

О.О. Бакаєв, В.Л. Шевченко, В.А. Чистяков, О.В. Дергильова

СЦЕНАРНО-АДАПТУЄМА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТ РЕСУРСІВ НА СИСТЕМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ВТРАТ ВІД ІНЦИДЕНТІВ

У роботі розроблено сценарно-адаптивну модель оптимізації витрат ресурсів на систему забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи за критерієм мінімуму втрат від інцидентів. Поняття функціональної стійкості прийняте як основна метрика критеріїв якості, оскільки важко повністю усунути інциденти, але цілком реально забезпечити функціональну стійкість системи, навіть за наявності інцидентів. Мета роботи – розвиток багатовимірних моделей корисних ефектів та функціональної стійкості систем із властивостями сценарної адаптації для подальшої оптимізації витрат на системи захисту інформаційних систем. За основну складову модель функціональної стійкості інформаційних систем запропоновано використовувати скалярну згортку на основі поліному Колмогорова-Габор. Для забезпечення структурної адаптації моделі під різні сценарії застосування системи, в модель введено показник рівня взаємозамінності підсистем у системі. Як параметр ресурсної адаптації використаний сумарний ресурс системи. Побудовані просторові траєкторії руху точок оптимальних рішень залежно від параметрів структурної та ресурсної адаптації в просторі ресурсів підсистем та корисного ефекту системи. Розроблена логістична модель втрат від атак залежно від рівня ресурсного забезпечення захисту. Для кожного рівня важкості атак визначений оптимальний рівень витрат на захист, який приймає значення від 0 до 12.5% від бюджету ІТ організації. Помилки у визначенні оптимальної величини видатків на захист ведуть до зростання втрат від атак. Визначено, що у разі важкості атак більше 12%, помилки оптимальних витрат на захист у бік збільшення є більш безпечними, ніж помилки в бік зменшення від оптимального значення. За умови важкості атак менше 12% помилки в бік зменшення від оптимального значення є більш безпечними.

Ключові слова: модель, прогноз, оптимізація, інформаційна система, захист, функціональна стійкість, сценарій, адаптація, витрати ресурсів, інциденти.

О.О. Bakaiev, V.L. Shevchenko, V.A. Chystiakov, O.V. Derhylova

SCENARIO-ADAPTIVE MODEL OF OPTIMIZATION OF RESOURCE EXPENDITURES FOR THE SYSTEM OF ENSURING THE FUNCTIONAL STABILITY OF THE INFORMATION SYSTEM BY THE CRITERION OF MINIMUM LOSSES FROM INCIDENTS

The paper develops a scenario-adaptive model for optimizing resource costs for the system of ensuring the functional stability of the information system based on the criterion of minimum losses from incidents. The concept of functional stability is adopted as the main metric of quality criteria, since it is difficult to completely eliminate incidents, but it is quite realistic to ensure the functional stability of the system, even in the presence of incidents. The purpose of the paper is to develop multidimensional models of beneficial effects and functional stability of systems with the properties of scenario adaptation for further optimization of costs for information system protection systems. As the main component of the model of functional stability of information systems, it is proposed to use a scalar convolution based on the Kolmogorov-Gabor polynomial. To ensure structural adaptation of the model to different scenarios of system application, an indicator of the level of interchangeability of subsystems in the system is included into the model. The total system resource is used as a resource adaptation parameter. Spatial trajectories of the movement of optimal solution points have been constructed depending on the parameters of structural and resource adaptation in the space of subsystem resources and the useful effect of the system. A logistic model of losses from attacks has been developed, depending on the level of resource provision of protection. For each level of attack severity, the optimal level of protection costs has been determined, which takes a value from 0 to 12.5% of the IT organization's budget. Errors in determining the optimal amount of protection costs lead to an increase in losses from attacks. It has been determined that when the severity of attacks is more than 12%, errors in the optimal protection costs in

the direction of increase are safer than errors in the direction of decrease from the optimal value. When the severity of attacks is less than 12%, errors in the direction of decrease from the optimal value are safer.

Keywords: model, forecast, optimization, information system, protection, functional stability, scenario, adaptation, resource consumption, incidents.

Вступ.

Розвиток інформаційних технологій супроводжується розвитком різних комп'ютерних інцидентів. Колись це були експерименти або жарти, як, наприклад, перший мережевий вірус Creeper та перший антивірус Reaper, які розповсюджувалися в мережі ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) в 1971-1972 [1]. Підвищення кількісних можливостей зловмисного програмного забезпечення (ПЗ) призводило до нових якісних ефектів щодо порушення функціональності інформаційних систем (ІС) та економічних наслідків атак. Цьому сприяла поява вірусів, катастрофічних за наслідками їхньої активності. Наприклад, вірус ILOVEYOU (2000) [2] залучав до процедури розповсюдження соціальну інженерію через транспорт електронної пошти, яка на той час вже набула широкого розповсюдження серед користувачів ІС. Інші віруси того періоду спиралися на певні види вразливостей мережевого ПЗ, що забезпечувало їм миттєве розповсюдження всією доступною мережею. Наприклад, для Code Red (2001) [3] мова йшла про годину-дві, а для SQL Slammer (2003) [4] – вже про хвилини.

Звертаємо увагу на те, що, і зловмисне, і незловмисне ПЗ використовують інформаційні ресурси (ІР) інформаційних систем, в яких вони розповсюджуються. В результаті може виникати брак інформаційних ресурсів для виконання основних функцій ІС. Виникає небезпека для функціональної стійкості (ФС) системи. Інцидент стає інцидентом функціональної стійкості (ІФС). У той же час ІФС може виникати також і від незловмисних причин, наприклад, від помилок персоналу.

Зростання можливостей вірусів було б неможливим без зростання можливостей ІС та без появи нової якості та нової кількості ІР. Чим більше нарощувалась функціональність ІС, тим більше з'являлось нових можливостей для реалізації ІФС. Коли інформаційні системи вийшли на глобальний

рівень, то загрози ІФС також вийшли на глобальний рівень. Почали з'являтися фінансово-мотивовані та ідеологічно-мотивовані атаки, а також атаки терористичного характеру. Це призводило до збільшення економічних збитків від атак та отримання наслідків від ІФС у всіх сферах діяльності людей. ІФС напряду впливають на імідж, організаційну, технологічну, фінансову стабільність бізнесу, а також вимагають витрат на відновлення та забезпечення захисту від атак на майбутнє [5]. Сьогодні ситуація не змінилася, а стала ще складнішою.

Таким чином, розвиток систем забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем (СЗ ФС ІС) є актуальною задачею. Важливою актуальною складовою цієї задачі є оптимізація витрат на створення та експлуатацію СЗ ФС ІС, а також забезпечення їх адаптації відповідно до зміни умов функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основним інструментом синтезу СЗ ФС ІС, є моделі, які дозволяють прогнозувати стан СЗ ФС ІС та знаходити оптимальні рішення щодо їх проектування та експлуатації, зокрема щодо їх ресурсного забезпечення.

Системи складаються із підсистем. Тому модель має бути багатовимірною. На входи підсистем надходять певні ресурси і перетворюються на корисні ефекти. Далі, корисні ефекти підсистем надходять на вхід наступного рівня ієрархії, де вони використовуються як вхідні ресурси системи, яка, в свою чергу, перетворює їх на корисний ефект системи.

Для створення моделі такого багатовимірного процесу потрібний інструмент агрегації корисних ефектів, що надходять до системи від підсистем. Одним із розповсюджених інструментів такої агрегації є скалярні згортки.

Адитивна скалярна згортка має вигляд

$$Ef(R) = \sum_{i=1}^n \beta_i Ef_i. \quad (1)$$

де n – кількість підсистем, i – номер підсистеми, Ef_i – корисний ефект, що надходить від певної підсистеми, β_i – ваговий коефіцієнт, що визначає важливість підсистеми. Завдяки простоті, адитивні згортки використовують у створенні різних багатовимірних моделей, наприклад, у багатофакторному визначенні функцій корисності [6] (Fishburn P.C.). Недолік: неможливість моделювати систему з частково взаємозамінними підсистемами – тільки з повністю взаємозамінними.

Мультиплікативна згортка дозволяє моделювати системи з частковою взаємозамінністю підсистем. Наприклад, за певних умов під час багатокритеріального ранжування, мультиплікативна згортка показує більшу адекватність, аніж адитивна [7] (Mohammadi M., Rezaei J.). В задачі стратегічного обрання ERP-систем незалежність мультиплікативної згортки від масштабу критеріїв усуває потребу в нормалізації критеріїв [8] (Goman M., Koch S.). У дослідженні індексу розвитку людського потенціалу ООН для Азіатсько-Тихоокеанського регіону мультиплікативна згортка також показала гарну адекватність [9] (Zhou P., Ang B.W., Zhou D.Q.). Недолік: мультиплікативна згортка реалізує модель часткової взаємозамінності підсистем із некерованим рівнем взаємозамінності. Реальні системи можуть мати різну взаємозамінність підсистем. Тому виникає потреба моделей, які дозволяють враховувати рівень взаємозамінності.

Поліном Колмогорова-Габора об'єднує властивості адитивної та мультиплікативної згорток, що могло би надати ще один рівень часткової взаємозамінності підсистем. Поліном широко відомий із методу групового врахування аргументу Івахненка О.Г. [10, 11] і успішно використовується досі [12, 13]. Недолік: новий рівень часткової взаємозамінності в даному поліномі відрізняється від рівня часткової взає-

мозамінності мультиплікативної згортки, але є також фіксованим.

Загальним недоліком усіх розглянутих досліджень є неможливість плавного регулювання рівня взаємозамінності підсистем у моделі системи, що потребує адаптації під різні сценарії функціонування.

Мета роботи – розвиток багатовимірних моделей корисних ефектів та функціональної стійкості систем із властивостями сценарної адаптації для подальшої оптимізації витрат на системи захисту інформаційних систем.

Виклад основного матеріалу.

Дослідження щодо оптимізації витрат ресурсів виконано для ІС на прикладі СЗ ФС ІС.

Модель ФС ІС має вигляд

$$FS = Ef_{system} = Ef_{system}(R), \quad (2)$$

де FS – ФС ІС, Ef_{system} – корисний ефект ІС, R – сумарний ресурс ІС. Відповідна розкрита модель на основі поліному Колмогорова-Габора має вигляд

$$Ef_{system} = k_{Add} \sum_{i=1}^n \beta_i Ef_i + (1 - k_{Add}) \prod_{i=1}^n Ef_i^{\beta_i}, \quad (3)$$

де $k_{Add} \in [0,1]$ – коефіцієнт взаємозамінності підсистем, β_i – ваговий коефіцієнт важливості підсистеми для створення корисного ефекту ІС в цілому, $Ef_i = Ef_i(R_i)$ – корисний ефект підсистеми, який логістично залежить від вхідного ресурсу R_i , n – кількість підсистем у системі, i – номер підсистеми. Вагові коефіцієнти нормуються таким чином, щоб відповідати умові

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 1, \quad (4)$$

Сумарний ресурс ІС, що розподіляється між підсистемами, в кожному обчислювальному експерименті відповідає умові

$$R_{sum} = \sum_{i=1}^3 R_i = const. \quad (5)$$

Водночас ресурси підсистем є невід'ємними величинами.

За критерій якості використовуємо максимум корисного ефекту СЗ ФС ІС при оптимальному розподілі обмеженого сумарного ресурсу системи між складовими.

$$Ef_{system\ opt} = \max_{R_i, i = \overline{1, n}} (Ef_{system}). \quad (6)$$

Основними керуючими впливами щодо адаптації системи під різні умови та сценарії використання є:

k_{Add} – рівень взаємозамінності підсистем у системі;

R_{sum} – величина сумарного ресурсу системи.

Обчислювальні експерименти були виконані за різних поєднань значень даних керівних впливів. Кожному варіанту (k_{Add}, R_{sum}) відповідала властива якісна картина поверхні оптимальних рішень $Ef_{system}(R_1, R_2)$, за допомогою якої знаходилися оптимальні розподіли ресурсів системи R_{sum} між підсистемами ($R_1, R_2, R_3 = R_{sum} - R_1 - R_2$).

За умови повної взаємозамінності підсистем ($k_{Add} = 1$) оптимальне рішення знаходиться на межі області припустимих значень ресурсів підсистем (рис.1), що збільшує рівень корисного ефекту (ФС), але призводить до відключення від ресурсів менш ефективної підсистеми.

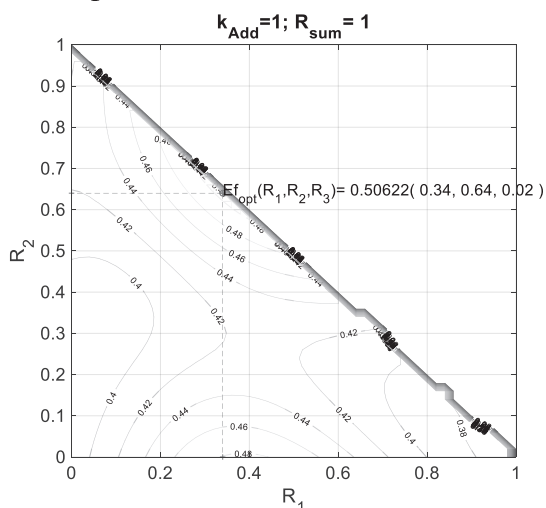


Рис. 1. Залежність $Ef_{system}(R_1, R_2)$ при $k_{Add} = 1, R_{sum} = 1$.

Зменшення рівня взаємозамінності підсистем веде до зменшення рівня корисного ефекту системи, але також - до залучення в роботу всіх підсистем, що сприяє стабільності роботи системи у несприятливих умовах (рис.2, 3).

Результати повного обчислювального експерименту узагальнені на рис.4.

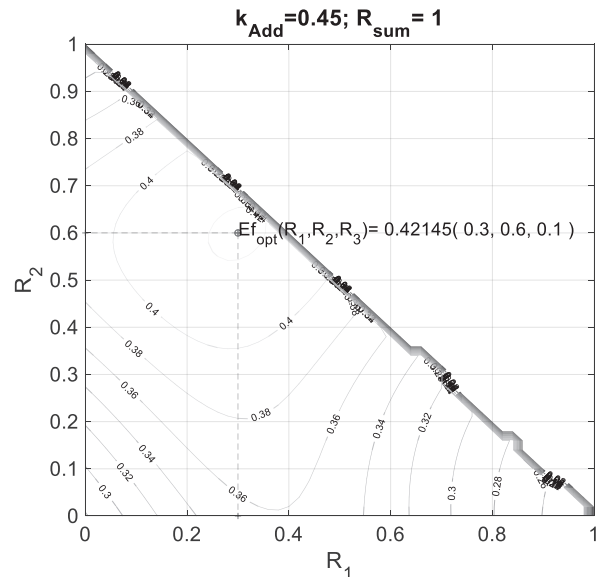


Рис. 2. Залежність $Ef_{system}(R_1, R_2)$ при $k_{Add} = 0.45, R_{sum} = 1$.

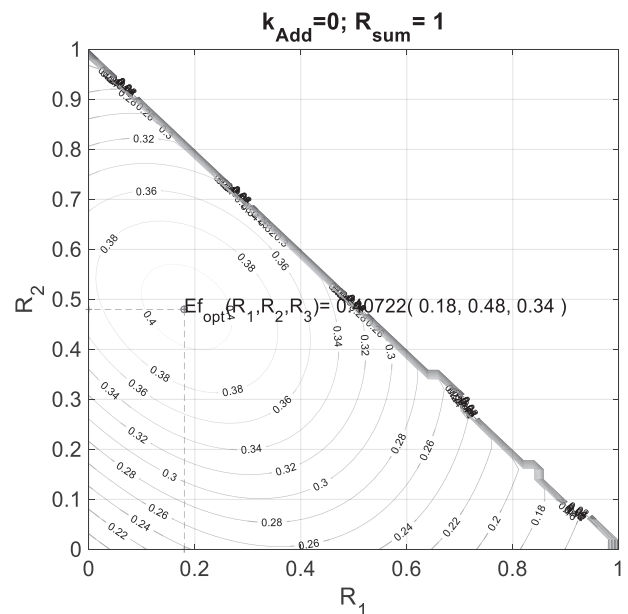


Рис. 3. Залежність $Ef_{system}(R_1, R_2)$ при $k_{Add} = 0, R_{sum} = 1$.

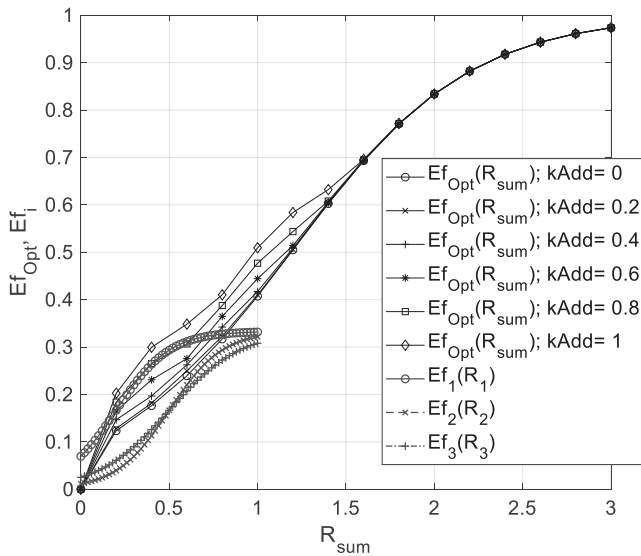


Рис. 4. Оптимальні залежності корисних ефектів окремих підсистем та СЗ ФС ІС залежно від R_{sum} та k_{Add} .

Адаптація СЗ ФС ІС до різних сценаріїв роботи

На основі результатів розглянутого обчислювального експерименту будемо траєкторії оптимальних рішень $Ef_{system}(R_{1opt}, R_{2opt})$ за різних k_{Add} , R_{sum} в різних проєкціях на координатні площини: $Ef_{system}(R_{1opt})$ (рис.5), $Ef_{system}(R_{2opt})$ (рис.6), $R_{2opt}(R_{1opt})$ (рис.7). Лінії на рисунках відповідають постійним значенням k_{Add} .

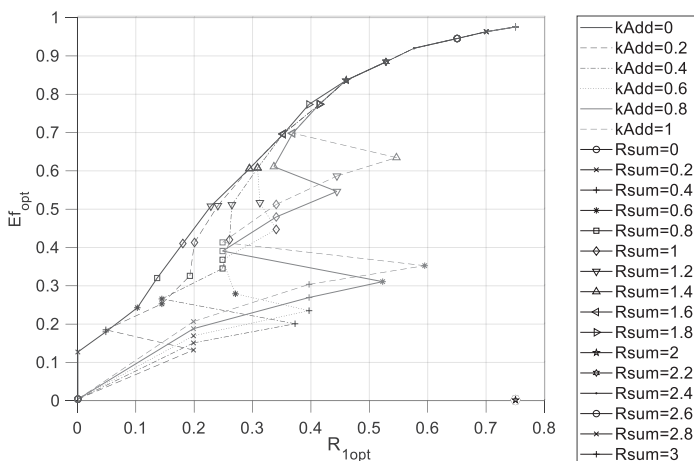


Рис. 5. $Ef_{system}(R_{1opt})$ при різних k_{Add} , R_{sum} .

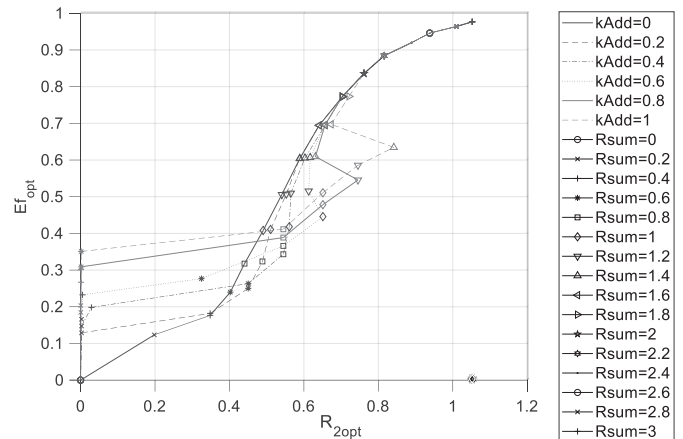


Рис. 6. $Ef_{system}(R_{2opt})$ при різних k_{Add} , R_{sum} .

Як бачимо, зменшення k_{Add} веде до більш плавного характеру траєкторій оптимальних рішень. Менш плавний характер ліній, що спостерігається у разі збільшення k_{Add} , говорить про те, що система отримує і реалізовує можливість різких перемикань обмежених ресурсів ($R_{sum} < 1.6$) між різними підсистемами з метою максимальної активації найбільш ефективних підсистем.

Повне відключення підсистем задля збільшення корисного ефекту має свої негативні наслідки, а саме виведення підсистем із активного стану та ризику нестабільності процесів переключень.

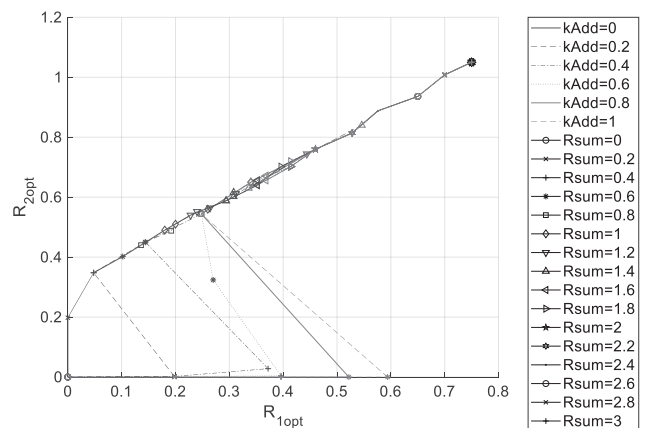


Рис. 7. Залежність $R_{2opt}(R_{1opt})$ за різних k_{Add} , R_{sum} .

На етапі експлуатації СЗ ФС ІС зміна структурних властивостей системи (структурна сценарна адаптація) шляхом зміни k_{Add} є досить ризикованою. Тому перевага на цьому етапі надається ресурсній адаптації шляхом зміни R_{sum} .

На етапі проєктування СЗ ФС ІС структурна сценарна адаптація є основною і абсолютно виправданою. Оскільки мова йде про зміну k_{Add} , то представимо траєкторії оптимальних рішень у вигляді ліній, для яких постійною залишається R_{sum} (рис.8). Структурна адаптація відбувається шляхом руху вздовж ліній. Ресурсна адаптація – шляхом переходів між лініями.

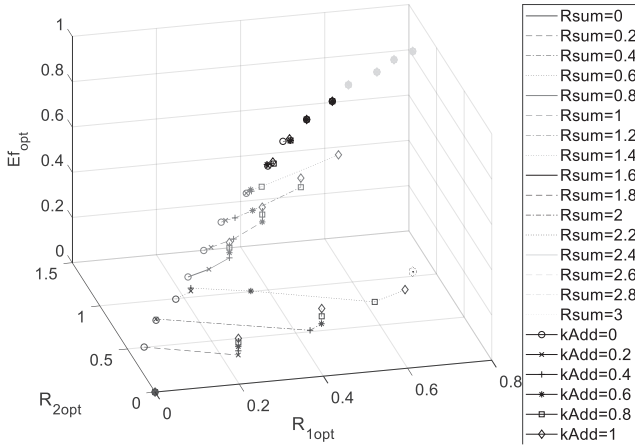


Рис. 8. $E_{f_{system}}(R_{1opt}, R_{2opt})$ за різних k_{Add}, R_{sum} .

Зафіксуємо функціональне призначення параметрів адаптації:

k_{Add} – параметр **структурної адаптації** системи, оскільки він міняє структуру моделі в бік властивостей адитивної або мультиплікативної згортки.

R_{sum} – параметр **ресурсної адаптації** системи.

За умови $R_{sum} \geq 1.6$ зміна k_{Add} практично не впливає на якісні та чисельні показники $E_{f_{system}}$. Тобто структурна адаптація недоступна. Натомість доступною є ресурсна адаптація.

Якщо ж $R_{sum} < 1.6$, доступні обидва види адаптації.

Приклад.

Нехай корисний ефект системи є неприпустимо низьким на рівні менше 0.34. Це могло трапитися у разі ресурсного забезпечення адитивної системи ($k_{Add} = 1$) на рівні $R_{sum}=0.55$ або мультиплікативної ($k_{Add} = 0$) на рівні $R_{sum}=0.85$ (рис.4).

Розглянемо систему з такими параметрами адаптації $k_{Add} = 0$, $R_{sum}=0.6$. План надходження додаткових ресурсів +0.25, що мало би забезпечити сумарний

ресурс $R_{sum}=0.85$. Або ми можемо витратити додаткові ресурси на збільшення величини k_{Add} шляхом заміни закупівлі вузькоспеціалізованого вискоєфективного обладнання на закупівлю менш ефективного, але більш універсального. Так само можна було б поміняти програми підготовки персоналу для отримання більш універсальних фахівців ціною зменшення глибини вузькоспеціалізованої підготовки. Означені заміни пакету закупівлі вимагатимуть витрат ресурсів на рівні 0.08 та забезпечують зростання параметра структурної адаптації до $k_{Add} = 0.4$.

За цього рівня k_{Add} для забезпечення мінімально припустимого рівня корисного ефекту потрібне $R_{sum} = 0.77$, яке можна отримати із ресурсів що залишились від закупівлі: $0.77=0.6+0.17$. В результаті виконана структурна адаптація системи, що збільшила її стійкість до подальших небезпечних ситуацій низького ресурсного забезпечення.

Подібна структурна адаптація має сенс при $0.55 \leq R_{sum} \leq 1.6$. Вище та нижче цього діапазону має сенс тільки ресурсна адаптація.

Після ідентифікації параметрів СЗ ФС ІС на основі моделі (3) та виконання сценарної адаптації системи шляхом визначення відповідних її властивостей, відбувається перехід до наступної моделі.

Модель ФС в одиницях втрат від ІФС має вигляд

$$FS = -L_{sum}, \quad (7)$$

$$L_{sum} = L_{inc} + L_{after} + L_{recovery} + L_{error} + BIS + B_{IR}, \quad (8)$$

де L_{sum} – сумарні втрати від ІФС, L_{inc} – безпосередні втрати від ІФС, L_{after} – втрати від наслідків ІФС, $L_{recovery}$ – втрати на відновлення ФС ІС, L_{error} – втрати від помилок персоналу в стресових умовах ІФС, BIS – бюджет ІТ на забезпечення ФС ІС, B_{IR} – витрати ІР на функціонування СЗ ФС ІС. Як критерій якості виступає мінімум сумарних втрат внаслідок ІФС

$$L_{sumOpt} = \min_{\Omega_{BIS}} L_{sum}(BIS), \quad (9)$$

де BIS – бюджет захисту, Ω_{BIS} – область припустимих значень BIS .

Водночас ІТ-бюджет організації лінійно залежить від бюджету організації. Фінансові витрати та фінансові втрати вимірюються у відсотках від частини бюджету організації, що витрачається на ІТ.

Результати моделювання (рис.9) показують, що за малих BIS , втрати від атак зменшуються повільно. Далі спостерігається стрімке падіння втрат, практично до нуля. Сумарні втрати залежно від витрат на захист, мають явний мінімум, який визначає оптимальну величину витрат на захист.

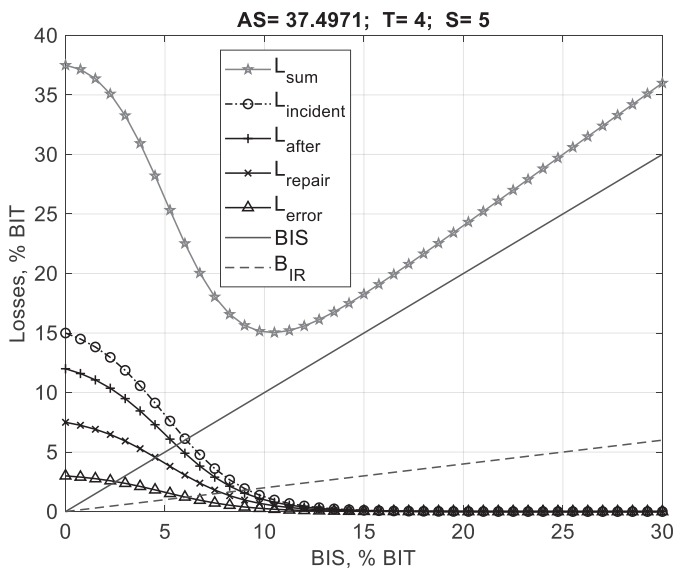


Рис. 9. Залежність втрат від атак з рівнем важкості 37.5%.

Результати моделювання втрат, за умови оптимальних витрат на захист, для всіх можливих рівнів важкості атак AS представлені на рис.10. Оптимальна величина витрат на захист BIS дорівнює нулю при важкості атак $AS \leq 12\%$. Втрати водночас зростають від 0 до 12.2% пропорційно AS . При $AS > 12\%$ оптимальні витрати на захист BIS плавно зростають від 7.8 до 12.5%.

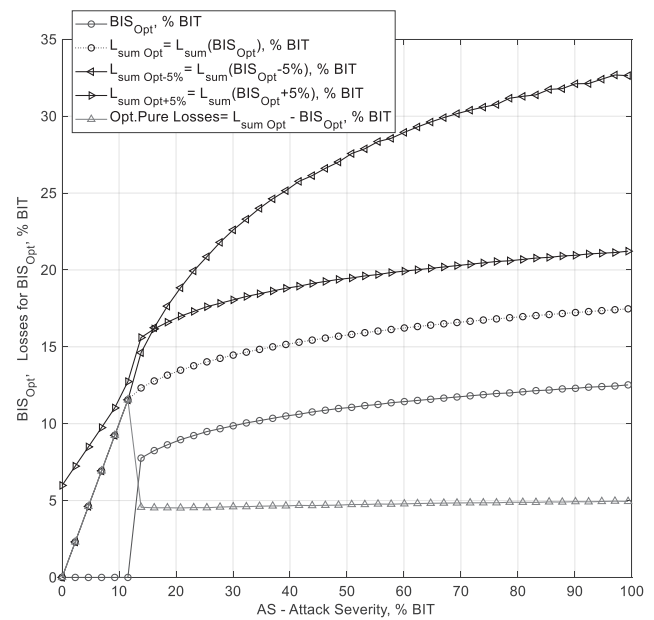


Рис. 10. Оптимальні витрати на захист та втрати від атак за умови оптимальних витрат на захист

У разі оптимального BIS втрати від атак зростають від 0 до 17.5% при зростанні AS від 0 до 100%.

У разі неоптимального BIS (на 5% менше оптимуму) втрати від атак плавно зростають від 0 до 32.5% (різниця з варіантом оптимального BIS – від 0 до 15%).

За неоптимального BIS (на 5% більше оптимуму) втрати від атак плавно зростають від 0 до 21.5% (різниця з варіантом оптимального BIS – від 1 до 6%, на більшій частині діапазону дорівнює близько 3.6%).

Виділимо основні діапазони рівнів важкості атак, які викликають схожі закономірності щодо помилок визначення оптимального BIS .

$16\% < AS < 100\%$. Помилка в бік збільшення BIS від оптимального рівня є більш безпечною, ніж помилка в бік зменшення.

$AS = 16\%$. Обидва види помилок призводять до однакових втрат від атак, які на 3.3% більше, ніж при оптимальному BIS .

$0\% < AS < 16\%$. Закономірність змінюється. Помилка в бік збільшення BIS від оптимального рівня стає більш небезпечною, ніж помилка в бік зменшення.

Результати моделювання показують, що оптимальні витрати на захист можуть змінюватися від 0 до 12.5% залежно від рівня важкості атак у діапазоні від 0 до 100%.

Висновки

У роботі розроблено сценарно-адаптивну модель оптимізації витрат ресурсів на систему забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи з критерієм мінімуму втрат від інцидентів.

Поняття функціональної стійкості взято за основну метрику критеріїв якості, оскільки важко повністю усунути інциденти. Натомість цілком реально забезпечити функціональну стійкість системи, навіть за наявності інцидентів.

Основним недоліком існуючих досліджень щодо створення багатовимірних моделей є неможливість плавного регулювання рівня взаємозамінності підсистем в моделі системи, що потрібно для адаптації під різні сценарії функціонування.

Як основну складову модель функціональної стійкості інформаційних систем запропоновано використовувати скалярну згортку на основі поліному Колмогорова-Габора.

Для забезпечення структурної адаптації моделі під різні сценарії застосування системи, в модель введений показник рівня взаємозамінності підсистем у системі.

За параметр ресурсної адаптації використаний сумарний ресурс системи.

Побудовані просторові траєкторії руху точок оптимальних рішень залежно від параметрів структурної та ресурсної адаптації в просторі ресурсів підсистем та корисного ефекту системи.

Розроблена логістична модель залежності втрат від атак з огляду на рівень ресурсного забезпечення захисту. Для кожного рівня важкості атак визначено оптимальний рівень витрат на захист, якій приймає значення від 0 до 12.5% від бюджету ІТ організації.

Помилки у визначенні оптимальної величини видатків на захист ведуть до зростання втрат від атак. Визначено, що у разі важкості атак понад 12%, помилки оптимальних витрат на захист в бік збільшення є безпечнішими, ніж помилки в бік зменшення від оптимального значення. У разі важкості атак менше 12% помилки в бік зменшення від оптимального значення є більш безпечними.

Напрямом подальших досліджень є розширення переліку параметрів сценарної адаптації моделей.

Література

1. Roberts E. S. History of Distributed Computing. – Stanford University, Department of Computer Science. – URL: https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/distributed-computing/html/body_history.html.
2. CERT Coordination Center. CERT Advisory CA-2000-04: Love Letter Worm. The RISKS Digest. – 2000. – Vol. 20, Issue 88. – URL: <https://catless.ncl.ac.uk/risks/20/88>.
3. Moore D., Shannon C. The Spread of the Code-Red Worm (CRv2). – San Diego : Center for Applied Internet Data Analysis, University of California San Diego. – 2001. – URL: https://www.caida.org/archive/code-red/coderedv2_analysis/.
4. Moore D., Paxson V., Savage S., Shannon C., Staniford S., Weaver N. The Spread of the Sapphire/Slammer Worm. – San Diego : CAIDA; University of California San Diego; International Computer Science Institute; University of California Berkeley. – 2003. – URL: <https://www-old.caida.org/publications/papers/2003/sapphire/sapphire.html>.
5. Bartock M., Cichonski J., Souppaya M., Smith M. C., Witte G., Scarfone K. Guide for Cybersecurity Event Recovery. NIST Special Publication 800-184. – Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2016. – 53 p. – DOI: 10.6028/NIST.SP.800-184. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-184> – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-184.pdf>.
6. Fishburn P.C. Methods of Estimating Additive Utilities. Management Science. – 1967. – Vol. 13, No. 7. – P. 435–453. – DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.13.7.435> . – URL: <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/mnsc.13.7.435>.
7. Mohammadi M., Rezaei J. Ratio Product Model: A Rank-Preserving Normalization-Agnostic Multi-Criteria Decision-Making Method. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. – 2023. – Vol. 30, No. 5–6. – P. 163–172. – DOI: <https://doi.org/10.1002/mcda.1806>.
8. Goman M., Koch S. Multiplicative Aggregation in Managerial Multi-Attribute Decision Making. International Journal of Multicriteria

- Decision Making. – 2021. – Vol. 8, No. 3. – P. 233–255. – DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMCDM.2021.119439> . – URL: <https://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=119439> .
9. Zhou P., Ang B.W., Zhou D.Q. Weighting and Aggregation in Composite Indicator Construction: A Multiplicative Optimization Approach. *Social Indicators Research*. – 2010. – Vol. 96, No. 1. – P. 169–181. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-009-9472-3> – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-009-9472-3> .
10. Ivakhnenko A.G. Heuristic Self-Organization in Problems of Engineering Cybernetics. *Automatica*. – 1970. – Vol. 6, No. 2. – P. 207–219. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(70\)90092-0](https://doi.org/10.1016/0005-1098(70)90092-0) . – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0005109870900920> .
11. Ivakhnenko A.G. Polynomial theory of complex systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, - 1971. - 4, 364–378. DOI: 10.1109/TSMC.1971.4308320 – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4308320> .
12. Achite M., Katipoğlu O.M., Kartal V., Sarıgöl M., Jehanzaib M., Gül E. Advanced Soft Computing Techniques for Monthly Streamflow Prediction in Seasonal Rivers. *Atmosphere*. – 2025. - 16(1), 106. – DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos16010106>
13. Marateb H., Norouzirad M., Tavakolian K., Aminorroaya F.O., Mohebbian M., Mañanas M.Á., Lafuente S.R., Sami R., Mansourian M. Predicting COVID-19 Hospital Stays with Kolmogorov–Gabor Polynomials: Charting the Future of Care. *Information*. – 2023. - 14(11), 590. – DOI: <https://doi.org/10.3390/info14110590> .

Дата першого надходження до видання:
12.07.2026

Внутрішня рецензія отримана: 01.08.2026

Зовнішня рецензія отримана: 03.08.2026

Дата прийняття до друку: 10.08.2026

Дата публікації: 29.08.2026

Про авторів:

¹*Бакаєв Олег Олександрович*,
аспірант
Bakaiev Oleg,
PhD student
<http://orcid.org/0009-0004-5427-1196>

^{1,2}*Шевченко Віктор Леонідович*,
д.т.н., професор
Shevchenko Victor,
Ph.D. (technical sciences), professor
<http://orcid.org/0000-0002-9457-7454>

¹*Чистяков Валерій Анатолійович*,
кандидат технічних наук,
Chystyakov Valeriy,
Ph.D. (technical sciences)
<http://orcid.org/0009-0000-6019-8352>

¹*Дергильова Олена Вікторівна*,
кандидат технічних наук, с.н.с.
Derhylova Olena,
Ph.D. (technical), senior researcher
<http://orcid.org/0000-0003-3916-1744>

Місце роботи авторів:

¹Інститут програмних систем Національної академії наук України
Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine

²Київський столичний університет імені Бориса Грінченка
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University
E-mail: gii2014@ukr.net