

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.21>

УДК 004.89:005.8

Метод багаторівневого адаптивного перепланування ІТ-проектів колективом скоординованих агентів штучного інтелекту

Босв Олександр Петрович¹

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5628-2359>; faust040404@stud.op.edu.ua

¹ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У статті розв'язано науково-прикладне завдання адаптивного перепланування ІТ-проекту за спільної роботи спеціалізованих агентів штучного інтелекту. Актуальність дослідження зумовлена тим, що в динамічному середовищі відхилення строків, доступності ресурсів, вартості та ризику виникають одночасно, а локально доцільні пропозиції агентів можуть бути взаємно суперечливими. Однорівневе перепланування не розрізняє ситуації, у яких достатньо скоригувати параметри окремого завдання, і ситуації, що потребують зміни залежностей або повного перегляду залишкової частини плану. Запропоновано модель адаптивного планування ІТ-проекту, яка поєднує граф завдань, послідовність версій плану, динамічний стан проекту, події, відхилення, область їх структурного впливу та колектив спеціалізованих ІТ-агентів у єдиному циклі «подія – стан – пропозиції – новий план – фактичний результат». Модель колективної координації подає суперечності між агентними пропозиціями типізованою матрицею та графом конфліктів, визначає контекстний вплив агентів за їх функціональною відповідальністю, релевантністю, поточною впевненістю і накопиченою надійністю, підтримує обмежені поступки, повторні запити, тимчасове перепризначення координаційних функцій та ескалацію. На основі моделей розроблено метод багаторівневого адаптивного перепланування. Метод обчислює інтегральне відхилення, обирає один із чотирьох рівнів втручання, формує допустимі альтернативи у визначеній області змін, повторно перевіряє їх ресурсно-ризикову здійсненність, узгоджує конфліктні пропозиції та формує колективне рішення з урахуванням сценарної невизначеності й меж автономного застосування. Завершену частину проекту метод не змінює, а ціна нестабільності плану входить до інтегрального критерію. Експериментальне дослідження охопило одну тисячу дев'ясот двадцять тестових епізодів. Порівняно зі найсильнішим базовим методом – незваженим голосуванням – запропонований контур зменшив середню фактичну втрату на двадцять три цілих одинадцять сотих відсотка, нормоване жалкування – на вісімдесят одну цілу сімдесят три сотих відсотка, а частку жорстких порушень – на шістьдесят відсотків, підвищивши якість рішення на десять цілих одинадцять сотих відсотка. Абляційний аналіз підтвердив самостійний внесок динамічної моделі стану та механізмів колективної координації.

Ключові слова: управління ІТ-проектами; адаптивне планування; багаторівневе перепланування; мультиагентні системи; координація агентів; колективне прийняття рішень; штучний інтелект

Для цитування: Босв О. П. “Метод багаторівневого адаптивного перепланування ІТ-проектів колективом скоординованих агентів штучного інтелекту”. *Інформатика. Культура. Техніка.* 2026; Том 3 № 1 (3): 249–259. DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.21>

Актуальність. ІТ-проект виконується в середовищі, де змінюються вимоги, доступність виконавців, тривалість робіт, вартість і профіль ризику. Стандарти управління проектами рекомендують регулярно уточнювати план за результатами моніторингу, однак не визначають формальної процедури колективного вибору масштабу змін [1]. Ітераційні підходи скорочують горизонт зворотного зв'язку [2], але сам факт поділу роботи на спринти не усуває конфліктів між строковими, ресурсними, ризиковими та стабілізаційними цілями. За надто слабкої реакції відхилення накопичуються, за надмірної – команда втрачає стабільність, а витрати на перебудову плану можуть перевищити очікувану користь.

Традиційне централізоване перепланування концентрує оцінювання у планувальнику або керівнику проекту. Воно є зрозумілим організаційно, проте зі зростанням кількості взаємозалежних робіт і джерел невизначеності, одночасне врахування різномірних критеріїв стає дуже складним. Баланс між дисципліною плану й адаптивністю потребує не максимізації частоти змін, а вибору достатнього рівня втручання [3]. Отже, механізм перепланування повинен відрізняти локальне коригування параметрів від часткового перегляду структури та повного перепланування незавершеної частини проекту.

Мультиагентний підхід дає змогу розподілити аналіз між спеціалізованими компонентами, що мають власні інформаційні проєкції та локальні критерії [4], [5].

Проте сукупність агентів ще не утворює колективного планувальника. Пропозиція агента строків може вимагати залучення дефіцитного ресурсу, ресурсний агент може підтримати

дешевше призначення з неприйнятним ризиком, а ризиковий агент – запропонувати надто консервативний резерв. Без формалізованої координації незалежні рекомендації або просте голосування не гарантують допустимості й цілісності нового плану.

Таким чином, актуальним є розроблення методу, який спирається на цілісну модель адаптивного планування, визначає рівень перепланування за поточним станом проєкту, узгоджує пропозиції спеціалізованих ШІ-агентів і перетворює їх на здійснення колективного рішення. Така постановка безпосередньо поєднує перше положення наукової новизни – модель адаптивного планування – з другим положенням – моделлю колективної координації агентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основи агентного підходу, автономної поведінки та взаємодії інтелектуальних компонентів систематизовано в роботах [4], [5]. В даних роботах розглянуто цілі агентів, кооперацію, переговори, механізми вибору та розподілене прийняття рішень. В роботі [6] було показано, що координація є центральною проблемою побудови агентних систем, оскільки локальна раціональність не забезпечує глобально узгодженої поведінки.

Узагальнення архітектур, комунікацій і сфер застосування мультиагентних систем наведено в роботі [7]. Підходи до розподілу завдань між агентами та критерії їх порівняння досліджено в роботі [8]. Можливість адаптації поведінки агентів на основі досвіду розглянуто в огляді [9]. Переговорні механізми розподіленого розв’язання задач започатковано протоколом Contract Net [10], а принципи кооперації та досягнення угод у багатоагентному середовищі систематизовано в роботі [11]. Новітній напрям автономних агентів на основі великих мовних моделей розширює можливості формування планів і пояснень, однак зберігає потребу у формальних обмеженнях, перевірці та координації [12].

Наявні дослідження пропонують протоколи переговорів, розподіл завдань, голосування або навчання спільної політики. Водночас у задачі управління ІТ-проєктом необхідно зберігати версійну цілісність плану, відрізняти завершені роботи від змінюваної області, враховувати жорсткі календарно-ресурсні обмеження та ціну нестабільності. Недостатньо дослідженим залишається спільне використання динамічної моделі стану, багаторівневого масштабу втручання, типізованого графа конфліктів і контекстних ваг впливу агентів у межах одного циклу перепланування.

Окремий напрям становить ресурсно-обмежене календарне планування. Варіанти та розширення класичної задачі RCPSP систематизовано в роботі [13], а її моделі, класифікацію та тестові набори – в працях [14], [15]. Підходи до календарного планування за невизначеності узагальнено в роботі [16], проблеми динамічного перепланування – в роботі [17], а компроміс між тривалістю та стабільністю плану досліджено в роботі [18]. Ці результати обґрунтовують критерії допустимості й стабільності, проте не визначають, як спеціалізовані ШІ-агенти мають колективно обирати масштаб втручання та узгоджувати суперечливі альтернативи.

Багатокритеріальне порівняння планів може виконуватися еволюційними засобами, зокрема на основі принципів недомінованого сортування [19]. Оцінювання рішень за невизначеності потребує врахування не лише математичного сподівання, але й несприятливої частини розподілу втрат. Для цього доцільно використовувати умовну вартість під ризиком $CVaR$ [20] та принципи робастної оптимізації [21]. Проте ці інструменти визначають спосіб порівняння альтернатив, а не структуру колективного формування й узгодження плану. Тому в цій роботі сценарний критерій вбудовано у багаторівневий мультиагентний контур.

Метою дослідження є розробка методу багаторівневого адаптивного перепланування ІТ-проєктів колективом скоординованих ШІ-агентів на основі моделі динамічного стану проєкту та моделі колективної координації. Для досягнення мети необхідно формалізувати стан і версії плану, визначити правило вибору рівня втручання, описати формування, перевірку й узгодження агентних пропозицій, встановити критерій колективного вибору за

невизначеності та експериментально порівняти запропонований контур із базовими способами перепланування.

Модель адаптивного планування ІТ-проекту. Проект подано орієнтованим графом $G = (T, E)$, де $T = \{T_1, \dots, T_n\}$ – множина завдань, а E – множина відношень передування. На момент прийняття рішення t використовується поточна версія плану

$$P(t) = (G(t), B(t), X(t), R(t), V(t)), \quad (1)$$

де $B(t)$ містить планові моменти початку і завершення робіт; $X(t)$ – призначення ресурсів; $R(t)$ – резерви; $V(t)$ – ідентифікатор версії. Наступна версія позначається $P(t+1)$, а завершена частина $P^{done}(t)$ є незмінною. Така умова запобігає ретроспективній перебудові вже виконаних робіт і зберігає трасованість управлінських рішень.

Динамічний стан проекту формується чотирма взаємопов'язаними блоками:

$$s(t) = (s_T(t), s_R(t), s_P(t), s_Z(t)), \quad (2)$$

де $s_T(t)$ описує стани завдань; $s_R(t)$ – доступність і навантаження ресурсів; $s_P(t)$ – виконання поточної версії плану; $s_Z(t)$ – зовнішні умови. Після спостережуваної події $z(t+1)$ стан оновлюється оператором $s(t+1) = \Psi(s(t), z(t+1), P(t))$.

На відміну від представлення стану одним показником готовності, вектор $s(t)$ зберігає структурний зв'язок між джерелом відхилення та завданнями, на які воно поширюється. Часткові відхилення строку D_T , ресурсів D_R , вартості D_C , навантаження D_L і зовнішнього середовища D_Z нормуються до інтервалу $[0; 1]$.

Інтегральний сигнал визначається як

$$D(t) = \beta_T D_T(t) + \beta_R D_R(t) + \beta_C D_C(t) + \beta_L D_L(t) + \beta_Z D_Z(t), \quad \sum_q \beta_q = 1. \quad (3)$$

Безпосередньо проблемні завдання утворюють множину $T_0(t)$. Щоб не обмежувати перепланування лише видимим джерелом проблеми, формується структурний контур $T_c(t)$, що включає наступників у графі, пов'язані ресурсні конфлікти та завдання, для яких порушуються обмеження. Межа поширення визначається глибиною впливу та затуханням наслідку.

Рівень адаптації $g(t)$ належить множині $\{0, 1, 2, 3\}$ і визначається за інтегральним відхиленням та життєздатністю поточної версії плану:

$$g(t) = \begin{cases} 0, & D(t) < \theta_1 \text{ і план залишається життєздатним;} \\ 1, & \theta_1 \leq D(t) < \theta_2; \\ 2, & \theta_2 \leq D(t) < \theta_3; \\ 3, & D(t) \geq \theta_3 \text{ або порушено жорстку допустимість.} \end{cases} \quad (4)$$

Рівень 0 означає збереження плану або параметричне уточнення без перебудови; рівень 1 – локальне коригування робіт у $T_c(t)$; рівень 2 – часткову зміну залежностей, призначень і резервів у розширеному контурі; рівень 3 – повне перепланування незавершеної частини проекту. Порогові значення не є універсальними: вони калібруються за допустимими втратами організації, а гістерезис між підвищенням і зниженням рівня запобігає частим коливанням.

Якість кандидатного плану P' оцінюється п'ятьма критеріями: тривалістю $\tau(P')$, вартістю $C(P')$, ризиком $\rho(P')$, нерівномірністю навантаження $L(P')$ і нестабільністю $S(P', P(t))$.

Інтегральна втрата має вигляд

$$J(P') = \alpha_\tau \hat{\tau}(P') + \alpha_C \hat{C}(P') + \alpha_\rho \hat{\rho}(P') + \alpha_L \hat{L}(P') + \alpha_S \hat{S}(P', P(t)), \quad \sum_q \alpha_q = 1. \quad (5)$$

Нормування забезпечує порівнюваність критеріїв. Компонента стабільності не забороняє глибоке втручання, але вимагає, щоб його користь перевищувала організаційну ціну зміни. Перша складова наукової новизни полягає у формуванні єдиної моделі адаптивного планування M_P , яка поєднує структуру проєкту, версії плану, динамічний стан, оператор його оновлення, правила локалізації відхилень, рівень адаптації, множину допустимих альтернатив $F(t)$ та історію рішень $H(t)$. Саме цей причинний контур відрізняє модель від набору незалежних показників моніторингу.

Модель колективної координації ШІ-агентів. Колектив складається з агентів строків A_T , ресурсів A_R , ризику A_P та координації A_M .

Формально:

$$A = \{A_1, \dots, A_m\}, \quad A_k = (\omega_k, I_k, F_k, J_k, o_k, h_k, w_k), \quad (6)$$

де ω_k – спеціалізація; $I_k(t)$ – інформаційна проєкція стану; $F_k(t)$ – локальна множина кандидатів; J_k – рольова функція втрат; $o_k(t)$ – пропозиція; $h_k(t)$ – поточна впевненість; $w_k(t)$ – накопичена надійність. Агент отримує не весь стан, а релевантну проєкцію $I_k(t) = Q_k(t)s(t) + \varepsilon_k(t)$, де $Q_k(t)$ визначає доступні компоненти, а $\varepsilon_k(t)$ відображає неповноту й похибку даних. Відсутнє значення не прирівнюється до нуля: воно знижує впевненість і може обмежити автономність пропозиції.

Пропозиція агента $o_k(t)$ містить кандидатний план, локальну оцінку, поточну впевненість, обґрунтування, версії використаних стану й плану та строк чинності.

Усі пропозиції перевіряються на відповідність версіям стану V_S і плану V_P . Це усуває узгодження рекомендацій, сформованих для різних інформаційних зрізів. Граф взаємодії $G_A(t) = (A^+(t), E_A(t))$ залежить від активних агентів, рівня $g(t)$ та типів виявлених відхилень.

Суперечності подаються матрицею $C_A(t) = [c_{kr}(t)]$, де елемент c_{kr} характеризує наявність і тяжкість конфлікту між пропозиціями агентів k і r . Ураховуються строковий, ресурсний, ризиковий та критеріальний типи.

Граф конфліктів визначається як:

$$G_C(t) = (A^+(t), E_C(t)), \quad (k, r) \in E_C(t) \Leftrightarrow c_{kr}(t) > 0. \quad (7)$$

Щільність конфліктів визначається відношенням фактичної кількості ребер $|E_C(t)|$ до максимально можливої для активного колективу, а інтегральна тяжкість – середнім значенням ненульових $c_{kr}(t)$. Ці показники використовуються для вибору звичайного, посиленого або ескалаційного режиму координації.

Вплив агента не є постійним. Він поєднує базову рольову відповідальність ψ_k^0 , поточну впевненість, історичну надійність і релевантність $rel_k(t)$ до поточного відхилення:

$$\psi_k(t) = \psi_k^0 h_k(t) w_k(t) rel_k(t), \quad \bar{\psi}_k(t) = \frac{\psi_k(t)}{\sum_{r \in A^+(t)} \psi_r(t)}. \quad (8)$$

Контекстне зважування не поширюється на жорсткі обмеження: недопустимий план не може бути прийнятий більшістю голосів. У зв'язній конфліктній групі агенти виконують обмежену кількість раундів уточнення. Поступка агента допустима, якщо не порушує його жорстких обмежень і не збільшує локальну втрату більше ніж на ϵ_k^J . За відсутності прогресу активуються повторний запит, тимчасове перепризначення координаційної функції або ескалація керівнику проєкту.

Модель координації M_C включає граф і матрицю конфліктів, їх щільність і тяжкість, нормовані ваги впливу, правила узгодження Φ_C , узгоджену множину допустимих альтернатив $F_C(t)$, рівень консенсусу K_{cons} , ознаку ескалації e_C та журнал Tr_C . Друге положення наукової новизни полягає у спільному використанні типізованої структури конфліктів, динамічного впливу агентів, обмежених поступок і контекстного перепризначення функцій у межах одного адаптивного циклу.

Взаємодія моделей у єдиному контурі. Модель адаптивного планування і модель колективної координації виконують різні, але взаємозалежні функції. Перша визначає, що саме сталося з проєктом, наскільки далеко поширюється наслідок події та яку частину плану дозволено змінювати. Друга визначає, як перетворити різні рольові оцінки цієї ситуації на узгоджену множину здійснених альтернатив. Тому координація запускається не для всього колективу за кожної події, а лише після локалізації відхилення: склад активних агентів і доступні оператори залежать від $T_c(t)$ та рівня $g(t)$. Це зменшує обсяг обміну повідомленнями й запобігає втручанням агента в нерелевантну частину плану.

Наскрізним обмеженням є версійна узгодженість. Кожна пропозиція посиляється на конкретні версії стану і плану; повідомлення з простроченою версією не бере участі в агрегуванні та повертається агенту для повторного оцінювання. Після кожної поступки або зміни призначення перевіряються відношення передування, ресурсна місткість, бюджетні межі та максимальний прийнятний ризик. Отже, переговори змінюють переваги й параметри допустимих альтернатив, але не можуть скасувати жорсткі обмеження. Такий поділ важливий для керованості: ваги агентів визначають вплив на вибір між здійсненими планами, а не право легалізувати недопустимий план.

Параметри моделей поділяються на організаційні та адаптивні. До організаційних належать ваги критеріїв, бюджети втручання, межі автономності й перелік жорстких обмежень; їх задає керівник проєкту або офіс управління проєктами. До адаптивних належать релевантність агентів, поточна впевненість, історична надійність і режим координації; вони залежать від стану та накопиченої історії. Порогові значення θ_1 , θ_2 , θ_3 калібруються на навчальних епізодах так, щоб мінімізувати сумарну ціну недостатньої й надмірної реакції. Для запобігання частому перемиканню рівнів використовуються різні пороги підвищення та зниження, а різка зміна рівня за неповних даних потребує підтвердження людиною.

Тип конфлікту визначає спосіб його опрацювання. Строкова суперечність усувається перевіркою критичного шляху та доступного резерву; ресурсна – повторним пошуком призначення або зміною календаря; ризикова – сценарним аналізом і введенням захисного резерву; критеріальна – обмеженою поступкою в межах локальної функції втрат. Якщо кілька типів конфлікту виникають одночасно, пріоритет мають жорстка допустимість і ризик, після чого уточнюються строк, вартість, навантаження та стабільність. За відсутності поліпшення протягом заданого числа раундів система не продовжує переговори безмежно, а формує пояснення невирішених суперечностей і переводить рішення на вищий рівень контролю.

Практична реалізація передбачає збереження не лише нового плану, а й повного сліду його формування: вхідної події, змінених ознак стану, активованих агентів, відхилених альтернатив, причин конфліктів, поступок, підсумкових ваг і маршруту затвердження. Це дає змогу відтворити рішення під час аудиту, порівняти прогнозовані та фактичні наслідки й надалі адаптувати параметри без порушення причинної послідовності. Таким чином, перша модель забезпечує змістову й часову цілісність перепланування, а друга – узгодженість колективної дії; лише їх спільне використання утворює завершений механізм підтримки рішення.

Метод багаторівневого адаптивного перепланування. Вхід методу утворюють $P(t)$, $s(t)$, історія $H(t)$ та нова подія $z(t + 1)$. Виходом є рішення $\delta(t)$, застосовна версія $P^{app}(t + 1)$, пояснювальний пакет і журнал. Послідовність операцій наведено на Рис. 1.

На першому кроці перевіряються цілісність події та відповідність версій, після чого оператор Ψ оновлює стан. На другому кроці обчислюються $D(t)$ і $T_c(t)$, визначається попередній рівень $g(t)$. На третьому кроці активуються релевантні агенти, кожен з яких формує локальну множину кандидатів.

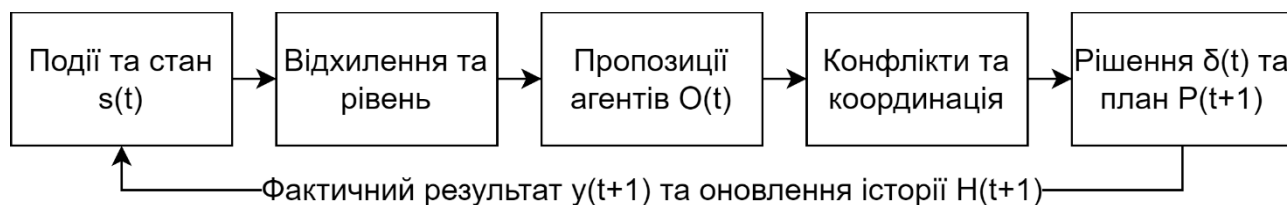


Рис. 1. Послідовність багаторівневого адаптивного перепланування

Джерело: розроблено автором

Допустима множина для рівня g визначається як

$$F_g(t) = \{P' \in F(t): (P')^{done} = P^{done}(t), \Omega_g(P', P(t)) \leq b_g\}, \quad (9)$$

де Ω_g обмежує область і глибину змін; b_g – бюджет втручання. Якщо множина порожня або не містить життєздатних варіантів, рівень підвищується; якщо всі варіанти надмірні щодо спостереженого відхилення, рівень знижується. Отже, вибір рівня та формування альтернатив утворюють узгоджений, але скінченний цикл.

На четвертому кроці пропозиції проходять структурну, ресурсну, календарну й ризикову перевірку. На п'ятому формується $G_C(t)$ і виконуються раунди координації. Узгоджена множина є перетином альтернатив, які пройшли жорстку перевірку та досягли мінімального рівня прийняття:

$$F_C(t) = \{P' \in F_g(t): P' \models C^{hard}(t), K_{acc}(P') \geq \theta_{acc}\}, \quad (10)$$

На шостому кроці альтернативи оцінюються за сценаріями $sc_q \in Sc(t)$ з імовірностями p_q . Очікувана колективна втрата $\bar{L}_C(P')$ обчислюється як зважене середнє сценарних втрат, а хвостовий ризик $CVaR_\alpha(P')$ – як середня втрата в несприятливій частині розподілу, що перевищує рівень Var_α .

Інтегральний критерій рішення включає очікувану втрату, варіативність, хвостовий ризик, нестабільність і нестачу робастності:

$$J_D(P') = \kappa_1 \bar{L}_C(P') + \kappa_2 V_L(P') + \kappa_3 CVaR_\alpha(P') + \kappa_4 S(P', P(t)) + \kappa_5 (1 - Rb(P')). \quad (11)$$

Колективна впевненість формується з нормованої ентропії розподілу переваг, відриву найкращої альтернативи від наступної та рівня консенсусу. Рішення застосовується автоматично лише тоді, коли рівень втручання входить до дозволеної області автономії, жорсткі обмеження виконані, а впевненість перевищує поріг. Інакше формується маршрут підтвердження керівником або ескалації.

Завершальний крок доповнює історію $H(t)$ причинним епізодом, що містить вихідний стан, пропозиції агентів, граф конфліктів, прийняте рішення, нову версію плану та фактичний результат. Завдяки цьому кожне перепланування залишається відтворюваним і придатним для подальшої ретроспективної оцінки.

Отже, метод не зводиться до голосування за готові плани. Він послідовно визначає достатній масштаб втручання, обмежує область змін, використовує спеціалізовані оцінки, виявляє конфлікти, зберігає жорстку допустимість і керує маршрутом застосування результату.

Для кожного рівня використовується власна множина операторів. На нульовому рівні дозволено уточнення прогнозних оцінок і резервів без зміни структури графа. Локальний рівень допускає зміщення строків, заміну ресурсу та зміну резерву в межах $T_C(t)$. Частковий рівень розширює область до пов'язаних фрагментів, дозволяє перебудову окремих залежностей, поділ завдань і перерозподіл ресурсів. Повний рівень повторно формує незавершену частину графа, але зберігає факти виконання, прийняті результати та незмінні зовнішні обмеження. Відповідність рівнів і операторів наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1. Оператори та межі рівнів адаптивного перепланування

Рівень	Область змін	Основні оператори	Типовий маршрут
0	параметри чинного плану	уточнення прогнозу, резерву та пріоритету без структурної зміни	автоматичне застосування за достатньої впевненості
1	локальний контур $T_c(t)$	зміщення строку, заміна ресурсу, коригування резерву	автоматично або підтвердження керівника
2	пов'язані фрагменти графа	зміна призначень і залежностей, поділ завдань, перерозподіл резервів	обов'язкове керівне підтвердження
3	вся незавершена частина	реконструкція графа, календаря, ресурсної схеми та профілю ризику	ескалація та колективне затвердження

Джерело: розроблено автором

Виконання методу організовано як скінченний цикл. По-перше, кожна пропозиція має строк чинності та посиляється на конкретні версії стану і плану. По-друге, число раундів координації обмежується L_C . По-третє, підвищення рівня припиняється після досягнення $g = 3$, а відсутність допустимої альтернативи переводить систему до безпечного режиму збереження останньої здійсненої версії та формування пакета ескалації. По-четверте, жодна поступка не може скасувати обмеження передування, місткості ресурсу, граничного бюджету або неприйнятності ризику.

Узагальнений алгоритм містить такі операції:

- 1) прийняти подію, перевірити її повноту та оновити $s(t)$;
- 2) обчислити часткові відхилення, $D(t)$, $T_0(t)$ і $T_c(t)$;
- 3) визначити попередній рівень $g(t)$ та активувати релевантних агентів;
- 4) сформувати й перевірити $F_g(t)$, за потреби уточнити рівень;
- 5) побудувати матрицю й граф конфліктів, виконати не більше L_C раундів узгодження;
- 6) оцінити $F_C(t)$ за сценаріями, визначити $P^*(t) = \operatorname{argmin}_{P' \in F_C(t)} J_D(P')$, колективну впевненість і маршрут;
- 7) застосувати або передати рішення людині, після виконання додати результат до $H(t + 1)$.

Нехай N_F – кількість сформованих альтернатив; m – кількість активних агентів; $|E_C|$ – число ребер графа конфліктів; N_S – кількість сценаріїв; q – кількість критеріїв.

Без урахування складності внутрішніх планувальників агентів верхня оцінка координаційно-вибіркової частини становить:

$$O(mN_Fq + L_C|E_C| + N_S|F_C|q). \quad (12)$$

Найбільш витратною є генерація планів-кандидатів, яку агенти виконують паралельно. Побудова матриці конфліктів і сценарне оцінювання масштабуються відносно кількості активних пропозицій, а не повного простору всіх можливих планів. Це дає змогу керувати обчислювальними витратами через рівень $g(t)$, бюджет альтернатив N_F і граничну кількість раундів L_C .

Пояснювальний пакет містить зафіксовану подію, змінені компоненти стану, причини вибору рівня, відхилені альтернативи з порушеними обмеженнями, позиції агентів, невирішені конфлікти, значення критеріїв і умови автономного застосування. Така трасованість потрібна не лише для аудиту: вона створює однозначну основу для подальшого зіставлення рішення з фактичним результатом і розвитку ретроспективної адаптації стратегій агентів.

Експериментальне дослідження. Окремий тестовий епізод відповідав моменту, у якому до чинного плану надходила подія про затримку роботи, недоступність ресурсу, зміну

вартості, активацію ризику або зміну пріоритету. Для всіх альтернативних методів використовувалися однакові стани, події та множини планів-кандидатів. Це усуває вплив різних вхідних умов на порівняння.

Тестова вибірка містила 240 незалежних проєктів по вісім епізодів, разом 1 920 епізодів. Кількість завдань змінювалася від 35 до 120, кількість ресурсів – від 8 до 24. Для кожного епізоду формувалося по чотири альтернативи рівнів $g = 0, 1, 2, 3$. Параметри надійності агентів і пороги рівнів попередньо калібрувалися на окремій вибірці та не змінювалися за тестовими результатами. Генератор псевдовипадкових чисел використовував початкове значення 20260828. Основні параметри наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2. Параметри експерименту

Параметр	Значення
Кількість тестових проєктів	240
Епізоди на проєкт / загальна кількість	8 / 1 920
Завдання / ресурси в проєкті	35–120 / 8–24
Рівні втручання	0, 1, 2, 3
Альтернативи на кожному рівні	4
Спеціалізації агентів	строки, ресурси, ризик, координація
Ваги критеріїв (τ, C, ρ, L, S)	0,28; 0,22; 0,24; 0,14; 0,12
Початкове значення генератора	20260828

Джерело: розроблено автором

Порівнювалися п'ять підходів: збереження статичного плану; лише локальна адаптація з $g \leq 1$; централізований одноразовий вибір за рівновагою згортою; незважене голосування агентів; запропонований метод. Результат оцінювався за фактичною інтегральною втратою, нормованим жалкуванням щодо найкращої здійсненої альтернативи, якістю рішення $Q = 1 - J$ і часткою жорстких порушень. Узагальнені значення наведено в Таблиці 3.

Таблиця 3. Порівняльні результати на 1 920 тестових епізодах

Метод	Фактична втрата	Жалкування	Якість рішення	Жорсткі порушення, %
Статичний план	0,4059	0,1876	0,5941	15,68
Локальна адаптація	0,3413	0,1231	0,6587	13,33
Централізований вибір	0,3683	0,1500	0,6317	14,22
Незважене голосування	0,3043	0,0860	0,6957	10,16
Запропонований метод	0,2340	0,0157	0,7660	4,06

Джерело: розроблено автором

Найсильнішим базовим методом виявилось незважене голосування. Порівняно з ним запропонований метод зменшив середню фактичну втрату з 0,3043 до 0,2340, тобто на 23,11 %. Нормоване жалкування зменшилося на 81,73 %, а частка жорстких порушень – з 10,16 % до 4,06 %, або на 60,00 %. Якість рішення зросла на 10,11 %. Середня парна різниця втрат становила 0,0703, її 95-відсотковий бутстреп-інтервал дорівнював [0,0644; 0,0763]. Однобічний критерій Вілкоксона підтвердив статистичну значущість переваги ($p < 0,001$).

Статичний план мав найнижчу ціну безпосередньої перебудови, проте накопичував строкові й ризикові наслідки, тому його інтегральна втрата була найбільшою. Локальне перепланування покращило результат, але не могло усунути відхилення, що виходили за межі одного фрагмента графа. Централізований вибір виявився чутливим до рівновагового усереднення рольових оцінок. Незважене голосування використовувало спеціалізацію агентів, але не враховувало їх різну надійність і не робило жорстку допустимість некомпенсаторною.

Для перевірки внеску складових виконано абляцію: з повного контуру послідовно вилучали динамічну модель стану й вибір рівня, контекстні ваги агентів або граф конфліктів із посиленою перевіркою жорстких обмежень. Результати наведено в Таблиці 4.

Таблиця 4. Результати абляційного аналізу

Варіант	Фактична втрата	Жалкування	Якість рішення	Жорсткі порушення, %
Повний контур	0,2352	0,0152	0,7648	3,85
Без динамічного стану	0,2400	0,0200	0,7600	5,42
Без контекстних ваг	0,2364	0,0164	0,7636	4,06
Без графа конфліктів	0,2358	0,0158	0,7642	4,53

Джерело: розроблено автором

Вилучення динамічної моделі стану збільшило жалкування на 31,86 % і частку жорстких порушень на 40,78 %, оскільки метод втрачав структурно обґрунтовану межу між локальним, частковим і повним втручанням. Відмова від контекстних ваг збільшила жалкування на 8,21 %: оцінка менш надійного агента отримувала той самий вплив, що й підтверджена рольова оцінка. Вилучення графа конфліктів збільшило частку жорстких порушень на 17,66 %, хоча середня втрата змінилася незначно. Це показує, що граф конфліктів виконує передусім захисну функцію та не може оцінюватися лише середнім значенням цільової функції.

Отримані результати кількісно підтверджують обидві складові наукової новизни. Перша – модель адаптивного планування – забезпечує коректне визначення області та рівня втручання. Друга – модель колективної координації – зменшує наслідки суперечливих оцінок і кількість недопустимих рішень. Їх поєднання дає більший ефект, ніж ізольоване застосування локальної адаптації або голосування.

Висновки. У роботі запропоновано метод багаторівневого адаптивного перепланування ІТ-проектів колективом скоординованих ІІІ-агентів. Метод визначає масштаб втручання за динамічним станом і структурою відхилень, зберігає завершену частину плану, формує альтернативи в обмеженій області змін, повторно перевіряє їх здійсненність, узгоджує суперечливі агентні пропозиції та формує рішення з урахуванням сценарної невизначеності й меж автономності.

Перше положення наукової новизни полягає у створенні моделі адаптивного планування, що об'єднує граф проекту, версії плану, динамічний стан, події, інтегральне відхилення, область структурного впливу, рівень адаптації, допустимі альтернативи й історію результатів у єдиному причинному циклі. Друге положення полягає в удосконаленні моделі колективної координації завдяки типізованому графу конфліктів, контекстним вагам впливу агентів, обмеженим поступкам, повторним запитам, тимчасовому перепризначенню координаційних функцій та формалізованій ескалації.

Експеримент на 1 920 епізодах показав, що запропонований контур порівняно зі найсильнішим базовим методом зменшує фактичну втрату на 23,11 %, нормоване жалкування на 81,73 % і частку жорстких порушень на 60,00 %, підвищуючи якість рішення на 10,11 %. Абляція підтвердила самостійний внесок динамічної моделі стану та координаційних механізмів.

Конфлікт інтересів: Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті

Фінансування: Дослідження проводилося без фінансової підтримки

Доступність даних: Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису

Використання засобів штучного інтелекту (ІІІ): Автори підтверджують, що не застосовували інструментальні засоби ІІІ для написання цієї роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Turner, J. R. & Müller, R. “On the nature of the project as a temporary organization”. *International Journal of Project Management*. 2003; 21 (1): 1–8. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00020-0).
2. Schwaber, K. & Sutherland, J. “The Scrum guide: The definitive guide to Scrum: The rules of the game”. 2020. – Available from: <https://scrumguides.org/scrum-guide.html>. – [Accessed: 26.05.2026].
3. Boehm, B. & Turner, R. “Management challenges to implementing Agile processes in traditional development organizations”. *IEEE Software*. 2005; 22 (5): 30–39. DOI: <https://doi.org/10.1109/MS.2005.129>.
4. Wooldridge, M. & Jennings, N. R. “Intelligent agents: Theory and practice”. *The Knowledge Engineering Review*. 1995; 10 (2): 115–152. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>.
5. Shoham, Y. & Leyton-Brown, K. “Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations”. *Cambridge: Cambridge University Press*; 2009. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811654>.
6. Jennings, N. R., Sycara, K. & Wooldridge, M. “A roadmap of agent research and development”. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 1998; 1 (1): 7–38. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010090405266>.
7. Dorri, A., Kanhere, S. S. & Jurdak, R. “Multi-Agent Systems: A survey”. *IEEE Access*. 2018; 6: 28573–28593. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831228>.
8. Gerkey, B. P. & Mataric, M. J. “A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems”. *The International Journal of Robotics Research*. 2004; 23 (9): 939–954. DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364904045564>.
9. Stone, P. & Veloso, M. “Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective”. *Autonomous Robots*. 2000; 8 (3): 345–383. DOI: [10.1023/A:1008942012299](https://doi.org/10.1023/A:1008942012299).
10. Smith, R. G. “The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver”. *IEEE Transactions on Computers*. 1980; C-29 (12): 1104–1113. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>.
11. Kraus, S. “Negotiation and cooperation in multi-agent environments”. *Artificial Intelligence*. 1997; 94 (1–2): 79–97. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(97\)00025-8](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(97)00025-8).
12. Wang, L., Ma, C., Feng, X., Zhang, Z., Yang, H., Zhang, J., Chen, Z., Tang, J., Chen, X., Lin, Y., Zhao, W. X., Wei, Z. & Wen, J. “A survey on large language model based autonomous agents”. *Frontiers of Computer Science*. 2024; 18 (6): 186345. DOI: [10.1007/s11704-024-40231-1](https://doi.org/10.1007/s11704-024-40231-1).
13. Hartmann, S. & Briskorn, D. “A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem”. *European Journal of Operational Research*. 2010; 207 (1): 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.005>.
14. Brucker, P., Drexler, A., Möhring, R., Neumann, K. & Pesch, E. “Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods”. *European Journal of Operational Research*. 1999; 112 (1): 3–41. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00204-5).
15. Kolisch, R. & Sprecher, A. “PSPLIB – A project scheduling problem library”. *European Journal of Operational Research*. 1997; 96 (1): 205–216. DOI: [10.1016/S0377-2217\(96\)00170-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00170-1).
16. Herroelen, W. & Leus, R. “Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials”. *European Journal of Operational Research*. 2005; 165 (2): 289–306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.002>.
17. Ouelhadj, D. & Petrovic, S. “A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems”. *Journal of Scheduling*. 2009; 12 (4): 417–431. DOI: [10.1007/s10951-008-0090-8](https://doi.org/10.1007/s10951-008-0090-8).
18. Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W. & Leus, R. “The use of buffers in project management: The trade-off between stability and makespan”. *International Journal of Production Economics*. 2005; 97 (2): 227–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.08.004>.

19. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T. “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002; 6 (2): 182–197. DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.

20. Rockafellar, R. T. & Uryasev, S. “Optimization of conditional Value-at-Risk”. *The Journal of Risk*. 2000; 2 (3): 21–41. DOI: <https://doi.org/10.21314/JOR.2000.038>.

21. Ben-Tal, A., El Ghaoui, L. & Nemirovski, A. “Robust Optimization”. *Princeton, NJ: Princeton University Press*; 2009. DOI: <https://doi.org/10.1515/9781400831050>.

Отримано 20.07.2026

Отримано після перегляду 28.08.2026

Прийнято 03.09.2026

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.21>

UDC 004.89:005.8

Multi-level adaptive replanning method for IT projects by a collective of coordinated artificial intelligence agents

Oleksandr P. Boeiv¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5628-2359>; faust040404@stud.op.edu.ua

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Av. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

This paper addresses the scientific and applied problem of adaptive IT-project replanning by a collective of specialized artificial intelligence agents. The study is motivated by the simultaneous occurrence of schedule, resource, cost and risk deviations and by the fact that locally rational agent proposals may contradict one another. A single-level procedure cannot distinguish situations in which changing one task is sufficient from situations that require dependency restructuring or complete replanning of the unfinished project scope. An adaptive IT-project planning model is proposed that integrates the task graph, successive plan versions, dynamic project state, observed events, deviations, their structural impact scope and a collective of specialized AI agents into a single “event – state – proposals – new plan – actual outcome” cycle. The collective coordination model represents contradictions through a typed conflict matrix and graph, determines contextual agent influence from functional responsibility, relevance, current confidence and historical reliability, and supports bounded concessions, repeated requests, temporary reassignment of coordination functions and escalation. The resulting multi-level method calculates an integral deviation signal, selects one of four intervention levels, generates feasible alternatives within a bounded change scope, rechecks their resource and risk feasibility, coordinates conflicting proposals and produces a collective decision under scenario uncertainty and controlled autonomy. The completed project scope remains unchanged, while plan instability is explicitly included in the decision criterion. An experimental study covering one thousand nine hundred and twenty test episodes compared the proposed method with a static plan, local-only adaptation, centralized selection and unweighted voting. Against the strongest baseline, unweighted voting, the proposed method reduced actual loss by twenty-three point one one percent, normalized regret by eighty-one point seven three percent and hard-constraint violations by sixty percent, while increasing decision quality by ten point one one percent. Ablation results confirmed the separate contributions of the dynamic-state model and the collective coordination mechanisms.

Keywords: IT project management; adaptive planning; multi-level re-planning; multi-agent systems; agent coordination; collective decision-making; artificial intelligence

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРА



Босєв Олександр Петрович - аспірант, кафедра Штучного інтелекту та аналізу даних, Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

Галузь досліджень: штучний інтелект, мультиагентні системи, розподілені обчислення, машинне навчання.

Oleksandr P. Boeiv – postgraduate, Artificial Intelligence and Data Analysis Department, Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Av. Odesa, 65044, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5628-2359>; faust040404@stud.op.edu.ua

Research field: artificial intelligence, multi-agent systems, distributed computing, machine learning.