

М. В. КОРЕПАНОВ, аспірант;

ORCID: 0009-0005-8735-6388

В. А. САГАЙДАК, PhD, доцент,

ORCID: 0009-0000-9724-958X

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕСУРСІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПІДПРИЄМСТВА ЗА КРИТЕРІЯМИ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ВАРТОСТІ

У статті розглянуто актуальну науково-практичну задачу побудови математичної моделі оптимізації ресурсів інформаційної системи підприємства за критеріями продуктивності та вартості. Актуальність дослідження зумовлена тим, що сучасні інформаційні системи підприємств функціонують в умовах змінного навантаження, обмеженості обчислювальних, мережевих і фінансових ресурсів, а також підвищених вимог до швидкодії, надійності та якості обслуговування. За таких умов як недостатнє, так і надмірне ресурсне забезпечення негативно впливає на ефективність функціонування системи: у першому випадку виникають перевантаження, збільшується час відповіді, зменшується пропускна здатність і зростає частка порушень SLA, а у другому — підвищуються експлуатаційні витрати та знижується економічна доцільність функціонування ІТ-інфраструктури.

У вступі обґрунтовано значення інформаційних систем для забезпечення безперервності бізнес-процесів, підтримки управлінських рішень та загальної конкурентоспроможності підприємства. У постановці проблеми показано необхідність формалізованого підходу до вибору конфігурації системи, який дозволив би одночасно враховувати технічні та вартісні критерії. В аналітичній частині розглянуто сучасні підходи до ресурсної оптимізації в корпоративних, сервісних, хмарних і fog/edge-середовищах, а також дослідження, присвячені застосуванню метаевристичних алгоритмів у задачах розподілу ресурсів. Встановлено, що попри значний розвиток відповідних методів, недостатньо уваги приділено побудові узагальненої математичної моделі оптимізації ресурсів саме інформаційної системи підприємства як цілісного об'єкта.

Метою дослідження є розроблення математичної моделі оптимізації ресурсів інформаційної системи підприємства, яка дозволяє формалізувати процес пошуку раціональної конфігурації за критеріями продуктивності та вартості. У межах дослідження інформаційну систему підприємства подано як багатокомпонентний об'єкт оптимізації, конфігурація якого описується вектором керованих параметрів. До основних показників оцінювання ефективності віднесено середній час відповіді, пропускну здатність, рівень завантаження окремих ресурсів, частку порушень SLA (встановлених умов обслуговування) та сукупну вартість ресурсного забезпечення. На цій основі запропоновано цільову функцію, яка інтегрує втрати продуктивності, вартість конфігурації та штраф за порушення сервісних вимог, а також сформовано систему обмежень, що відображає реальні технологічні та економічні умови експлуатації системи.

У результатах дослідження обґрунтовано, що запропонована модель може бути використана як теоретична основа для подальшого застосування метаевристичних алгоритмів, зокрема алгоритму рою частинок, диференціальної еволюції та алгоритму імітації відпалу, у задачах оптимізації конфігурації інформаційних систем підприємств. Показано, що багатокритеріальний характер задачі та складність простору допустимих рішень обумовлюють доцільність використання саме таких методів. У висновках зазначено, що запропонована математична модель є універсальною, адаптив-

ною до різних типів корпоративних інформаційних систем і придатною для подальшого розвитку в напрямі імітаційного моделювання, експериментальної перевірки та побудови гібридних алгоритмічних схем ресурсної оптимізації.

Ключові слова: інформаційна система підприємства, оптимізація ресурсів, математична модель, продуктивність, вартість, метаевристичні алгоритми, конфігурація системи, SLA.

Вступ

У сучасних умовах високої конкуренції підприємств, особливо в умовах зростання частки приватного сектору, оптимізація витрат на інформаційні системи відіграє ключову роль у налагодженні стабільності роботи підприємства: забезпеченні безперервності бізнес-процесів, підтримці управлінських рішень, автоматизації операційної діяльності та підвищенні загальної конкурентоспроможності організації. Ефективність функціонування інформаційної системи підприємства значною мірою визначається не лише її функціональними можливостями, а й здатністю забезпечувати належний рівень продуктивності за обмежених обчислювальних, мережевих і фінансових ресурсів [6], [7]. При наявності нерівномірного та неодночасного навантаження окремих ланок установи, ускладнення архітектури програмно-апаратних компонентів та підвищення вимог до якості сервісу особливо актуальною стає задача раціонального ресурсного забезпечення інформаційної системи.

Практика функціонування корпоративних інформаційних систем свідчить, що як недостатнє, так і надмірне виділення ресурсів призводить до негативних наслідків. У першому випадку спостерігається збільшення часу відповіді, зниження пропускну здатності, перевантаження окремих вузлів та порушення умов SLA. У другому – зростають експлуатаційні витрати, зменшується економічна ефективність ІТ-інфраструктури та погіршується загальний баланс між якістю обслуговування і вартістю підтримки системи [7], [9], [11]. За таких умов виникає потреба у формалізованому підході до вибору конфігурації інформаційної системи, який давав би змогу одночасно враховувати технічні та економічні критерії.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є застосування математичного моделювання задачі оптимізації ресурсів інформаційної системи підприємства. Побудова такої моделі дозволяє описати структуру параметрів системи, задати цільову функцію, врахувати множину обмежень і створити підґрунтя для подальшого застосування оптимізаційних методів, зокрема метаевристичних алгоритмів [2], [3], [6]. Саме тому розроблення математичної моделі оптимізації ресурсів інформаційної системи підприємства за критеріями продуктивності та вартості є актуальним науковим і практичним завданням.

Постановка проблеми

Інформаційні системи підприємств функціонують у середовищі, для якого характерні динамічність, нерівномірність навантаження, необхідність швидкої обробки значних обсягів даних та обмеженість ресурсів. У таких умовах забезпечення ефективної роботи системи потребує не лише технічної підтримки її працездатності, а й постійного прийняття рішень щодо розподілу ресурсів між окремими компонентами, сервісами, процесами та користувацькими запитами [6], [7].

Проблема полягає в тому, що традиційні підходи до конфігурування інформаційних систем часто ґрунтуються або на статичних налаштуваннях, або на експертних оцінках, які не завжди дозволяють знайти раціональний баланс між продуктивністю системи та витратами на її підтримку. За відсутності формалізованої моделі стає складно кількісно оцінити, яким чином зміна параметрів ресурсного забезпечення впливає на ключові показники ефективності системи. Це ускладнює пошук оптимальної конфігурації та знижує адаптивність інформаційної системи до змін у профілі навантаження [9], [10], [11].

Таким чином, актуальною є задача побудови математичної моделі, що описує оптимізацію ресурсів інформаційної системи підприємства з урахуванням двох взаємопов'язаних груп критеріїв: продуктивності функціонування та вартості ресурсного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика оптимізації ресурсів інформаційних систем підприємств тісно пов'язана з розвитком корпоративних інформаційних систем, сервісно-орієнтованих архітектур, хмарних платформ і систем підтримки прийняття рішень. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється питанням раціонального розподілу обчислювальних, мережевих та програмних ресурсів, оскільки саме від цього залежить здатність інформаційної системи забезпечувати заданий рівень продуктивності за прийняттого рівня експлуатаційних витрат [6], [7].

У роботах, присвячених корпоративним та ERP-системам (Enterprise Resource Planning – планування ресурсів підприємства), показано, що використання оптимізаційних моделей у задачах планування й розподілу ресурсів дає змогу підвищити узгодженість бізнес-процесів, скоротити час виконання операцій і поліпшити ефективність управлінських рішень [12]. Разом із тим у таких підходах часто домінує прикладний аспект планування, тоді як питання побудови універсальної математичної моделі оптимізації конфігурації інформаційної системи підприємства з урахуванням одночасно технічних і вартісних критеріїв розкрито недостатньо повно.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із задачами ресурсного забезпечення сервісних і хмарних систем, де пріоритетом є дотримання вимог до якості обслуговування, зокрема обмежень за затримкою, пропускну здатністю та показниками SLA. У цих роботах розглядаються моделі ресурсного керування з урахуванням якості сервісу, схеми автоматичного масштабування, а також різні варіанти багатокритеріального балансування якості та витрат [6], [7], [11]. Такі дослідження є важливими для формалізації критеріїв ефективності, однак вони переважно орієнтовані на вузькі прикладні класи систем або окремі архітектурні сценарії.

Для розв'язання складних задач ресурсної оптимізації дедалі ширше використовуються метаевристичні алгоритми. Значний науковий інтерес до них пояснюється тим, що вони придатні для задач із великою кількістю змінних, нелінійними залежностями, змішаними обмеженнями та множиною локальних екстремумів. Одним із найвідоміших підходів є алгоритм рою частинок, запропонований Kennedy та Eberhart, який характеризується простотою реалізації й доброю швидкістю збіжності [2]. Диференціальна еволюція, запропонована Storn і Price, ефективно застосовується в задачах неперервної глобальної оптимізації [3]. Алгоритм імітації відпалу, розроблений Kirkpatrick, Gelatt і Vecchi, зберігає практичну цінність у задачах зі складною поверхнею цільової функції та великою кількістю локальних мінімумів [1]. Поряд із цим у сучасних прикладних роботах відзначається зростання інтересу до гібридних підходів у задачах розподілу ресурсів у cloud, edge та IoT-середовищах [8], [9], [10].

Важливим для даного дослідження є також той факт, що сучасні праці з оптимізації ресурсного планування в інфраструктурних системах дедалі частіше спираються на інтеграцію кількох критеріїв — продуктивності, затримки, надійності, енергоспоживання та вартості [7], [8], [11]. Проте навіть за наявності значної кількості досліджень у сфері ресурсного керування все ще недостатньо уваги приділяється формалізації математичної моделі саме для інформаційної системи підприємства як цілісного об'єкта оптимізації, де потрібно враховувати не лише окремі технічні параметри, а й економічну доцільність конфігурації [6], [12].

Отже, аналіз літератури дає підстави стверджувати, що нині існує достатньо широкий спектр алгоритмічних засобів і прикладних підходів до ресурсної оптимізації, однак не вирішеною залишається задача побудови узагальненої математичної моделі оптимізації ресурсів інформаційної системи підприємства за критеріями продуктивності та вартості. Саме розв'язанню цієї задачі і присвячено дану статтю.

Мета і задачі дослідження

Метою статті є розроблення математичної моделі оптимізації ресурсів інформаційної системи підприємства, яка дозволяє формалізувати процес вибору раціональної конфігурації системи за критеріями продуктивності та вартості.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовано такі задачі:

– проаналізувати особливості інформаційної системи підприємства як об'єкта ресурсної оптимізації;

- визначити основні критерії оцінювання ефективності функціонування системи;
- побудувати математичну модель задачі оптимізації ресурсів і конфігурації інформаційної системи;
- сформулювати систему обмежень, що відображає реальні умови експлуатації системи;
- обґрунтувати доцільність застосування метаевристичних алгоритмів для пошуку раціональних рішень у межах запропонованої моделі.

Результати дослідження

Формалізація інформаційної системи підприємства як об'єкта оптимізації

Інформаційну систему підприємства доцільно розглядати як складну багатокomпонентну систему, ефективність функціонування якої залежить від параметрів ресурсного забезпечення, структури обробки запитів, характеристик навантаження та вимог до якості обслуговування. У загальному випадку така система містить обчислювальні ресурси, програмні сервіси, мережеві компоненти, сховища даних, механізми маршрутизації запитів, а також політики доступу й пріоритизації обслуговування [6], [7], [11].

Нехай конфігурація інформаційної системи описується вектором:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

де x_i – параметри, що визначають стан і налаштування окремих ресурсів або компонентів системи. До таких параметрів можуть належати кількість обчислювальних вузлів, обсяг оперативної пам'яті, резерв процесорного часу, допустима довжина черг, параметри балансування навантаження, квоти на використання сервісів, а також інші керовані характеристики системи.

У межах дослідження вважаємо, що для кожної конфігурації x можна визначити або оцінити набір показників ефективності, серед яких:

- середній час відповіді на запит;
- пропускна здатність системи;
- рівень завантаження окремих ресурсів;
- частка порушень SLA;
- сукупна вартість підтримки обраної конфігурації.

Таким чином, задача оптимізації полягає у знаходженні такого вектора x , при якому забезпечується належний рівень продуктивності інформаційної системи за прийнятною вартості її функціонування.

Критерії оптимізації продуктивності та вартості

У задачах ресурсної оптимізації інформаційних систем підприємств доцільно використовувати щонайменше дві групи критеріїв. Перша група пов'язана з продуктивністю функціонування системи. До неї належать швидкість обробки запитів, стійкість до зростання навантаження, пропускна здатність, коефіцієнт використання обчислювальних ресурсів, а також показники дотримання вимог SLA. Друга група критеріїв пов'язана з економічною доцільністю експлуатації ІС і відображає витрати на інфраструктуру, підтримку сервісів, резервування ресурсів та загальну вартість обраної конфігурації [6], [7], [9].

Оскільки підвищення продуктивності зазвичай супроводжується збільшенням витрат, виникає потреба в узгодженні суперечливих критеріїв. Для цього зручно застосовувати інтегральну цільову функцію, у якій окремі складові оцінюються з урахуванням вагових коефіцієнтів. Такий підхід дозволяє адаптувати модель до специфіки підприємства: в одних випадках пріоритетом буде мінімізація часу відповіді, в інших — контроль витрат або забезпечення мінімального відсотку порушень SLA.

Математична модель задачі оптимізації ресурсів

Узагальнену цільову функцію задачі оптимізації ресурсів інформаційної системи підприємства пропонується задати у вигляді:

$$F(x) = \alpha P(x) + \beta C(x) + \gamma S(x) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $P(x)$ – функція витрат продуктивності системи для конфігурації x ;

$C(x)$ – функція вартості ресурсного забезпечення;

$S(x)$ – штрафна функція за порушення SLA;

α, β, γ – вагові коефіцієнти, що відображають відносну важливість відповідних критеріїв.

У цій моделі складова $P(x)$ може включати середній час відповіді, перцентильні затримки, втрати пропускної здатності або інші технічні показники, що характеризують продуктивність системи. Функція $C(x)$ відображає сумарні витрати на підтримку обраної конфігурації, у тому числі витрати на обчислювальні ресурси, мережеву інфраструктуру, резервування потужностей та експлуатаційне обслуговування. Компонента $S(x)$ необхідна для врахування ризику невиконання сервісних вимог і дозволяє посилити роль обмежень, пов'язаних із рівнем якості обслуговування [6], [7], [11].

Запропонована модель є достатньо гнучкою, оскільки дозволяє адаптувати набір складових і їхню відносну вагу відповідно до особливостей конкретної інформаційної системи підприємства. За потреби її можна розширювати додатковими критеріями, зокрема показниками енергоспоживання, відмовостійкості, безпеки або стабільності функціонування.

Система обмежень

Оптимізація ресурсів інформаційної системи повинна виконуватися з урахуванням технологічних, експлуатаційних і економічних обмежень. У загальному вигляді систему обмежень можна представити так:

$$\begin{aligned} R_i^{\min} &\leq R_i(x) \leq R_i^{\max}, \\ T_{\text{avg}}(x) &\leq T^{\max}, \\ U_j(x) &\leq U_j^{\max}, \\ C(x) &\leq C^{\max}. \end{aligned} \quad (3)$$

де $R_i(x)$ – обсяг ресурсу i -го типу, виділеного в межах конфігурації x ;

$T_{\text{avg}}(x)$ – середній час відповіді системи;

$T^{\max}$ – гранично допустиме значення часу відповіді;

$U_j(x)$ – рівень завантаження j -го компонента системи;

$U_j^{\max}$ – допустима верхня межа завантаження;

$C^{\max}$ – максимально допустимий рівень витрат.

Наведені обмеження відображають той факт, що в реальних умовах підприємство не може необмежено нарощувати ресурси для покращення продуктивності, так само як не може допустити погіршення якості обслуговування понад заданий рівень. Саме тому задача оптимізації має розглядатися не як абстрактна мінімізація функції, а як пошук найкращого допустимого рішення в межах множини реалістичних конфігурацій.

Табличне подання показників оцінювання

Основні показники, які характеризують ефективність конфігурації інформаційної системи підприємства в межах запропонованої моделі, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Показники оцінювання ефективності конфігурації інформаційної системи підприємства

Показник	Позначення	Зміст показника	Напрямок оптимізації
Середній час відповіді	T_{avg}	Характеризує швидкість обслуговування запитів	мінімізація
Пропускна здатність	Q	Кількість запитів, оброблених за одиницю часу	максимізація
Завантаження ресурсів	U_j	Ступінь використання окремих компонентів системи	обмеження / балансування
Частка порушень SLA	S	Частота невиконання встановлених вимог до сервісу	мінімізація
Вартість конфігурації	C	Сукупні витрати на ресурси та підтримку системи	мінімізація

Наведені показники утворюють основу для оцінювання ефективності обраної конфігурації ІС. Їх спільне використання дозволяє перейти від однокритеріального підходу до більш реалістичної багатокритеріальної постановки, у якій технічна результативність системи розглядається разом з економічною доцільністю її функціонування.

Обґрунтування використання метаевристичних алгоритмів

Запропонована математична модель передбачає наявність багатовимірному простору рішень, у якому можуть одночасно змінюватися ресурсні параметри, політики обслуговування та конфігураційні характеристики окремих компонентів. У таких задачах цільова функція часто є нелінійною, не має простої аналітичної форми, а також може містити дискретні та неперервні змінні. Це ускладнює використання класичних детермінованих методів оптимізації та робить доцільним застосування метаевристичних алгоритмів [1]–[5].

Алгоритм рою частинок є ефективним у задачах налаштування неперервних параметрів і характеризується порівняно швидкою збіжністю [2]. Диференціальна еволюція демонструє високу результативність у задачах глобального пошуку в неперервному просторі рішень [3]. Алгоритм імітації відпалу доцільно застосовувати у випадках, коли важливо підвищити стійкість пошуку до локальних мінімумів [1]. Генетичний алгоритм зручний для задач зі змішаними параметрами і складними схемами кодування рішень [4]. Бджолиний алгоритм та інші біоінспіровані підходи також можуть бути корисними у випадках, коли необхідно поєднати глобальний і локальний пошук [5].

У сучасних дослідженнях також підкреслюється ефективність гібридних підходів, які поєднують переваги різних метаевристичних у задачах ресурсної оптимізації хмарних, edge- та IoT-систем [8], [9], [10]. З огляду на це, запропонована математична модель може виступати основою для подальшого використання різних алгоритмів оптимізації, а її структура є достатньо універсальною для застосування у широкому спектрі інформаційних систем підприємств.

Практична інтерпретація запропонованої моделі

З практичної точки зору запропонована математична модель може бути використана як інструмент підтримки прийняття рішень щодо налаштування конфігурації інформаційної системи підприємства. Її використання дозволяє перейти від інтуїтивного або суто експертного підходу до кількісно обґрунтованого вибору параметрів ресурсного забезпечення. Особливо це важливо для систем, у яких навантаження змінюється впродовж доби, тижня або виробничого циклу, а вимоги до швидкодії та витрат залишаються критичними [6], [7], [11].

Практична цінність моделі полягає також у тому, що вона може бути інтегрована у контур адаптивного керування ресурсами, де оцінювання поточного стану системи, аналіз профілю навантаження, пошук кращої конфігурації та формування рекомендацій щодо масштабування виконуються періодично або в подієвому режимі. У такому випадку математична модель виступає ядром аналітичного блоку, на базі якого можуть надалі будуватися імітаційні моделі, алгоритми автоматичного керування або модулі інтелектуальної підтримки рішень.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У статті розглянуто актуальну науково-практичну задачу побудови математичної моделі оптимізації ресурсів інформаційної системи підприємства за критеріями продуктивності та вартості. Показано, що в сучасних умовах функціонування корпоративних інформаційних систем ефективність їх роботи значною мірою залежить від здатності забезпечувати необхідний рівень продуктивності за обмежених ресурсів і прийняттого рівня експлуатаційних витрат. Це зумовлює потребу у формалізованому підході до вибору конфігурації системи, який дозволяє одночасно враховувати технічні та економічні аспекти її функціонування.

У ході дослідження інформаційну систему підприємства формалізовано як багатокомпонентний об'єкт оптимізації, для якого визначено основні керовані параметри конфігурації, а також систему показників оцінювання ефективності. До ключових критеріїв віднесено середній час відповіді, пропускну здатність, рівень завантаження ресурсів, частку порушень SLA та сукупну вартість ресурсного забезпечення. На цій основі запропоновано узагальнену цільову функцію, що поєднує критерії продуктивності, вартості та штрафу за порушення SLA, а також

сформовано систему обмежень, яка відображає реальні технологічні та економічні умови експлуатації інформаційної системи підприємства.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що запропонована математична модель є придатною як теоретична основа для подальшого розв'язання задач оптимізації ресурсів інформаційних систем підприємств. Її перевагою є універсальність, оскільки вона може бути адаптована до різних типів корпоративних інформаційних систем, різної структури навантаження та різних управлінських пріоритетів. Крім того, показано, що складність простору допустимих рішень і багатокритеріальний характер задачі обумовлюють доцільність використання метаевристичних алгоритмів як інструментів оптимізаційного пошуку [1]–[5], [8]–[10].

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з кількома напрямками. По-перше, важливим є розширення запропонованої математичної моделі шляхом включення додаткових критеріїв, зокрема показників надійності, енергоспоживання, відмовостійкості та інформаційної безпеки. По-друге, доцільним є розроблення імітаційної моделі функціонування інформаційної системи підприємства, яка дозволить оцінювати поведінку системи при різних профілях навантаження та перевіряти якість знайдених конфігурацій. По-третє, перспективним напрямом є практична апробація запропонованої моделі із застосуванням окремих метаевристичних та гібридних алгоритмів оптимізації, зокрема алгоритму рою частинок, диференціальної еволюції та їх комбінованих схем, з метою визначення найбільш ефективних підходів до ресурсного налаштування інформаційних систем підприємств.

Внесок авторів

Максим КОРЕПАНОВ – збір і перевірка емпіричних даних, емпіричне дослідження, аналіз джерел, підготовка огляду літератури та теоретичних основ дослідження; Віктор САГАЙДАК – концептуалізація, методика, програмне забезпечення.

Декларація про штучний інтелект

Штучний інтелект використовувався для пошуку інформації в Інтернеті. Зокрема для теоретичного огляду алгоритмів оптимізації, аналізу останніх досліджень і публікацій.

Конфлікт інтересів

Відсутні будь-які конфлікти інтересів, під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

Список використаної літератури

1. Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P. *Optimization by Simulated Annealing* // *Science*. – 1983. – Vol. 220, No. 4598. – P. 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
2. Kennedy J., Eberhart R. *Particle swarm optimization* // *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
3. Storn R., Price K. *Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces* // *Journal of Global Optimization*. – 1997. – Vol. 11, No. 4. – P. 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
4. Goldberg D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. – Reading (MA): Addison-Wesley, 1989. – 412 p.
5. Pham D. T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S. *The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems* // *Intelligent Production Machines and Systems* / Ed. by D.T. Pham. – Elsevier, 2005. – P. 454–459.
6. Sheganaku, G., Schulte, S., Waibel, P., & Weber, I. *Cost-efficient auto-scaling of container-based elastic processes. Future Generation Computer Systems*, (2023). 138, 296–312. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.09.001>

7. Goel, G., & Tiwari, R. Resource scheduling techniques for optimal quality of service in fog computing environment: A review. *Wireless Personal Communications*, (2023), 131, 141–164. <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10421-4>
8. Dankolo, N. M., Radzi, N. H. M., Mustaffa, N. H., Arshad, N. I., Nasser, M., Gabi, D., & Yusuf, M. N. Optimizing resource allocation for IoT applications in the edge cloud continuum using hybrid metaheuristic algorithms. *Scientific Reports*, (2025), 15, 14409. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97648-2>
9. Kayalvili, S., Senthilkumar, R., Yasotha, S., & Kamalakannan, R. S. An optimized resource allocation in cloud using prediction enabled reinforcement learning. *Scientific Reports*, (2025), 15, 36088. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19927-2>
10. Manhary, F. N., Mohamed, M. H., & Farouk, M. A scalable machine learning strategy for resource allocation in database. *Scientific Reports*, (2025), 15, 30567. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14962-5>
11. Dogani, J., & Khunjush, F. Proactive auto-scaling technique for web applications in container-based edge computing using federated learning model. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, (2024). 187, 104837. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104837>
12. Cui, Z., & Yang, N. Optimization algorithm for enterprise decision making based on big data fusion. *CAD Journal | CAD and Applications*. (2024). [https://cad-journal.net/files/vol_21/CAD_21\(S21\)_2024_208-225.pdf](https://cad-journal.net/files/vol_21/CAD_21(S21)_2024_208-225.pdf)

M. Korepanov, V. Sahaidak

MATHEMATICAL MODEL FOR RESOURCE OPTIMIZATION OF AN ENTERPRISE INFORMATION SYSTEM BASED ON PERFORMANCE AND COST CRITERIA

The article addresses the relevant scientific and practical problem of developing a mathematical model for resource optimization of an enterprise information system based on performance and cost criteria. The relevance of the study is determined by the fact that modern enterprise information systems operate under dynamically changing workloads, limited computational, network, and financial resources, as well as increasing requirements for responsiveness, reliability, and service quality. Under such conditions, both insufficient and excessive resource provisioning negatively affect system efficiency. In the first case, overloads occur, response time increases, throughput decreases, and the share of SLA violations grows. In the second case, operational expenditures increase, which reduces the economic feasibility of maintaining the IT infrastructure.

The introduction substantiates the importance of enterprise information systems for ensuring business process continuity, supporting managerial decision-making, and maintaining organizational competitiveness. The problem statement highlights the need for a formalized approach to selecting a system configuration that would simultaneously consider technical and cost-related criteria. The literature review examines current approaches to resource optimization in enterprise, service-oriented, cloud, and fog/edge environments, as well as studies devoted to the application of metaheuristic algorithms in resource allocation problems. It is established that despite the significant progress in this field, insufficient attention has been paid to the construction of a generalized mathematical model aimed specifically at optimizing the resources of an enterprise information system as an integrated object.

The purpose of the study is to develop a mathematical model for optimizing the resources of an enterprise information system that formalizes the process of selecting a rational configuration according to performance and cost criteria. Within the study, the enterprise information system is represented as a multi-component optimization object whose configuration is described by a vector of controllable parameters. The main evaluation indicators include average response time, throughput, utilization level of individual resources, the proportion of SLA violations, and the total cost of resource provisioning. On this basis, an objective function is proposed that integrates performance losses, configuration cost, and a penalty for service requirement violations. In addition, a system of constraints is formed to reflect the actual technological and economic conditions of system operation.

The results of the study show that the proposed model can serve as a theoretical basis for further application of metaheuristic algorithms, particularly particle swarm optimization, differential evolution, and simulated annealing, in enterprise information system configuration problems. It is demonstrated that the multi-criteria nature of the problem and the complexity of the feasible solution space justify the use of such methods. The conclusions emphasize that the proposed mathematical model is sufficiently universal and adaptable to different types of enterprise information systems and can be extended toward simulation modeling, experimental validation, and hybrid algorithmic schemes for resource optimization.

Keywords: enterprise information system, resource optimization, mathematical model, performance, cost, metaheuristic algorithms, system configuration, SLA.

Надійшла до редакції: 31.07.2026

Прийнята до друку: 14.08.2026

Опубліковано: 17.08.2026

© 2026 Корепанов М. В., Сагайдак В. А.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>