, час, персонал, рівень кваліфікації, технології, ноу-хау, репутація, рівень керованості тощо. Корисними ефектами можуть бути: дохід, прибуток, обсяги виробництва, нові технології, репутація, частка ринку, якість продукції тощо.

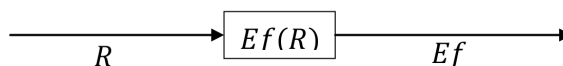


Рис. 1. Узагальнена модель системи

Джерело: розроблено авторами

Виникає питання щодо можливого вигляду базової залежності $Ef(R)$. S-подібний характер залежності корисності інформації від її обсягу представлений в [6]. В динамічних моделях комп'ютерних епідемій використані S-подібні [5] залежності на основі логістичних рівнянь у вигляді звичайних диференціальних рівнянь. Аналогічні рівняння використані в моделі корисного ефекту організації (проекту) на етапі трансформації [7]. Логістична залежність включає в себе експоненціальні та лінійні ділянки. Інколи ці залежності використовуються, як самостійні залежності корисного ефекту. Наприклад, в [8] функції вразливості в різних умовах є лінійними, експоненціальними або логістичними. Узагальнення підходів щодо використання лінійних, експоненціальних та логістичних моделей зроблене в [4, 5]. В нашому випадку у якості базової залежності ефекту від ресурсів доцільно обирати логістичні моделі в інтегральній формі (у вигляді розв'язку звичайних диференціальних рівнянь для заданих початкових умов).

Система забезпечення живучості складається із підсистем. Кожна із підсистем має власну залежність ефекту від ресурсів. Виникає задача створення моделі ефекту системи. Оскільки функціональне призначення підсистем, а також їх взаємодія та можливості взаємозамінності є досить зрозумілими і наочними, то в якості основного інструменту переходу до моделі системи використаємо скалярне згортання ефектів підсистем. Виникає питання – який вигляд має мати скалярна згортка (далі – згортка).

В [9] для оцінки ефекту атак на інформаційні системи, в моделі живучості [10] та в багатьох інших моделях [4, 5] використані адитивні згортки з ваговими коефіцієнтами. Нажаль, в реальному житті гомогенні системи скоріше виключення ніж правило. Реальні системи реалізують процеси, які доцільно моделювати за допомогою гібридних згорток, наприклад адитивно-мінімізуючих [11], або адитивно-мультиплікативних, які фактично є окремим випадком поліному Колмогорова-Габора [12–15], якій отримав широке розповсюдження завдяки методу групового урахування аргументу академіка Івахненка А. Г. в задачі множинної регресії [16]. В нашому дослідженні пріоритет варто відати гібридним згорткам, які більш відповідають природі реальних систем забезпечення живучості інформаційних систем.

Моделі дозволяють прогнозувати наслідки управлінських рішень, але більш важливо те, що вони дозволяють знаходити оптимальні рішення. В нашому випадку – це рішення щодо оптимального розподілу ресурсів між підсистемами. Певні підходи щодо розподілу ресурсів між підсистемами при обмеженні на сумарний ресурс системи розглянуті в [4]. Але підхід розглянутий лише для двох окремих випадків адитивної та мультиплікативної згорток. Розширення постановки задачі виконане в [17] при розподілі ресурсу програмістів різних рівнів кваліфікації в задачі створення оптимальної команди розробників. В [8] визначені втрати від комп'ютерних атак при різному ресурсному забезпеченні засобів захисту. Враховані втрати від атак і витрати на захист. Виявлений явний мінімум (оптимум) в залежності рівня безпеки від величини ресурсного забезпечення. В [18] створена аналогічна модель, яка додатково враховує втрати від наслідків атак, витрати на усунення наслідків атак, витрати на відновлення працездатності інформаційної системи, втрати від відволікання ресурсів інформаційної системи щодо виконання основних функцій.

Аналіз існуючих досліджень показав, що у якості базових залежностей ефекту (живучості) ІС від ресурсів доцільно використовувати логістичні залежності. Аналіз показав, що реальним процесам забезпечення живучості в більшому ступені відповідають гібридні скалярні згортки. Але в розглянутих дослідженнях для створення моделей живучості ІС такі згортки використані не були. Аналіз показав, що існує багато досліджень щодо ресурсної оптимізації систем захисту інформації. Нажаль, при цьому задача оптимізації розподілу ресурсів між підсистемами забезпечення живучості ІС не розглядалась.

Викладення основного матеріалу дослідження

Ресурси та корисний ефект. В нашому випадку корисним ефектом є живучість ІС. Ресурсами може бути все, що було перераховано вище. Крім того у якості вхідних ресурсів можуть виступати корисні ефекти підпорядкованих систем. Для спрощення моделі будемо вважати, що вхідними ресурсами є матеріальні ресурси або їх грошовий еквівалент, який дозволяє придбати потрібні засоби та технології забезпечення живучості інформаційних систем.

Базова залежність корисного ефекту від ресурсів

Аналіз існуючих досліджень показав, що у якості базової залежності ефекту від ресурсів в моделі живучості інформаційних систем є логістична залежність, яка для кожної із підсистем має вигляд

$$Ef_i = SL_i(R_i) = d_i + \frac{a_i - d_i}{1 + \exp\left(-\frac{2}{T_i}(R_i - s_i)\right)}, \quad i = \overline{1,3}, \quad (1)$$

де i – номер (індекс) підсистеми; d_i , a_i – ординати асимптот (визначають вертикальний масштаб залежності); T_i – постійна величина логістичної кривої (для поточного масштабу залежності визначає найвищу швидкість зростання залежності в зоні стабільного функціонування системи або підсистеми); s_i – абсциса точки симетрії (визначається початковими умовами розвитку процесу, що моделюється).

Логістичні залежності для підсистем (рис. 2) чітко і однозначно визначається наборами параметрів d_i , a_i , T_i , s_i , які мають такі значення (представлено в нотації Матлабу):

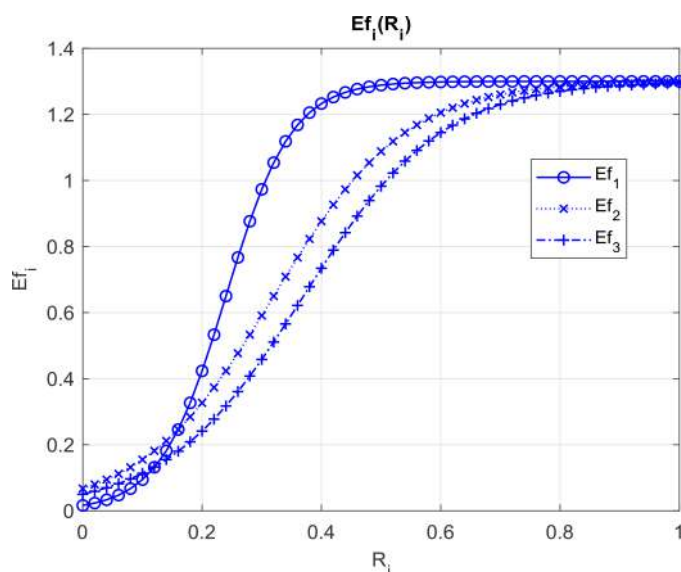


Рис. 2. Базові залежності корисних ефектів підсистем від ресурсів

Джерело: розроблено авторами

$K = \{ \% d a T s \text{ for Survivability of Information Systems}$
 $[0 \ 1.3 \ 0.11 \ 0.24] \text{ 'Subsystem 1'}$
 $[0 \ 1.3 \ 0.22 \ 0.32] \text{ 'Subsystem 2'}$
 $[0 \ 1.3 \ 0.23 \ 0.37] \text{ 'Subsystem 3'}$
 $\};$

Згортання ефектів підсистем

До складу системи забезпечення живучості ІС входить 3 складові: підсистема виявлення шкідливих впливів на основі вже відомих сценаріїв (патернів, сигнатур), підсистема виявлення атак «нульового дня» (відносно інформації про вид атаки), підсистема запобігання виявленим вторгненням. Кожна із підсистем в процесі роботи створює власний корисний ефект, який є внеском в загальний ефект системи. Ефект системи не є простою сумою ефектів підсистем. Але в аналізі існуючих досліджень найбільш поширеною є адитивна згортка з ваговим коефіцієнтом β_i , яка моделює повну взаємозамінність підсистем

$$Ef_{sys} = \sum_{i=1}^3 \beta_i SL_i(R_i) \quad (2)$$

при додатковій умові нормалізації вагових коефіцієнтів

$$\sum_{i=1}^3 \beta_i = 1. \quad (3)$$

В реальності підсистеми не є повністю взаємозамінними. Тому під знаком суми ми розмістили не ефекти підсистем, які можуть мати довільні значення, а ефекти, які знаходяться за допомогою логістичної залежності з асимптотичними обмеженнями (рис. 2). Це частково знижує взаємозамінність компонент в залежності (2). Хоча в робочій зоні кожної із логістичних залежностей (поряд з точкою симетрії) ефект повної взаємозамінності, нажаль, реалізується.

Властивості неповної взаємозамінності реалізує мультиплікативна згортка

$$Ef_{sys} = \prod_{i=1}^3 (SL_i(R_i))^{\beta_i}. \quad (4)$$

Нажаль ця залежність не зовсім наочна завдяки суттєвій нелінійності. Крім того ступінь рівня взаємозамінності є, з одного боку постійним, з іншого невідомим. Потрібна згортка з більш прогнозованим рівнем взаємозамінності. Для створення такої згортки розглянемо мінімізуючу згортку

$$Ef_{sys} = \min_{i=1}^3 \frac{R_i}{\beta_i}. \quad (5)$$

Сенс цієї згортки полягає в тому, що із всіх компонент під знаком згортки, в якості результату, обирається найгірша (найменша). Ця згортка орієнтована на комплекти. Наприклад, якщо у нас 3 комп'ютера, 5 комплектів ліцензійного програмного забезпечення та 7 програмістів, то насправді у нас є тільки 3 працездатних програміста, які можуть виконувати певні завдання щодо розробки програмних систем. Ваговий коефіцієнт в цій згортці відповідає кількості одиниць певного ресурсу, що складають один комплект. Мінімізуюча згортка реалізує модель повної невзаємозамінності ресурсів. Якщо будь-який ресурс дорівнює нулю, то ефект всієї системи буде дорівнювати нулю. Мінімізуюча згортка також може бути також представлена у вигляді

$$Ef_{sys} = \min_{i=1}^3 SL_i\left(\frac{R_i}{\beta_i}\right) \quad (6)$$

або

$$Ef_{sys} = \min_{i=1}^3 \beta_i SL_i(R_i). \quad (7)$$

В залежності (5) властивість повної невзаємозамінності відноситься безпосередньо до ресурсів, а в залежності (6) до ефектів, що були отримані за допомогою цих ресурсів. В залежності (7) нормування виконується не щодо ресурсів, а щодо ефектів підсистем. Надалі використовуємо залежність (7).

На основі розглянутих базових згорток можна створювати більш складні залежності. Адитивна і мінімізуюча згортки – це два граничних підходи щодо повної взаємозамінності та повної невзаємозамінності підсистем, відповідно. Логічно було би саме ці згортки об'єднати в гібридній згортці. При цьому варто додати керуючий параметр щодо рівня взаємозамінності підсистем. Наприклад, на основі поліному Колмогорова-Габора подібну гібридну згортку автори використовували в попередніх своїх дослідженнях.

$$Ef_{sys} = k_{Add} \sum_{i=1}^3 \beta_i SL_i(R_i) + (1 - k_{Add}) \prod_{i=1}^3 (SL_i(R_i))^{\beta_i}. \quad (8)$$

Тут k_{Add} – коефіцієнт, що визначає рівень взаємозамінності підсистем. Якщо $k_{Add} = 1$ – підсистеми повністю взаємозамінні, якщо $k_{Add} = 0$ – підсистеми не взаємозамінні на рівні мультиплікативної згортки. Але ж ми визначали вище, що мультиплікативні системи мало того, що не повністю взаємозамінні, ще й не зрозуміло, якій саме рівень не взаємозамінності вони реалізують. Тому модифікуємо залежність (8) таким чином

$$Ef_{sys} = k_{Add} \sum_{i=1}^3 \beta_i SL_i(R_i) + (1 - k_{Add}) \min_{i=1}^3 \beta_i SL_i(R_i). \quad (9)$$

Тепер ми отримали можливість враховувати рівень взаємозамінності підсистем в повному діапазоні від 0 до 100 % відповідно до умов функціонування системи.

Оптимальний ефект

Критерій оптимальності – максимум ефекту.

$$Ef_{opt} = \max_{R_1, R_2, R_3} (Ef_{sys}). \quad (10)$$

Оскільки сума всіх ресурсів підсистем є фіксована величина, то

$$R_3 = R_{sum} - R_1 - R_2 \quad (11)$$

це дозволяє зменшити кількість змінних, які треба варіювати при пошуку оптимального рішення

$$(R_{1opt}, R_{2opt}) = \arg \max_{R_1, R_2} (Ef_{sys}). \quad (12)$$

Поверхні пошуку оптимальних рішень $Ef_{sys}(R_1, R_2)$ для базових згорток мають вигляд (рис. 3, 4).

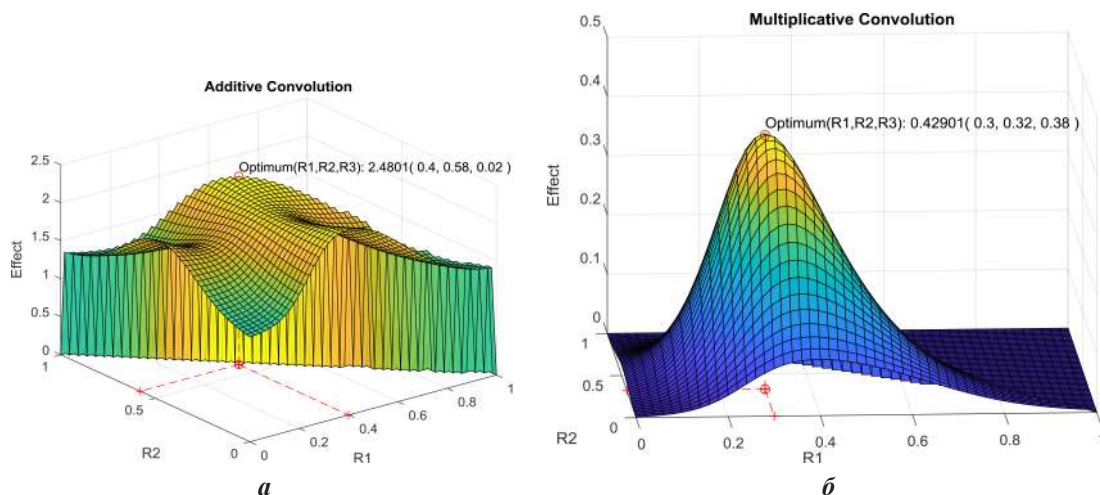


Рис. 3. Поверхні пошуку оптимального рішення $Ef_{sys}(R_1, R_2)$ для базових згорток:
а) адитивна згортка, б) мультиплікативна згортка

Джерело: розроблено авторами

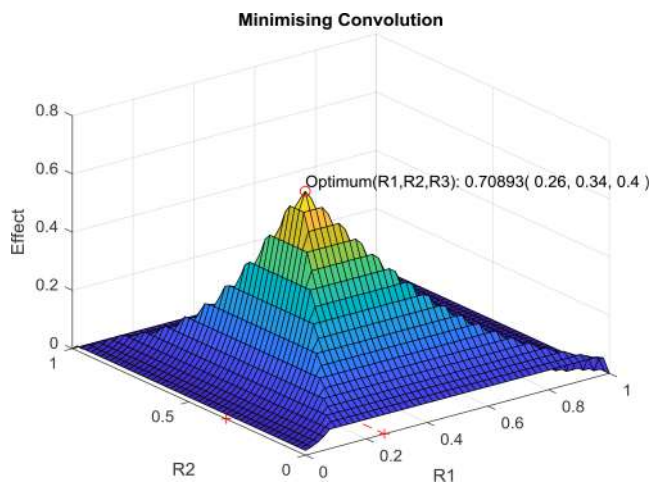


Рис. 4. Поверхня пошуку оптимального рішення $Ef_{sys}(R_1, R_2)$ для мінімізуючої згортки

Джерело: розроблено авторами

Поверхні пошуку оптимальних рішень $Ef_{sys}(R_1, R_2)$ для гібридних згорток представлені на рис. 5, 6. Адаптація моделі під постановку задачі виконується за допомогою коефіцієнту k_{Add} (9).

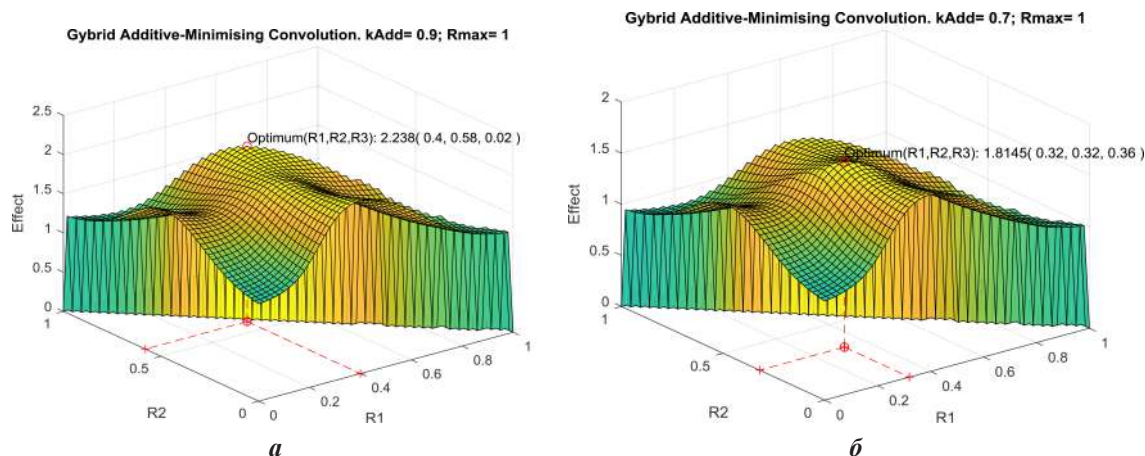


Рис. 5. Поверхні пошуку оптимального рішення $Ef_{sys}(R_1, R_2)$ для гібридної адитивно-мінімізуючої згортки:
а) $k_{Add} = 0.9$, б) $k_{Add} = 0.7$

Джерело: розроблено авторами

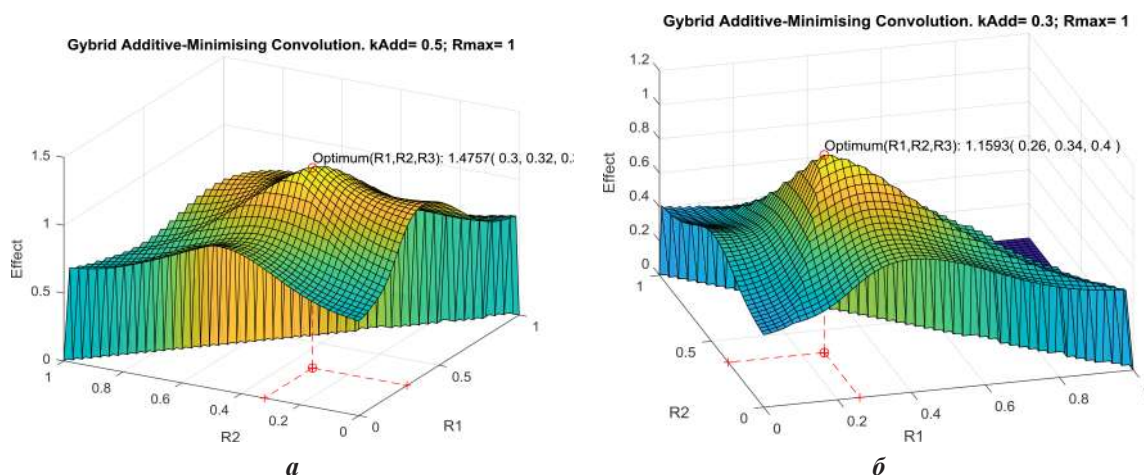


Рис. 6. Поверхні пошуку оптимального рішення $Ef_{sys}(R_1, R_2)$ для гібридної адитивно-мінімізуючої згортки:
а) $k_{Add} = 0.5$, б) $k_{Add} = 0.3$

Джерело: розроблено авторами

При великих значеннях коефіцієнту $k_{Add} = 0.9$ (рис. 5, а) згортка в моделі реалізує високий рівень взаємозамінності підсистем. Поверхня пошуку оптимального рішення наближена до вигляду поверхні для адитивної згортки. По мірі зменшення значення коефіцієнту починають превалювати властивості мінімізуючої згортки (рис. 5, б, рис. 6). Для згортки з високим рівнем взаємозамінності підсистем, оптимум знаходиться на межі області припустимих значень. При зменшенні рівня взаємозамінності оптимум переміщується в середину області припустимих значень.

Оптимальний розподіл ресурсів

Оптимальні рішення знаходились методом повного прямого перебору, що дозволило впевнено знаходити глобальні максимуми серед всього набору максимумів поверхні пошуку оптимальних рішень $Ef_{sys}(R_1, R_2)$. Знайдені оптимальні рішення Ef_{opt} досягаються при певних значеннях вхідних ресурсів підсистем (R_{1opt}, R_{2opt}) . Ці значення змінюються при зміні величини k_{Add} та величини сумарного ресурсу системи R_{sum} . Знання розташування траєкторії руху оптимумів $(Ef_{opt}, R_{1opt}, R_{2opt})$ при зміні k_{Add}, R_{sum} (рис. 7, 8) дозволяє не лише знаходити оптимальні рішення для заданих умов, але й свідомо змінювати ці умови за допомогою параметрів k_{Add}, R_{sum} .

Висновки

В роботі проаналізовані можливості створення моделей живучості інформаційної системи для різних рівнів взаємозамінності підсистем.

В складі системи забезпечення живучості інформаційної системи проаналізовані 3 підсистеми: підсистема виявлення шкідливих впливів на основі вже відомих сценаріїв (патернів, сигнатур), підсистема виявлення атак «нульового дня», підсистема запобігання виявленим вторгненням.

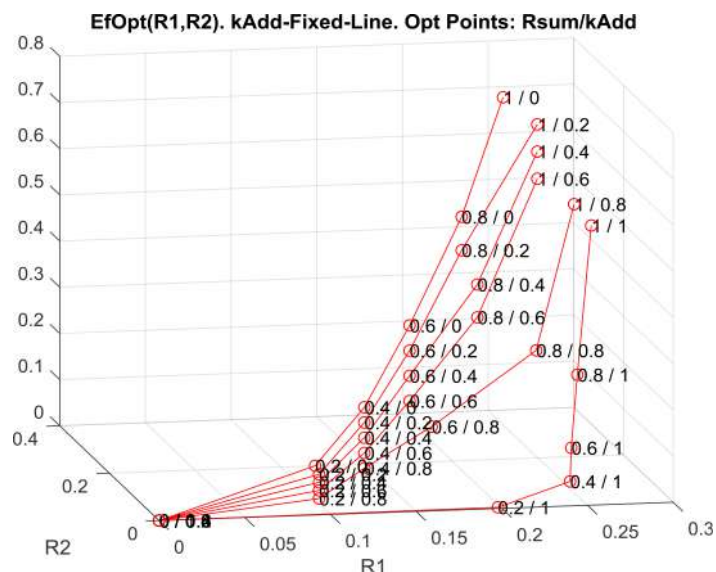


Рис. 7. Траєкторії оптимальних точок (Ef_{opt} , R_{1opt} , R_{2opt}) для k_{Add} зафіксованих в діапазоні 0 до 1 при зміні R_{sum} від 0 до 1

Джерело: розроблено авторами

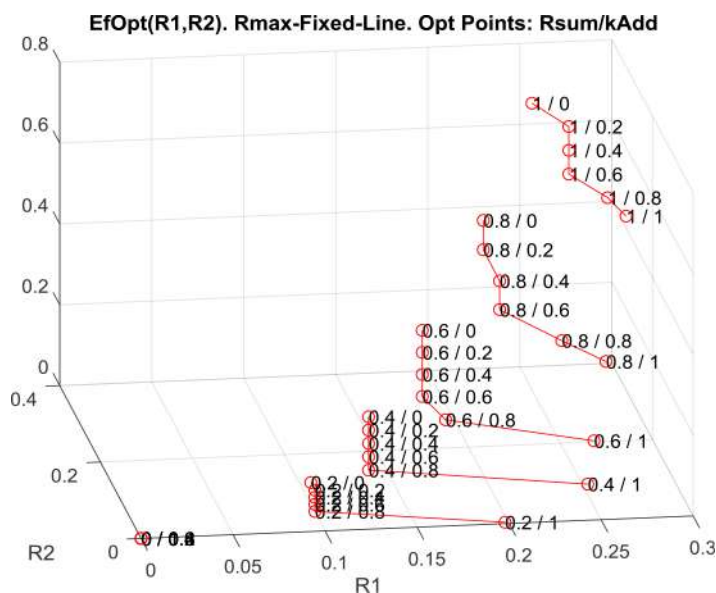


Рис. 8. Траєкторії оптимальних точок (Ef_{opt} , R_{1opt} , R_{2opt}) для R_{sum} зафіксованих в діапазоні 0 до 1 при зміні k_{Add} від 0 до 1

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що залежність корисного ефекту підсистеми від вхідних ресурсів доцільно створювати на основі логістичних залежностей в інтегральній формі. Визначено, що логістичні залежності однозначно і чітко задаються такими параметрами: ординати нижньої та верхньої асимптот, постійна величина логістичної залежності, що визначає швидкість максимального зростання логістичної залежності, та абсциса точки симетрії, що залежить від початкових умов.

Визначено, що для об'єднання ефектів підсистем в загальний ефект системи доцільно використовувати скалярні згортки. В роботі запропонована адитивно-мінімізуюча згортка, яка дозволяє налаштовувати модель на різні рівні взаємозамінності підсистем у всьому діапазоні можливих значень від 0 до 100 %. Рівень взаємозамінності підсистем встановлюється за допомогою відповідного коефіцієнта в діапазоні від 0 до 1.

Сформульовані залежності для пошуку оптимального розподілу ресурсів між підсистемами для забезпечення максимуму корисного ефекту системи. Пошук оптимального рішення виконувався методом повного прямого перебору, що дозволило уникати локальних оптимумів і впевнено знаходити глобальний максимум.

Було виявлено, що оптимальна точка змінює своє положення в залежності від значень параметрів: коефіцієнта рівня взаємозамінності та сумарного ресурсу системи. Були побудовані траєкторії руху оптимальних рішень, для різних значень параметрів, що дозволяє не тільки легко знаходити оптимальне рішення для поточних параметрів, але й знаходити керуючі параметри, які б дозволили покращити ефект системи з урахуванням можливої зміни сценаріїв роботи системи.

Напрями подальших досліджень: розширення переліку факторів, що беруться до уваги при пошуку оптимального рішення.

Список використаної літератури

1. Shailendra Upadhyay. (2024). Information Security Spending: What Does the Future Hold? Website Gartner. November 27, 2024. Available at: https://www.gartner.com/en/articles/information-security?utm_source=chatgpt.com
2. Westmark, V.R.. (2004). A Definition for information system survivability. 37. 10 pp.. 10.1109/HICSS.2004.1265710
3. Popereshnyak S., Novikov Y., Zhdanova Y. (2024). Cryptographic system security approaches by monitoring the random numbers generation. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3826. P. 301–309. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short21.pdf> (дата звернення: 18.09.2025).
4. Шевченко В. Л. (2011). Оптимізаційне моделювання в стратегічному плануванні. Київ : ЦВСД НУОУ, 283.
5. Шевченко В. Л., Нестеренко О. В., Нетесін І. Є., Шевченко А. В., Поліщук В. Б. (2019). Прогнозне моделювання комп'ютерних вірусних епідемій. Київ : УкрНЦ РІТ, 152. <http://e.ieu.edu.ua/handle/123456789/647>
6. Khmelevskoy R., Laptiev S., Laptieva T. (2021). Improving the Method of Assessing the Information Security of Computer Systems from Malicious Software. *International Journal of Science and Engineering Investigations (IJSEI) Denmark*, 113 (10), 43–48. <https://www.ijsei.com/papers/ijsei-1011321-07.pdf>
7. Syvytsky Y., Shevchenko V. (2024). Computer Simulation Model of the Organization at the Stage of Transformation for the Purpose of Adaptation to New Projects. 14th International Scientific and Practical Conference from Programming UkrPROG'2024. May 14–15. Kyiv. Ukraine, 421–433.
8. Рабчун Д. І. (2015). Оцінка ефективності інформаційної безпеки з урахуванням економічних показників. *Сучасний захист інформації*, 4, 91–97. <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/429/397>
9. Yevseiev S., Ponomarenko V., Laptiev O., Milov O. and others. (2021). Synergy of building cybersecurity systems: monograph. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 188. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85119654284&origin=resultslist> https://www.researchgate.net/publication/352013398_Synergy_of_building_cybersecurity_systems_Monograph
10. Syvachenko I., Bakaiev O., Shevchenko V. (2024). Scalarization of the vector criterion of information system survivability based on information security indicators. *Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II 2024)*, Kyiv, Ukraine, October 26, 2024, *CEUR Workshop Proceedings*, ISSN 1613-0073, 2024, Vol-3826, 294–300. <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short20.pdf>, Scopus, dblp
11. Emmerich M., Deutz A. (2024). Multicriteria Optimization and Decision Making. Principles, Algorithms and Case Studies : Lecture Notes. MSc Course 2012-2023, LIACS, Leiden University. The Netherlands. Updated and Revised Edition, June 2024, 106. <https://arxiv.org/pdf/2407.00359v2>
12. Marateb H., Norouzirad M., Tavakolian K., Aminorroaya F. O., Mohebbian M., Mañanas M. Á., Lafuente S. R., Sami R., Mansourian M. (2023). Predicting COVID-19 Hospital Stays with Kolmogorov–Gabor Polynomials: Charting the Future of Care. *Information*, 14(11), 590. <https://doi.org/10.3390/info14110590>
13. Qian N., Gao J., Li Z., Yan Z., Feng Y., Yan Z., Yang L. (2024). Bridging the Terrestrial Water Storage Anomalies between the GRACE/GRACE-FO Gap Using BEAST + GMDH Algorithm. *Remote Sensing*, 16(19), 3693. <https://doi.org/10.3390/rs16193693>
14. Mohammad A., Belayneh M. (2024). Field Telemetry Drilling Dataset Modeling with Multivariable Regression, Group Method Data Handling, Artificial Neural Network, and the Proposed Group-Method-Data-Handling-Featured Artificial Neural Network. *Applied Sciences*, 14(6), 2273. <https://doi.org/10.3390/app14062273>
15. Achite M., Katipoğlu O. M., Kartal V., Sarıgöl M., Jehanzaib M., Gül E. (2025). Advanced Soft Computing Techniques for Monthly Streamflow Prediction in Seasonal Rivers. *Atmosphere*, 16(1), 106. <https://doi.org/10.3390/atmos16010106>
16. Ivakhnenko A. G. (1971). Polynomial theory of complex systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, 4, 364–378. DOI: 10.1109/TSMC.1971.4308320 <https://ieeexplore.ieee.org/document/4308320>
17. Fedoriienko V. (2021). Model of the special software development and modification based on account factors of complexity, workability, qualification of programmers and resource limitations. *Political Science and Security Studies Journal*. Przeworsk, 2 (3), 94–104. URL: <http://psssj.eu/index.php/ojsdata/issue/view/4> <https://doi.org/10.5281/zenodo.5544382> <https://psssj.eu/index.php/ojsdata/article/view/69>
18. Shevchenko A., Fedorenko R., Shmorhun Y., Hrebennikov A., Shevchenko V. (2019). Designing of Functionally Stable Information Systems Optimal for a Minimum of Losses. 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Polyana-Svalyava (Zakarpattia), IEEE Xplore, 36–40. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779299 <https://ieeexplore.ieee.org/document/8779299>

References

1. Shailendra Upadhyay. (2024). Information Security Spending: What Does the Future Hold? Website Gartner. November 27, 2024. Available at: https://www.gartner.com/en/articles/information-security?utm_source=chatgpt.com
2. Westmark, V. R.. (2004). A Definition for information system survivability. 37. 10 pp.. 10.1109/HICSS.2004.1265710
3. Popereshnyak S., Novikov Y., Zhdanova Y. (2024). Cryptographic system security approaches by monitoring the random numbers generation. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3826. P. 301–309. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short21.pdf> (дата звернення: 18.09.2025).
4. Shevchenko V. L. (2011). Optimization modeling in strategic planning. Kyiv : Military and Strategic Research Centre of National Defence University of Ukraine, 283.
5. Shevchenko V. L., Nesterenko O. V., Netesin I. E., Shevchenko A. V., Polishchuk V. B. (2019). Predictive modeling of computer virus epidemics. Kyiv : UkrNC RIT, 152. <http://e.ieu.edu.ua/handle/123456789/647>
6. Khmelevskoy R., Laptiev S., Laptieva T. (2021). Improving the Method of Assessing the Information Security of Computer Systems from Malicious Software. *International Journal of Science and Engineering Investigations (IJSEI)* Denmark, 113 (10), 43–48. <https://www.ijsei.com/papers/ijsei-1011321-07.pdf>
7. Syvytsky Y., Shevchenko V. (2024). Computer Simulation Model of the Organization at the Stage of Transformation for the Purpose of Adaptation to New Projects. 14th International Scientific and Practical Conference from Programming UkrPROG'2024. May 14–15. Kyiv. Ukraine, 421–433.
8. Rabchun D. I. (2015). Assessment of the effectiveness of information security taking into account economic indicators. *Modern information protection*, 4, 91–97. <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/429/397>
9. Yevseiev S., Ponomarenko V., Laptiev O., Milov O. and others. (2021). Synergy of building cybersecurity systems: monograph. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 188. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85119654284&origin=resultslist> https://www.researchgate.net/publication/352013398_Synergy_of_building_cybersecurity_systems_Monograph
10. Syvachenko I., Bakaiev O., Shevchenko V. (2024). Scalarization of the vector criterion of information system survivability based on information security indicators. *Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II 2024)*, Kyiv, Ukraine, October 26, 2024, *CEUR Workshop Proceedings*, ISSN 1613-0073, 2024, Vol-3826, 294–300. <https://ceur-ws.org/Vol-3826/short20.pdf>, Scopus, dblp
11. Emmerich M., Deutz A. (2024). Multicriteria Optimization and Decision Making. Principles, Algorithms and Case Studies : Lecture Notes. MSc Course 2012-2023, LIACS, Leiden University. The Netherlands. Updated and Revised Edition, June 2024, 106. <https://arxiv.org/pdf/2407.00359v2>
12. Marateb H., Norouzirad M., Tavakolian K., Aminorroaya F. O., Mohebbian M., Mañanas M. Á., Lafuente S. R., Sami R., Mansourian M. (2023). Predicting COVID-19 Hospital Stays with Kolmogorov–Gabor Polynomials: Charting the Future of Care. *Information*, 14(11), 590. <https://doi.org/10.3390/info14110590>
13. Qian N., Gao J., Li Z., Yan Z., Feng Y., Yan Z., Yang L. (2024). Bridging the Terrestrial Water Storage Anomalies between the GRACE/GRACE-FO Gap Using BEAST+GMDH Algorithm. *Remote Sensing*, 16(19), 3693. <https://doi.org/10.3390/rs16193693>
14. Mohammad A., Belayneh M. (2024). Field Telemetry Drilling Dataset Modeling with Multivariable Regression, Group Method Data Handling, Artificial Neural Network, and the Proposed Group-Method-Data-Handling-Featured Artificial Neural Network. *Applied Sciences*, 14(6), 2273. <https://doi.org/10.3390/app14062273>
15. Achite M., Katipoğlu O. M., Kartal V., Sarıgöl M., Jehanzaib M., Gül E. (2025). Advanced Soft Computing Techniques for Monthly Streamflow Prediction in Seasonal Rivers. *Atmosphere*, 16(1), 106. <https://doi.org/10.3390/atmos16010106>
16. Ivakhnenko A.G. (1971). Polynomial theory of complex systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, 4, 364–378. DOI: 10.1109/TSMC.1971.4308320 <https://ieeexplore.ieee.org/document/4308320>
17. Fedorienko V. (2021). Model of the special software development and modification based on account factors of complexity, workability, qualification of programmers and resource limitations. *Political Science and Security Studies Journal*. Przeworsk, 2 (3), 94–104. URL: <http://psssj.eu/index.php/ojsdata/issue/view/4> <https://doi.org/10.5281/zenodo.5544382> <https://psssj.eu/index.php/ojsdata/article/view/69>
18. Shevchenko A., Fedorenko R., Shmorhun Y., Hrebennikov A., Shevchenko V. (2019). Designing of Functionally Stable Information Systems Optimal for a Minimum of Losses. 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Polyana-Svalyava (Zakarpattia), IEEE Xplore, 36–40. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779299 <https://ieeexplore.ieee.org/document/8779299>

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації 28.11.2025