ІНСТИТУТ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова праця

на правах рукопису

БАКАЄВ ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.056:004.942:519.852

ДИСЕРТАЦІЯ

(Анотація)

Моделі та методи сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційної системи

Спеціальність 122 «Комп’ютерні науки»

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.О. Бакаєв

Науковий керівник: ШЕВЧЕНКО Віктор Леонідович, доктор технічних наук, професор

Київ–2026

АНОТАЦІЯ

Бакаєв О.О. Моделі та методи сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційної системи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки. – Інститут програмних систем Національної академії наук України. Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробці та вдосконаленню моделей та методів підтримки керівних рішень щодо сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційної системи.

Розвиток інформаційних систем є ключовим фактором розвитку технологій, економіки та суспільства. Порушення роботи інформаційних систем ведуть до суттєвих втрат у всіх сферах. Кількість інцидентів в інформаційній сфері і втрат від них постійно зростає. В більшості випадків, небезпеки випереджують засоби захисту. Неможливо, щоб інцидентів не було взагалі. Але можна мінімізувати втрати від них. При всіх варіантах протидії головна задача інформаційної системи – виконувати свої функції. Тому, актуальним стає питання забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем. Крім оптимальних керівних рішень, для цього потрібні ресурси, які теж мають бути оптимальними. Таким чином, дослідження щодо ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційних систем є **актуальними**.

Мета дисертаційної роботи: підвищити ефективність систем забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи.

Об'єкт дослідження: процес забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем.

Предмет дослідження: моделі та методи сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційної системи.

В дисертаційному дослідженні розвинуті моделі і методи сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційної системи, які складають теоретичній базис розвитку відповідних прикладних

інформаційних технологій. Математична модель включає логістичні залежності розвитку, згортки Колмогорова-Габора, обмеження та критерії якості у вигляді максимуму корисного ефекту системи забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи, а також у вигляді мінімуму втрат від атак та інцидентів.

У першому розділі дисертаційної роботи проаналізовані тенденції зростання втрат від інцидентів функціональної стійкості інформаційних систем. Виконаний аналіз існуючих досліджень за такими напрямами: функціональна стійкість, лінійні, експоненціальні та логістичні моделі розвитку систем, багатовимірні моделі, що використовують адитивні та мультиплікативні згортки, моделі на основі поліному Колмогорова-Габора, методи оптимізації (евристичні, повного перебору, градієнтні), оптимізація розподілу ресурсів, оптимізація ресурсного забезпечення захисту інформаційних систем.

Недоліком розглянутих досліджень є неврахування рівня важкості атак та відсутність дослідження залежності рівня втрат від значень параметрів системи захисту. Також, не були досліджені втрати функціональної стійкості. Виявлено протиріччя між потребою у методичному апараті підтримки рішень щодо сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційної системи і відсутністю єдиного підходу, який би гарантував отримання найкращого рішення, з урахуванням всіх релевантних факторів. Виходячи з протиріччя, розвиток моделей та методів сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційної системи є актуальним. Це дозволило сформулювати наукове завдання: «розробка комп’ютерних моделей та методів сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційної системи».

У роботі були отримані нові наукові результати:

1. Подальший розвиток моделей корисних ефектів та функціональної стійкості інформаційних систем на основі скалярної згортки Колмогорова-Габора.

2. Набув подальшого розвитку метод знаходження оптимальних видатків на систему забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи з

урахуванням важкості зовнішніх впливів на систему та критичності інформаційних ресурсів для організації.

3. Набув подальшого розвитку метод сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційних систем.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці моделей та методів, на основі яких були розроблені прикладні рішення та програмні системи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем.

Розроблене програмне забезпечення для оптимізації розподілу ресурсів між підсистемами систем забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи, які мають різні рівні взаємозамінності підсистем. Розроблене програмне забезпечення оптимізації витрат на забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи, яка знаходиться в умовах негативних впливів різного рівня важкості. Визначені умови, при яких формальна оптимізація, практично, не дає виграшу і практична задача оптимізації розподілу незадовільного ресурсу між підсистемами замінюється на практичну задачу збільшення сумарного ресурсу системи захисту.

Результати моделювання підтверджують загальні діапазони рекомендованих величин бюджетів захисту від 10 до 20-22% бюджету ІТ, які пропонують світові кращі практики і рекомендації щодо величин від 7.5 до 12.5% бюджету ІТ, які були запропоновані експертами українських ІТ-компаній. На основі результатів моделювання, за допомогою логістичної моделі, визначено, що оптимальні витрати на захист можуть змінюватися від 0 до 12.5% в залежності від рівня важкості атак, що змінюється від 0 до 100%.

Запропонований метод оптимізації витрат на захист, надає результати, перевага яких, у порівнянні з методом трьох точок варіюється в діапазоні від 0 до 26.5%, у порівняння з методом рівномірного розподілу – від 5 до 17%, у порівнянні з методом бета-розподілу – від 3 до 16%.

Результати досліджень прийняті до впровадження в ТОВ «ХЕНДЕЛ», ТОВ «ФОРТЕРА СІСТЕМС».

У другому розділі дисертаційної роботи викладений перший науковий результат: «Подальший розвиток моделей корисних ефектів та функціональної

стійкості інформаційних систем на основі скалярної згортки Колмогорова-Габора».

У якості базових визначені логістичні моделі розвитку. Розглянуті варіанти декомпозиції системи на підсистеми. У якості основної прийнята декомпозиція за функціональною ознакою (підсистеми виявлення атак за сигнатурою, підсистеми виявлення атак «нульового дня», підсистеми протидії атакам). Запропонована багатовимірна модель корисного ефекту системи на основі згортки Колмогорова-Габора (Науковий результат 1). Для встановлення рівня взаємозамінності підсистем, запропоновано використовувати вагові коєфіцієнти перед адитивною та мультиплікативною складовими цієї моделі,. Величини корисних ефектів та вхідних ресурсів запропоновано вимірювати у відсотках від нормативно задовільних величин або від асимптотично максимальних. Градації аналогічні університетській шкалі ECTS. Метрикою функціональної стійкості, в цьому блоці досліджень, є корисний ефект системи забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи.

Для виявлення якісного характеру оптимальних рішень, методом повного перебору, були побудовані поверхні залежності корисного ефекту системи від ресурсного забезпечення підсистем. Уточнення рішень виконувалось градієнтним методом. Було визначено, що якісна картина суттєво залежить від коефіцієнту взаємозамінності підсистем та сумарного ресурсного забезпечення системи. Це дозволило реалізовувати структурну та ресурсну адаптацію системи при ресурсному забезпеченні нижче 1.6. Норма на забезпечення функціонування трьох підсистем складає 3 (якщо у відсотках, то це - те ж саме, що 300%). При ресурсному забезпеченні системи більше 1.6 мала сенс тільки ресурсна адаптація. При ресурсному забезпеченні системи менше 0.55 структурна адаптація можлива, але практичний сенс має тільки ресурсна адаптація.

При надлишковому ресурсному забезпеченні від 3 до 6 (при нормі 3) була виявлена зона квазііндиферентності щодо помилки в визначенні оптимального розподілу ресурсів між підсистемами. Це дозволило підсилити науковий результат 1 за рахунок керування функціональною стійкістю інформаційної системи у верхній частині діапазону корисних ефектів системи. Була обрана

непряма метрика функціональної стійкості у вигляді розміру зони припустимих помилок щодо величини оптимальних ресурсів підсистем.

Для наочності прийняття рішень щодо структурної та ресурсної адаптації системи до різних сценаріїв використання, були побудовані траєкторії оптимальних рішень в просторі ресурсів підсистем і корисного ефекту системи, при різних величинах коєфіцієнту взаємозамінності підсистем та величинах сумарного ресурсного забезпечення системи.

У третьому розділі дисертації викладений другий науковий результат: «Набув подальшого розвитку метод знаходження оптимальних видатків на систему забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи з урахуванням важкості зовнішніх впливів на систему та критичності інформаційних ресурсів для організації». Для цього була вдосконалена існуюча модель втрат організації від атак і інцидентів. Експоненціальна залежність була замінена на логістичну з можливістю адаптації параметрів системи захисту під поточні умови. В рамках дослідження була запропонована лінійна модель критичності, при якій критичність інформаційних ресурсів організації дорівнює відношенню частини бюджету організації, що іде на IT, до загального бюджету організації. Була вдосконалена модель втрат від атак і інцидентів в залежності від бюджету захисту. Дослідження проводилися при фіксованих значеннях рівня важкості атак та параметрів логістичних залежностей втрат від атак і інцидентів.

У четвертому розділі дисертації викладений третій науковий результат: «Набув подальшого розвитку метод сценарно-адаптивної ресурсної оптимізації функціональної стійкості інформаційних систем». Розглянуті прикладні задачі, в яких для зменшення обчислювальних витрат використаний градієнтний метод замість повного перебору варіантів. Деталізовані підходи щодо ресурсної та структурної адаптації щодо сценаріїв використання системи захисту. Запропонований евристичний підхід для визначення параметрів логістичних залежностей на основі статистичних даних. Запропонований аналітичний (матричний) метод визначення вагових коефіцієнтів моделі на основі згортки Колмогорова-Габора.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 22 наукові праці. Основні наукові результати викладені у 6 наукових статтях у фахових виданнях (4,5 бали), серед яких 1 стаття категорії А (Scopus), 3 статті в матеріалах конференцій, що мають ISSN та індексуються в Scopus, dblp, 9 публікацій, що додатково відображають вклад здобувача. За матеріалами виступів на 8 наукових конференціях опубліковано 9 тез доповідей.

Ключові слова: функціональна стійкість, модель, прогноз, регресія, оптимізація, інформаційна система, підтримка рішень, каузальний аналіз, великі дані, захист.

SUMMARY

Bakaiev O.O. Models and methods of scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of an information system. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 122 Computer Science. – Institute of Software Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development and improvement of models and methods of supporting management decisions regarding scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of an information system.

The development of information systems is a key factor in the development of technologies, economy and society. Violations of the work of information systems lead to significant losses in all areas. The number of incidents in the information sphere and losses from them is constantly growing. In most cases, dangers outpace the means of protection. It is impossible for incidents not to occur at all. But losses from them can be minimized. In all countermeasure options, the main task of the information system is to perform its functions. Therefore, the issue of ensuring the functional stability of information systems becomes relevant. In addition to optimal management decisions, this requires resources, which must also be optimal. Thus, research on resource optimization of the functional stability of information systems is relevant.

The purpose of the dissertation work: to increase the efficiency of systems for ensuring the functional stability of the information system.

The object of the research: the process of ensuring the functional stability of information systems.

The subject of the research: models and methods of scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of the information system.

The dissertation research developed models and methods of scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of the information system, which constitute the theoretical basis for the development of relevant applied information technologies. The mathematical model includes logistic dependences of development,

Kolmogorov-Gabor convolutions, constraints and quality criteria in the form of the maximum useful effect of the system ensuring the functional stability of the information system, as well as in the form of the minimum losses from attacks and incidents.

The first section of the dissertation analyzes the trends in the growth of losses from incidents of the functional stability of information systems. An analysis of existing research in the following areas is performed: functional stability, linear, exponential and logistic models of system development, multidimensional models using additive and multiplicative convolutions, models based on the Kolmogorov-Gabor polynomial, optimization methods (heuristic, exhaustive search, gradient), optimization of resource distribution, optimization of resource provision of information systems protection.

The disadvantage of the considered studies is the lack of consideration of the level of severity of attacks and the lack of research into the dependence of the level of losses on the values of the parameters of the protection system. Also, functional stability losses were not investigated. A contradiction was identified between the need for a methodological apparatus for supporting decisions on scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of an information system and the lack of a single approach that would guarantee obtaining the best solution, taking into account all relevant factors. Based on the contradiction, the development of models and methods for scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of an information system is relevant. This allowed us to formulate the scientific task: “development of computer models and methods for scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of an information system”.

The work obtained **new scientific results**:

1. Further development of models of useful effects and functional stability of information systems based on the Kolmogorov-Gabor scalar convolution.

2. The method of finding the optimal costs for the system for ensuring the functional stability of an information system, taking into account the severity of external influences on the system and the criticality of information resources for the organization, was further developed.

3. The method of scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of information systems has been further developed.

The practical significance of the results obtained lies in the development of models and methods, on the basis of which applied solutions and software systems for ensuring the functional stability of information systems have been developed.

Software has been developed to optimize the distribution of resources between subsystems of systems ensuring the functional stability of an information system, which have different levels of subsystem interchangeability. Software has been developed to optimize the costs of ensuring the functional stability of an information system, which is under negative influences of various levels of severity. Conditions have been determined under which formal optimization, in practice, does not yield any benefit and the practical task of optimizing the distribution of an unsatisfactory resource between subsystems is replaced by the practical task of increasing the total resource of the protection system.

The modeling results confirm the general ranges of recommended defense budgets from 10 to 20-22% of the IT budget, which offer global best practices and recommendations for values from 7.5 to 12.5% of the IT budget, which were proposed by experts from Ukrainian IT companies. Based on the modeling results, using a logistic model, it was determined that optimal defense spending can vary from 0 to 12.5% depending on the level of attack severity, which varies from 0 to 100%.

The proposed method of optimizing defense costs provides results, the advantage of which, compared to the three-point method, varies in the range from 0 to 26.5%, compared to the uniform distribution method - from 5 to 17%, compared to the beta distribution method - from 3 to 16%.

The research results have been adopted for implementation in LLC "HANDEL", LLC "FORTERA SYSTEMS".

The second section of the dissertation presents the first scientific result: “Further development of models of useful effects and functional stability of information systems based on the Kolmogorov-Gabor scalar convolution”.

Logistic models of development are defined as the basic ones. Variants of decomposition of the system into subsystems are considered. Decomposition by

functional feature (subsystems for detecting attacks by signature, subsystems for detecting “zero-day” attacks, subsystems for countering attacks) is adopted as the main one. A multidimensional model of the useful effect of the system is proposed based on the Kolmogorov-Gabor convolution (Scientific result 1). To establish the level of interchangeability of subsystems, it is proposed to use weight coefficients before the additive and multiplicative components of this model. It is proposed to measure the magnitudes of useful effects and input resources as a percentage of normatively satisfactory values or asymptotically maximum values. The gradations are similar to the university ECTS scale. The metric of functional stability, in this block of research, is the useful effect of the system ensuring the functional stability of the information system.

To identify the qualitative nature of optimal solutions, surfaces of the dependence of the useful effect of the system on the resource provision of subsystems were constructed using the exhaustive search method. The refinement of solutions was performed using the gradient method. It was determined that the qualitative picture significantly depends on the coefficient of interchangeability of subsystems and the total resource provision of the system. This allowed to implement structural and resource adaptation of the system with resource provision below 1.6. The norm for ensuring the functioning of three subsystems is 3 (if in percentage, then this is the same as 300%). With a resource provision of the system of more than 1.6, only resource adaptation made sense. With a resource provision of the system of less than 0.55, structural adaptation is possible, but only resource adaptation has practical meaning.

With excess resource provision from 3 to 6 (with norm 3), a zone of quasi-indifference was found with respect to the error in determining the optimal distribution of resources between subsystems. This allowed strengthening the scientific result 1 by controlling the functional stability of the information system in the upper part of the range of useful effects of the system. An indirect metric of functional stability was chosen in the form of the size of the zone of permissible errors with respect to the value of the optimal resources of subsystems.

To make it easier to make decisions on the structural and resource adaptation of the system to different usage scenarios, trajectories of optimal solutions were

constructed in the space of subsystem resources and the useful effect of the system, with different values of the coefficient of interchangeability of subsystems and values of the total resource provision of the system.

The third section of the dissertation presents the second scientific result: “The method of finding the optimal costs for the system for ensuring the functional stability of an information system, taking into account the severity of external influences on the system and the criticality of information resources for the organization, was further developed”. For this purpose, the existing model of losses of the organization from attacks and incidents was improved. The exponential dependence was replaced by a logistic one with the possibility of adapting the parameters of the protection system to current conditions. As part of the study, a linear criticality model was proposed, in which the criticality of the organization’s information resources is equal to the ratio of the part of the organization’s budget spent on IT to the total budget of the organization. The model of losses from attacks and incidents depending on the protection budget was improved. The research was conducted at fixed values of the level of severity of attacks and the parameters of the logistic dependencies of losses from attacks and incidents.

The fourth section of the dissertation presents the third scientific result: “The method of scenario-adaptive resource optimization of the functional stability of information systems has been further developed.” Applied problems are considered in which the gradient method is used to reduce computational costs instead of exhaustive search of options. Detailed approaches to resource and structural adaptation for scenarios of use of the protection system are presented. A heuristic approach is proposed for determining the parameters of logistic dependencies based on statistical data. An analytical (matrix) method for determining model weight coefficients based on the Kolmogorov-Gabor convolution is proposed.

Based on the results of the dissertation research, 22 scientific papers have been published. The main scientific results are presented in 6 scientific articles in professional publications (4.5 points), including 1 article of category A (Scopus), 3 articles in conference proceedings that have ISSN and are indexed in Scopus, dblp, 9 publications that additionally reflect the applicant's contribution. Based on the

materials of speeches at 8 scientific conferences, 9 abstracts of reports have been published.

Keywords: functional stability, model, forecast, regression, optimization, information system, decision support, causal analysis, big data, protection.