УДК 330.46:658.5:519.86

Македон В. В.
v_makedon@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8131-0235
д.е.н., професор кафедри маркетингу та логістики,
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро

Нечаєв Д. С.
nechaev012@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-8125-3703
здобувач третього (освітньо-наукового) рівня,
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ ОПТИМІЗАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОРТФЕЛЯ РІШЕНЬ АДАПТИВНОГО РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВА

Анотація. *В статті розроблено багатокритеріальну оптимізаційну модель формування портфеля управлінських рішень адаптивного розвитку підприємства з урахуванням ресурсних обмежень, економічної взаємозалежності заходів і параметричної невизначеності. Дослідження спрямоване на обґрунтування раціонального складу портфеля, інтенсивності реалізації альтернатив та послідовності їх впровадження. Застосовано економіко-математичне моделювання, багатокритеріальну оптимізацію, стохастичне програмування, сценарний аналіз і методи оцінювання ризиків. Сформовано модель ADPOM із дискретними та неперервними змінними управління. Для врахування взаємозалежності заходів використано матрицю синергетичних і конфліктних взаємодій. Стійкість портфельних рішень досліджено засобами робастної оптимізації та оцінювання хвостового ризику CVaR. Встановлено нелінійний характер залежності результативності адаптивного портфеля від доступного фінансування. Виявлено вплив ресурсних конфліктів, часових лагів і спадної граничної віддачі на вибір управлінських альтернатив. Обґрунтовано доцільність поєднання економічної результативності з контролем ризиків та резервуванням ресурсів. Визначено особливості зміни портфельної конфігурації за посилення параметричної невизначеності. Запропоновано інтегровану модель оптимізації адаптивного портфеля, яка поєднує економічну віддачу, зміну адаптивного стану підприємства, міжзаходову синергію, хвостовий ризик і робастність управлінських рішень. Розвинено методичний підхід до визначення граничної ефективності альтернатив та оцінювання цінності адаптивної оптимізації. Розроблений інструментарій призначений для підтримки управлінських рішень щодо цифровізації, виробничої модернізації, оптимізації ресурсів і логістичних процесів. Його застосування забезпечує порівняння альтернативних портфельних конфігурацій, узгодження інвестиційних пріоритетів із ресурсними можливостями підприємства та обґрунтування строків реалізації заходів. Запропонована модель також сприяє формуванню бюджетних резервів, своєчасному перегляду управлінських пріоритетів і підвищенню ринкової стійкості підприємства.*

Ключові слова: адаптивний розвиток підприємства, багатокритеріальна оптимізація, портфель управлінських рішень, робастна оптимізація, CVaR, параметрична невизначеність.

© Македон В. В., Нечаєв Д. С., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Makedon Viacheslav
v_makedon@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8131-0235
Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Marketing and Logistics,
Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro

Nechaiev Dmytro
nechaev012@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-8125-3703
Postgraduate, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION MODELLING OF A PORTFOLIO OF DECISIONS FOR ENTERPRISE ADAPTIVE DEVELOPMENT

Abstract. *The article develops a multi-criteria optimization model for constructing a portfolio of managerial decisions aimed at enterprise adaptive development, taking into account resource constraints, economic interdependencies among measures, and parametric uncertainty. The study focuses on substantiating the rational composition of the portfolio, the intensity of implementing alternative measures, and the sequence of their implementation. Economic and mathematical modelling, multi-criteria optimization, stochastic programming, scenario analysis, and risk assessment methods are employed. The Adaptive Development Portfolio Optimization Model (ADPOM) is developed using discrete and continuous decision variables. A matrix of synergistic and conflicting interactions is applied to account for interdependencies among managerial measures. The resilience of portfolio decisions is examined through robust optimization and Conditional Value at Risk (CVaR) assessment. A nonlinear relationship between adaptive portfolio performance and available financing is established. The effects of resource conflicts, time lags, and diminishing marginal returns on the selection of managerial alternatives are identified. The rationale for integrating economic performance with risk control and resource reservation is substantiated. Changes in portfolio configuration under increasing parametric uncertainty are examined. An integrated adaptive portfolio optimization model is proposed, combining economic returns, changes in the enterprise's adaptive state, synergies among managerial measures, tail risk, and the robustness of managerial decisions. A methodological approach to determining the marginal efficiency of alternatives and assessing the value of adaptive optimization is further developed. The proposed analytical framework is designed to support managerial decisions concerning digitalization, production modernization, resource optimization, and logistics processes. Its application enables the comparison of alternative portfolio configurations, alignment of investment priorities with enterprise resource capabilities, and substantiation of implementation schedules. The proposed model also contributes to establishing budget reserves, timely revision of managerial priorities, and strengthening the enterprise's market resilience.*

Keywords: enterprise adaptive development, multi-criteria optimization, portfolio of managerial decisions, robust optimization, CVaR, parametric uncertainty.

JEL Classification: C44, C61, D81, L23, M11
DOI: https://doi.org/10.32782/2522-1256-2026-50-14

Постановка проблеми. Адаптивний розвиток підприємства вимагає не лише передбачення майбутніх станів, а й обґрунтованого вибору управлінських рішень для коригування траєкторії його діяльності. Реалізація таких заходів стримується фінансовими, виробничими, кадровими та часовими обмеженнями. Цифровізація, автоматизація, модернізація потужностей і перебудова логістики формують взаємозалежні ефекти. Ці результати можуть взаємно підсилюватися або спричиняти конфлікти у боротьбі за спільні ресурси. Додаткову складність створюють невизначеність грошових потоків, часові затримки та ризик несприятливих сценарних відхилень. Відповідно, вибір заходів за їхньою автономною дохідністю не гарантує формування ефективного портфеля [2, с. 14]. Зазначені чинники

викликають потребу в оптимізаційній моделі. Така модель має одночасно визначати склад заходів, інтенсивність їх виконання, строки запуску та розподіл ресурсів. Вона має враховувати синергетичні ефекти, хвостові ризики та можливі помилки прогнозних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні М. В. Єрьоміна [1] розкрито механізм прийняття управлінських рішень під впливом цифрових змін. Автор показав доцільність поєднання інформаційних систем, прогнозних інструментів та оптимізаційних процедур. Проте кількісний відбір взаємозалежних управлінських альтернатив за умов ресурсних обмежень залишається висвітленим не повною мірою. У праці Г. О. Кришталя [3] запропоновано економіко-математичний підхід до оцінювання впливу цифровізації на продуктивність підприємств. Водночас отримані залежності не охоплюють портфельну оптимізацію конкретних адаптивних заходів.

К. В. Процак, О. А. Тетерін та А. М. Дацюк [4] дослідили цифрову трансформацію як чинник підвищення адаптивності бізнесу. Разом із тим формалізований вибір комбінації рішень із різними економічними та ресурсними параметрами потребує додаткового опрацювання. Д. О. Хахалєв [5] обґрунтував засади формування адаптивної стратегії підприємства в умовах цифрових перетворень. Подальшого розвитку вимагає математичний інструментарій для оптимізації її практичної конфігурації. У науковій публікації М. К. Нільсена співавторів [10] представлено багатокритеріальний підхід до відбору портфеля R&D-проєктів. Науковці довели результативність узгодження кількох цілей, проте адаптивні рішення підприємства окремо не моделюються.

М. Пішваей, М. Ашрафі та М. Х. Хагігі [11] сформували модель стійкого портфеля в умовах невизначеності. Утім врахування цифрового внеску та динаміки адаптивного стану залишається відкритим питанням. З. Ванг, С. Бай та С. Чжан [12] дослідили робастний портфельний вибір із урахуванням взаємодії ризиків. Зазначений підхід потребує доповнення через одночасну оцінку економічної синергії управлінських дій. Ф. Ю [13] запропонував багатоперіодну робастну модель із застосуванням показника CVaR. Методичний апарат цього дослідження вимагає адаптації до завдань управління розвитком суб'єкта господарювання. М. Заходірад та ін. [14] поєднали багатокритеріальність із багатоперіодним математичним програмуванням портфеля. Систематизація опрацьованих праць підтверджує доцільність розробки оптимізаційної моделі портфеля адаптивних рішень.

Постановка завдання. Мета статті – розроблення багатокритеріальної стохастичної оптимізаційної моделі формування портфеля адаптивних управлінських рішень підприємства.

Виклад основного матеріалу дослідження. Адаптивний розвиток підприємства передбачає не лише своєчасне виявлення зміни економічної траєкторії, а й обґрунтований вибір управлінської реакції. За одночасного дефіциту фінансових, кадрових і технологічних ресурсів підприємство не здатне реалізувати всі доступні заходи. Виникає задача визначення такої їх комбінації, яка забезпечить максимальний економічний результат із прийнятним рівнем ризику. При цьому ефекти окремих рішень взаємозалежні, розподілені в часі та чутливі до зміни зовнішніх параметрів. Одночасна цифровізація, автоматизація, реорганізація ресурсів і модернізація виробництва може формувати як додатковий синергетичний ефект, так і конкуренцію за обмежені ресурси [6]. Тому вибір адаптивних заходів формалізується як багатокритеріальна стохастична оптимізаційна задача з дискретними та неперервними змінними.

Оптимізаційний блок дослідження побудовано для вибору конкретних управлінських заходів за обмежених фінансових, кадрових, технологічних та часових ресурсів. Кожний захід характеризується обсягом інвестицій, строком запуску, очікуваним грошовим ефектом, ризиком, цифровим внеском і ресурсним навантаженням [16]. Така конфігурація переносить акцент із прогнозування стану підприємства на безпосередній вибір портфеля рішень. Для формалізації альтернатив сформовано множину $J=\{1,\ldots,18\}$. Окремий захід j описується параметричним вектором:

$$\mathbf{a}_j = (C_j, \tau_j, E_j, R_j, D_j, L_j, \kappa_j, \delta_j)^T, \quad j \in J \qquad (1)$$

де:

C_j – повна вартість реалізації j-го заходу, млн грн.;

τ_j – тривалість його впровадження, кварталів;

E_j – очікуваний дисконтований економічний ефект, млн грн.;

R_j – нормований рівень ризику заходу;

D_j – приріст цифрової зрілості підприємства;

L_j – інтегральне ресурсне навантаження;

κ_j – коефіцієнт масштабованості рішення;

δ_j– лаг між запуском заходу та отриманням економічного ефекту.

Розрахунковий простір сформовано з 18 адаптивних заходів, які охоплюють виробничі, цифрові, ресурсні, логістичні та збутові процеси підприємства. Така структура створює альтернативність вибору за однакового бюджетного обмеження, оскільки заходи мають різну капіталомісткість, тривалість реалізації та конфігурацію очікуваних результатів. Параметри R_j, D_j і L_j нормовано в інтервалі [0;1], тоді як C_j та E_j подано у вартісному вимірі. Вихідну параметризацію повного набору управлінських альтернатив наведено в (табл. 1).

Побудований масив показує, що максимальний автономний ефект E_j не визначає автоматичного включення заходу до оптимального портфеля. Наприклад, роботизація виробничої дільниці забезпечує найбільший одиничний результат, 13,8 млн грн, але одночасно має найвище ресурсне навантаження L_j=0,82 та ризик R_j=0,31. Натомість прогнозна аналітика попиту поєднує ефект 6,4 млн грн із коротким строком реалізації та високим цифровим внеском D_j=0,81. Виникає конкуренція альтернатив за бюджет і ресурси, причому їх спільна реалізація додатково змінює початкові ефекти через синергетичні та конфліктні взаємодії [8, с. 139]. Саме цей зв'язок потребує введення матриці Γ на наступному етапі моделювання. Сукупний портфельний ефект визначається виразом:

$$E(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{J} e_j x_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{J} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{J} \gamma_{jk} e_j e_k x_j x_k - \\ - \sum_{j=1}^{J} \eta_j x_j^2 - \sum_{j=1}^{J} \sum_{t=1}^{T} \phi_{jt} \left(x_{jt} - x_{j,t-1} \right)^2 \qquad (2)$$

де:

$E(x)$ – інтегральний економічний ефект сформованого портфеля;

e_j – автономний ефект j-го заходу;

x_j – інтенсивність реалізації заходу;

γ_j – коефіцієнт синергії або конфлікту між рішеннями j та k;

η_j – коефіцієнт спадної граничної віддачі;

ϕ_{jt} – штраф за різку зміну інтенсивності реалізації;

x_j – інтенсивність заходу j у періоді t;

T – кількість кварталів розрахункового горизонту.

Таблиця 1

Розрахункова параметрична карта альтернатив адаптивного портфеля підприємства

№ з/п	Адаптивний захід	C_j, млн грн.	τ_j, кв.	E_j, млн грн.	R_j	D_j	L_j
1	ERP-інтеграція процесів	4,8	3	7,9	0,22	0,74	0,56
2	Прогнозна аналітика попиту	3,1	2	6,4	0,18	0,81	0,38
3	Роботизація виробничої дільниці	8,7	5	13,8	0,31	0,69	0,82
4	Цифровий канал B2B-продажу	2,6	2	5,7	0,20	0,77	0,34
5	Оптимізація виробничих потужностей	5,9	4	9,6	0,27	0,42	0,71
6	IoT-моніторинг обладнання	4,3	3	8,1	0,19	0,79	0,49
7	Реорганізація запасів	2,2	2	4,5	0,16	0,31	0,28
8	Автоматизація закупівель	3,4	2	6,2	0,21	0,72	0,37
9	Цифрове планування виробництва	5,1	3	9,3	0,24	0,83	0,52
10	Система предиктивного обслуговування	6,3	4	11,0	0,25	0,76	0,63
11	Переналаштування ресурсної структури	3,8	3	6,8	0,17	0,29	0,45
12	Автоматизований контроль якості продукції	4,6	3	8,5	0,20	0,71	0,51
13	Цифровізація складської логістики	3,7	3	7,2	0,18	0,73	0,43
14	Модернізація енергоефективності виробництва	7,4	5	11,7	0,23	0,36	0,68
15	Система управління виробничими даними	4,9	3	8,9	0,21	0,86	0,47
16	Гнучке перепланування виробничих потоків	5,5	4	9,8	0,26	0,48	0,66
17	Автоматизація управлінської звітності	2,9	2	5,4	0,15	0,75	0,32
18	Цифрова система управління ресурсними ризиками	4,1	3	7,6	0,19	0,80	0,41

Джерело: сформовано авторами

Саме квадратичні та перехресні члени змінюють склад оптимального набору. Захід із високою автономною дохідністю може бути відхилений через конфлікт із уже відібраними рішеннями. І навпаки, помірний індивідуальний ефект компенсується сильною синергією. Розрахунок матриці *Γ* дає найбільш виражені взаємодії між цифровими та виробничими заходами (табл. 2). Значення наведені в нормованій шкалі від -1 до 1.

Центральним розрахунковим елементом виступає Adaptive Development Portfolio Optimization Model (ADPOM). Модель одночасно враховує грошовий результат, приріст адаптивного стану, хвостовий ризик, інвестиційні витрати та нестабільність портфеля. Врахування синергетичних зв'язків визначає очікуваний ефект портфеля, проте не характеризує його поведінку за несприятливої реалізації зовнішніх параметрів. Для цього кожну допустиму конфігурацію x оцінено за множиною сценаріїв $s=1,\ldots,S$, які відрізняються грошовими потоками, результативністю заходів та зміною адаптивного стану підприємства. Портфель із високою очікуваною дохідністю може одночасно створювати неприйнятні втрати в невеликій частині несприятливих сценаріїв [9, с. 172].

Для кількісного врахування такого хвостового ризику до ADPOM введено Conditional Value at Risk (*CVaR*). Показник характеризує середню величину втрат у групі сценаріїв, які перевищують заданий поріг ризику. За рівня довіри α=0,95 його розрахункова форма має вигляд:

$$CVaR_{\alpha}(\mathbf{x}) = \min_{\zeta}\left[\zeta + \frac{1}{1-\alpha}\sum_{s=1}^{S} p_s\left(L_s(\mathbf{x}) - \zeta\right)_+\right] \quad (3)$$

де:

$CVaR_{\alpha}(x)$ – умовна середня величина хвостових втрат портфеля;

α – рівень довіри, прийнятий у розрахунках на рівні 0,95;

ζ – оптимізований поріг переходу до хвостової області втрат;

p_s – ймовірність реалізації сценарію s;

S – кількість сценарних реалізацій;

$L_s(x)$ – втрати портфеля за сценарієм s;

$(L_s-\zeta)_+$ – додатна частина перевищення втрат над порогом ζ.

Цільова функція сформована як стохастична багатоперіодна MINLP-задача:

$$\max_{\mathbf{x},\mathbf{y}} Z = \sum_{s=1}^{S} p_s \left[\sum_{t=1}^{T} \frac{\Delta CF_{ts}(\mathbf{x}) + \omega_1 V_A \Delta ADSI_{ts}(\mathbf{x}) + \sum_{j<k}\gamma_{jk} x_{jt} x_{kt}}{(1+r)^t}\right] -$$

$$-\omega_2\left[\zeta + \frac{1}{1-\alpha}\sum_{s=1}^{S} p_s (L_s - \zeta)_+\right] - \omega_3 C(\mathbf{x}) - \omega_4 V(\mathbf{x}) \quad (4)$$

за умов:

$$\sum_{j=1}^{J} C_{jt} x_{jt} \le B_t, \qquad \sum_{j=1}^{J} R_{qjt} x_{jt} \le \bar{R}_{qt},$$

$$ADSI_{ts}(\mathbf{x}) \ge ADSI^{min},\ 0 \le x_{jt} \le y_{jt},\ y_{jt} \in \{0,1\} \quad (5)$$

де:

Z – приведена багатокритеріальна цінність портфеля;

Таблиця 2

Оцінка економічно значущих синергій і ресурсних конфліктів адаптивних рішень

№ з/п	Перша альтернатива	Друга альтернатива	*γjk*	Тип взаємодії	Зміна портфельного ефекту, %
1	ERP-інтеграція	Прогнозна аналітика	0,34	синергія	+8,7
2	ERP-інтеграція	Автоматизація закупівель	0,29	синергія	+6,9
3	Прогнозна аналітика	B2B-продажі	0,38	синергія	+9,4
4	IoT-моніторинг	Предиктивне обслуговування	0,46	синергія	+12,1
5	Цифрове планування	Оптимізація потужностей	0,41	синергія	+10,6
6	Роботизація	Оптимізація потужностей	0,21	синергія	+5,2
7	Роботизація	ERP-інтеграція	-0,12	ресурсний конфлікт	-3,1
8	Роботизація	Предиктивне обслуговування	-0,17	фінансовий конфлікт	-4,5
9	Реорганізація запасів	Автоматизація закупівель	0,31	синергія	+7,3
10	B2B-продажі	Переналаштування ресурсів	0,14	доповнення	+3,0

Джерело: сформовано авторами

p_s – ймовірність сценарію s;
ΔCFt_s – приріст грошового потоку в періоді t за сценарієм s;
VA – грошова оцінка одиниці приросту адаптивного стану;
$\Delta ADSI_{ts}$ – приріст індексу адаптивного стану;
r – квартальна ставка дисконтування;
$\omega_1, ..., \omega_4$ – ваги критеріїв;
ζ – допоміжна змінна порога хвостових втрат;
α – рівень довіри $CVaR$;
Ls – портфельні втрати за сценарієм s;
B_t – доступний бюджет періоду;
R_{qjt} – потреба заходу j у ресурсі типу q;
$\bar{R}_{qt}$ – доступний обсяг ресурсу;
y_{jt} – бінарний індикатор активації рішення.

Оптимізацію виконано для бюджетних меж 20, 30, 40 та 50 млн грн. Ваги критеріїв становили ω_1=0,30, ω_2=0,25, ω_3=0,20, ω_4=0,25, а α=0,95. Збільшення бюджету не спричинило пропорційного приросту цільової функції. Причиною стала поява ресурсних конфліктів та спадної граничної віддачі (табл. 3).

Найвиразніша зона приросту міститься між 20 і 40 млн грн. Після 50 млн грн. додаткове фінансування майже не збільшує інтегральний результат. Це пов'язано з тим, що модель уже активувала комбінації з найвищою синергією. Наступні альтернативи мають нижчу граничну віддачу або посилюють *CVaR*.

Проте оптимальний портфель, сформований за точковими прогнозами, залишається чутливим до помилок параметризації. Для перевірки цієї проблеми коефіцієнти грошового ефекту, вартості та ресурсного навантаження переведено в еліпсоїдальну множину невизначеності:

$$\mathcal{U}(\rho) = \left\{ \xi : (\xi - \hat{\xi})^T \sum^{-1} (\xi - \hat{\xi}) \le \rho^2 \right\},$$

$$\mathbf{x}^R = \arg\max_{\mathbf{x}\in\mathcal{X}} \min_{\xi\in\mathcal{U}(\rho)} Z(\mathbf{x}, \xi) \qquad (6)$$

де:
$U(\rho)$ – еліпсоїдальна множина допустимих відхилень параметрів;
ξ – вектор невизначених економічних параметрів;
ξ^ – вектор їх прогнозних значень;
Σ – коваріаційна матриця помилок параметризації;
ρ – радіус робастності;
X – область допустимих портфельних рішень;
xR – робастна конфігурація портфеля.

Зі збільшенням рівня ρ модель поступово відмовляється від заходів із високою прогнозною дохідністю та нестійкими параметрами. При ρ=1,5 роботизація переноситься на пізніший період, натомість раніше запускаються прогнозна аналітика, IoT-моніторинг і реорганізація запасів [15]. Втрата очікуваного результату компенсується скороченням несприятливого відхилення (табл. 4).

Результат при ρ=1,5 формує раціональний компроміс між очікуваною віддачею та захистом від прогнозної помилки. Порівняно з точковою оптимізацією очікуване Z скорочується на 8,1%, але $CVaR$ зменшується на 23,6%. При цьому найгірший результат зростає з 39,81 до 41,66. Для управлінського застосування самого значення Z недостатньо. Потрібно встановити, які рішення формують найбільший приріст цільового результату та де вичерпується ефект додаткового ресурсу [7]. Тому після оптимізації розраховуються гра-

Таблиця 3

Оптимізаційний профіль адаптивного портфеля за альтернативних бюджетних меж

№ з/п	Бюджет, млн грн.	Активовано заходів	Використано, млн грн.	$Z^{optimal}$	ΔADS_I	$CVaR_{0.95}$, млн грн.	VAO, %
1	20	5	19,1	27,84	0,071	5,92	12,6
2	25	6	24,3	33,17	0,086	6,18	16,9
3	30	7	29,4	38,92	0,103	6,47	21,8
4	35	8	34,2	43,86	0,116	6,81	25,4
5	40	9	39,1	48,37	0,128	7,09	28,7
6	45	10	43,7	51,44	0,135	7,46	29,9
7	50	10	47,2	53,06	0,139	7,83	30,4
8	55	11	51,8	54,11	0,142	8,31	29,8
9	60	11	55,6	54,73	0,143	8,94	28,9

Джерело: сформовано авторами

Таблиця 4

Робастність оптимального портфеля за розширення області параметричної невизначеності

№ з/п	ρ	$Z^{expected}$	Z^{worst}	$CVaR_{0.95}$	Δ*ADSI*	Заходів	Резерв бюджету, %
1	0,00	48,37	39,81	7,09	0,128	9	2,3
2	0,25	47,94	40,26	6,84	0,127	9	3,1
3	0,50	47,31	40,73	6,51	0,125	9	4,0
4	0,75	46,62	41,08	6,19	0,123	8	5,8
5	1,00	45,88	41,37	5,91	0,121	8	7,1
6	1,25	45,14	41,55	5,67	0,119	8	8,4
7	1,50	44,43	41,66	5,42	0,117	8	9,6
8	1,75	43,69	41,58	5,24	0,114	7	11,3
9	2,00	42,91	41,32	5,08	0,111	7	12,7

Джерело: сформовано авторами

ничний ефект, еластичність і Value of Adaptive Optimization:

$$ME_j = \frac{\partial Z}{\partial x_j}, \quad \varepsilon_{Z,x_j} = \frac{\partial Z}{\partial x_j}\frac{x_j}{Z},$$

$$VAO = \frac{Z^{optimal} - Z^{baseline}}{\left|Z^{baseline}\right|} \times 100\% \qquad (7)$$

де:

ME_j – гранична зміна цільового результату при збільшенні інтенсивності заходу;

$\varepsilon_{Z,xj}$ – еластичність портфельного результату за рішенням j;

$Z^{optimal}$ – результат оптимізованого портфеля;

$Z^{baseline}$ – результат базової конфігурації;

VAO – відносна цінність застосування адаптивної оптимізації.

За бюджетної межі 40 млн грн. найбільший ME_j отримано для цифрового планування виробництва, прогнозної аналітики та IoT-моніторингу. Водночас висока автономна віддача роботизації не забезпечила їй першої позиції через ресурсні обмеження (рис. 1).

Дослідження виявило, що найбільший економічний результат не формується механічним включенням найдохідніших заходів. Оптимальна конфігурація залежить від часу запуску, синергій, ресурсних конфліктів і хвостового ризику. За бюджету 40 млн грн. ADPOM формує дев'ять активних рішень із $Z^{optimal}$=48,37 та приростом ADSI на 0,128.

Перехід до робастної конфігурації при ρ=1,5 знижує очікуваний результат до 44,43, проте скорочує *CVaR* до 5,42 млн грн. Такого формату портфель матиме резерв бюджету 9,6%, який зберігає простір для коригування рішень протягом розрахункового горизонту.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. 1. Розроблена Adaptive Development Portfolio Optimization Model (ADPOM) формалізує вибір адаптивних управлінських заходів як багатоперіодну стохастичну MINLP-задачу. Модель одночасно враховує економічний ефект, зміну ADSI, синергетичні взаємодії, ресурсні конфлікти, інвестиційні обмеження та хвостовий ризик. Розрахункова база охоплює 18 альтернатив, параметризованих за вартістю, тривалістю реалізації, очікуваним ефектом, ризиком, цифровим внеском і ресурсним навантаженням. Оптимізаційні розрахунки виявили нелінійну залежність результату від доступного бюджету. За бюджетної межі 40 млн грн. модель формує дев'ять активних заходів, використовує 39,1 млн грн та забезпечує $Z^{optimal}$=48,37, приріст ADSI на 0,128 і VAO 28,7%. Подальше розширення фінансування дає слабший приріст результату через вичерпання ефективних синергетичних комбінацій, спадну граничну віддачу та посилення хвостового ризику.

Робастна оптимізація підтвердила доцільність резервування частини ресурсів для захисту портфеля від параметричної невизначеності. За ρ=1,5 очікуваний результат становить 44,43, *CVaR* скорочується до 5,42 млн грн, а бюджетний резерв досягає 9,6%. Порівняно з точковою оптимізацією *CVaR* зменшується на 23,6%, тоді як результат несприятливої реалізації зростає з 39,81 до 41,66. Робастність досягається також зміною строків запуску окремих заходів.

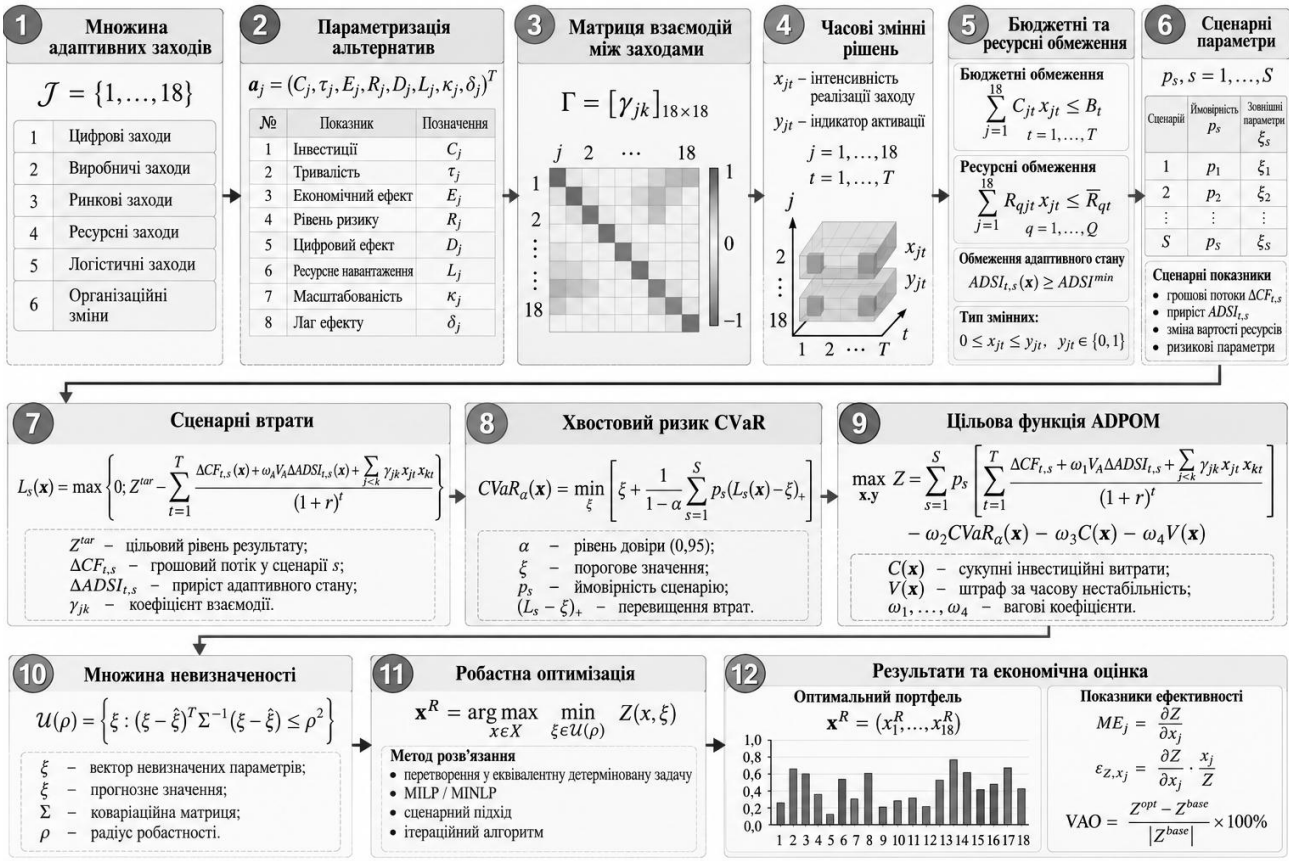


Рис. 1. Розрахункова архітектура ADPOM для формування робастного портфеля адаптивних рішень підприємства

Джерело: побудовано авторами в цифровому середовищі Solid Works

ЛІТЕРАТУРА

1. Єрьомін М. В. Адаптивне прийняття управлінських рішень в умовах цифрової трансформації. *Київський економічний науковий журнал*. 2025. № 10. С. 56–62. DOI: http://dx.doi.org/10.32782/2786-765X/2025-10-8

2. Завражний К. Ю., Кулик А. К. Аналіз моделі діяльності компанії як основа для успішної цифрової трансформації та сталого розвитку. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Економічні науки»*. 2024. № 1 (111). С. 12–18. DOI: http://dx.doi.org/10.37734/2409-6873-2024-1-2

3. Кришталь Г. О. Економіко-математичне моделювання впливу цифровізації на продуктивність підприємств в умовах трансформаційної економіки. *Український економічний часопис*. 2026. № 13. С. 115–119. DOI: http://dx.doi.org/10.32782/2786-8273/2026-13-17

4. Процак К. В., Тетерін О. А., Дацюк А. М. Цифрова трансформація як інструмент підвищення адаптивності бізнесу до соціальних і технологічних змін. *Економічний простір*. 2025. № 207. С. 57–63. DOI: http://dx.doi.org/10.30838/EP.207.57-63

5. Хахалєв Д. О. Формування адаптивної стратегії управління підприємством в умовах цифрової трансформації. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2025. № 6 (209). С. 119–128. DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2313-8890.2025.06.09

6. Юрченко О. Детермінанти цифрової трансформації малих та середніх підприємств. *Економіка та суспільство*. 2025. № 71. DOI: http://dx.doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-169

7. Cui L., Chen R., Gai S., Chen L., Wu L. Digital transformation and organizational resilience: A resource orchestration perspective on R&D investment intensity. *Journal of Business Research*. 2026. Vol. 215. Art. 116306. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jbusres.2026.116306

8. Makedon V., Myachin V., Kuriacha N., Chaika Yu., Koptilyi D. Development of strategic management of a corporation through the implementation of scenario analysis. *Scientific Bulletin of Mukachevo State University. Series "Economics"*. 2025. Vol. 12, No. 2. P. 135–146. DOI: http://dx.doi.org/10.52566/msu-econ2.2025.135

9. Makedon V., Myachin V., Aloshyna T., Cherniavska I., Karavan N. Improving the Readiness of Enterprises to Develop Sustainable Innovation Strategies through Fuzzy Logic Models. Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania). 2025. Vol. 34. № 5. P. 165–179.

10. Nielsen M. K., Jacobsen A. M. S. Ø., Carstensen J. L., Nielsen M. T., Tambo T. Industrial R&D project portfolio selection method using a multi-objective optimization program: A conceptual quantitative framework. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2024. Vol. 17, No. 1. DOI: https://doi.org/10.3926/jiem.6552

11. Pishvaei M., Ashrafi M., Haghighi M. H. Developing a resilient project portfolio optimization model: a tool for an automotive part manufacturer against uncertainties. *Journal of the Operational Research Society*. 2025. Vol. 76, No. 11. P. 2359–2376. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/01605682.2025.2468790

12. Wang Z., Bai S., Zhang X. A robust optimization model for R&D project portfolio risk response decision-making considering risk interaction and regret perception. *Journal of Industrial and Management Optimization*. 2024. Vol. 20, No. 12. P. 3843–3867. DOI: http://dx.doi.org/10.3934/jimo.2024073

13. Yu F. Multiperiod distributionally robust portfolio selection with regime-switching under CVaR risk measures. *AIMS Mathematics*. 2025. Vol. 10, No. 4. P. 9974–10001. DOI: http://dx.doi.org/10.3934/math.2025456

14. Zahedirad M., Khalili-Damghani K., Ghezavati V., Rashidi Komijan A. A multi-objective multi-period mathematical programming model for integrated project portfolio optimization and contractor selection. *MethodsX*. 2025. Vol. 15. Art. 103522. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.mex.2025.103522

15. Zhang J., Li H., Zhao H. The Impact of Digital Transformation on Organizational Resilience: The Role of Innovation Capability and Agile Response. *Systems*. 2025. Vol. 13. No. 2. Art. 75. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/systems13020075

16. Zhou Y., Xu L. A new distributionally robust reward-risk model for portfolio optimization. *Open Mathematics*. 2024. Vol. 22, No. 1. Art. 20240010. DOI: https://doi.org/10.1515/math-2024-0010

REFERENCES

1. Yeromin M. V. (2025) Adaptyvne pryiniattia upravlinskykh rishen v umovakh tsyfrovoi transformatsii [Adaptive management decision-making in the conditions of digital transformation]. *Kyivskyi ekonomichnyi naukovyi zhurnal – Kyiv Economic Scientific Journal,* no. 10, pp. 56–62. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-765X/2025-10-8 (in Ukrainian)

2. Zavrazhnyi K. Yu., Kulyk A. K. (2024) Analiz modeli diialnosti kompanii yak osnova dlia uspishnoi tsyfrovoi transformatsii ta staloho rozvytku [Analysis of the company's business model as a basis for successful digital transformation and sustainable development]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli. Seriia "Ekonomichni nauky" – Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade. Series "Economic Sciences",* no. 1 (111), pp. 12–18. DOI: https://doi.org/10.37734/2409-6873-2024-1-2 (in Ukrainian)

3. Kryshtal H. O. (2026) Ekonomiko-matematychne modeliuvannia vplyvu tsyfrovizatsii na produktyvnist pidpryiemstv v umovakh transformatsiinoi ekonomiky [Economic and mathematical modelling of the impact of digitalization on enterprise productivity in a transformational economy]. *Ukrainskyi ekonomichnyi chasopys – Ukrainian Economic Journal,* no. 13, pp. 115–119. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-8273/2026-13-17 (in Ukrainian)

4. Protsak K. V., Teterin O. A., Datsiuk A. M. (2025) Tsyfrova transformatsiia yak instrument pidvyshchennia adaptyvnosti biznesu do sotsialnykh i tekhnolohichnykh zmin [Digital transformation as a tool for increasing business adaptability to social and technological changes]. *Ekonomichnyi prostir – Economic Space*, no. 207, pp. 57–63. DOI: https://doi.org/10.30838/EP.207.57-63 (in Ukrainian)

5. Khakhaliev D. O. (2025) Formuvannia adaptyvnoi stratehii upravlinnia pidpryiemstvom v umovakh tsyfrovoi transformatsii [Formation of an adaptive enterprise management strategy in the conditions of digital transformation]. Enerhozberezhennia. Enerhetyka. *Enerhoaudyt – Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit,* no. 6 (209), pp. 119–128. DOI: https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.06.09 (in Ukrainian)

6. Yurchenko O. (2025) Determinanty tsyfrovoi transformatsii malykh ta serednikh pidpryiemstv [Determinants of digital transformation of small and medium-sized enterprises]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, no. 71. DOI:https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-169 (in Ukrainian)

7. Cui L., Chen R., Gai S., Chen L., Wu L. (2026) Digital transformation and organizational resilience: A resource orchestration perspective on R&D investment intensity. *Journal of Business Research,* vol. 215, art. 116306. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2026.116306

8. Makedon V., Myachin V., Kuriacha N., Chaika Yu., Koptilyi D. (2025) Development of strategic management of a corporation through the implementation of scenario analysis. *Scientific*

Bulletin of Mukachevo State University. Series "Economics", vol. 12, no. 2, pp. 135–146. DOI: https://doi.org/10.52566/msu-econ2.2025.135

9. Makedon V., Myachin V., Aloshyna T., Cherniavska I., Karavan N. (2025) Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*, vol. 34, no. 5, pp. 165–179. Available at: https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf

10. Nielsen M. K., Jacobsen A. M. S. Ø., Carstensen J. L., Nielsen M. T., Tambo T. (2024) Industrial R&D project portfolio selection method using a multi-objective optimization program: A conceptual quantitative framework. *Journal of Industrial Engineering and Management,* vol. 17, no. 1. DOI: https://doi.org/10.3926/jiem.6552

11. Pishvaei M., Ashrafi M., Haghighi M. H. (2025) Developing a resilient project portfolio optimization model: A tool for an automotive part manufacturer against uncertainties. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 76, no. 11, pp. 2359–2376. DOI: https://doi.org/10.1080/01605682.2025.2468790

12. Wang Z., Bai S., Zhang X. (2024) A robust optimization model for R&D project portfolio risk response decision-making considering risk interaction and regret perception. *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 20, no. 12, pp. 3843–3867. DOI: https://doi.org/10.3934/jimo.2024073

13. Yu F. (2025) Multiperiod distributionally robust portfolio selection with regime-switching under CVaR risk measures. *AIMS Mathematics*, vol. 10, no. 4, pp. 9974–10001. DOI: https://doi.org/10.3934/math.2025456

14. Zahedirad M., Khalili-Damghani K., Ghezavati V., Rashidi Komijan A. (2025) A multi-objective multi-period mathematical programming model for integrated project portfolio optimization and contractor selection. *MethodsX,* vol. 15, art. 103522. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103522

15. Zhang J., Li H., Zhao H. (2025) The impact of digital transformation on organizational resilience: The role of innovation capability and agile response. *Systems*, vol. 13, no. 2, art. 75. DOI: https://doi.org/10.3390/systems13020075

16. Zhou Y., Xu L. (2024) A new distributionally robust reward-risk model for portfolio optimization. *Open Mathematics,* vol. 22, no. 1, art. 20240010. DOI: https://doi.org/10.1515/math-2024-0010

Дата надходження статті: 24.09.2026
Дата прийняття статті: 16.10.2026
Дата публікації статті: 09.11.2026