

Т. М. Боровська¹
 Д. І. Гришин¹
 І. С. Колесник¹
 В. А. Северілов¹

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ ПРОЕКТІВ НА БАЗІ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО АГРЕГУВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто управління системами проектів з урахуванням життєвого циклу продукції. Розроблено математичні моделі і програмне забезпечення для систем проектів. Програмне забезпечення має модулі для настроювання параметрів математичної моделі, модулі введення даних і аналізу результатів моделювання. Базова інтерпретація математичної моделі — комплекс виробництва, ритейлу, логістики комплектуючих і кінцевих продуктів та систем рециклінгу. Технологічні системи можуть знаходитись в станах проектування, побудови, випуску продукції, модифікації технологій і продуктів виробництва. Мета статті — розробка математичних моделей: окремих проектів як виробництва продукції з урахуванням попиту, конкуренції, необхідності оновлення технологій і продукту виробництва; систем проектів з урахуванням управління часом виконання окремих проектів. Вибрано концептуальну теоретичну базу розробки: ресурсний підхід, методологію оптимального агрегування і розв'язання варіаційних задач оптимального розподілу ресурсів в процесах функціонування і розвитку об'єктів. Розроблено інтегровану математичну модель «монопроект», в якій виконується оптимальне агрегування виробничої системи в стані побудови, функціонування і обчислення оптимальної стратегії розвитку. Результатом обчислень програмного модуля «монопроект» є матричні структури, подібні записам баз даних. Результатом оптимального агрегування є заміна багатовимірної задачі нелінійного програмування оптимальною еквівалентною одновимірною. Багатовимірна задача нелінійного програмування розділяється в систему (бінарне дерево) задач одновимірної оптимізації. Результат використання методу — зняття проблеми розмірності об'єктів, виключення пошукових процедур, що забезпечує обчислювальну ефективність, гарантований час обчислень і стійкість до відмов. Отримано такі нові науково-практичні результати: оптимальне управління моментами часу запуску і закінчення окремих монопроектів, оптимальне управління ринковими вікнами — моментами часу зняття з продаж одних продуктів і запуску нових; розробка нових бінарних операторів оптимального агрегування елементів системи проектів — монопроектів. Проведено моделювання тестової системи проектів, порівняльний аналіз з системою без оптимального агрегування підтвердив переваги нової моделі системи проектів.

Ключові слова: оптимальне агрегування, варіаційна задача, оптимальний розвиток, система проектів, монопроект.

Вступ

Сьогодні стійко розвиваються напрями: «цифровий інжиніринг», «безпілотні системи управління», «цифрові копії об'єкта». Загальне в цих термінах — імітаційна модель об'єкта, придатна для заміни реального об'єкта у всіх ситуаціях, де це корисно:

- у випробуваннях нових авто на всі випадки наїздів;
- ресурсних випробувань на надійність;
- створення тренажерів-імітаторів для широкого кола застосувань.

Програмний комплекс — імітатор потрібен і для управління системою проектів. Остання проблема в розробці управління системою проектів — проблема розмірності моделей проектів: для розв'язання задач синтезу управління бажано мати моделі малої розмірності, для задач аналізу (імітаційного моделювання) — деталізовані моделі великої розмірності.

Сучасні виробничі системи як об'єкти проектування і управління мають низку принципових відмінностей від виробничих систем індустріальної епохи. Для актуальних інновацій створюються стійкі терміни, що з часом змінюють «наповнення», або втрачають його. Останнє відбувається, якщо інновація не має «твердого» математичного фундаменту, а також лідерів, що генерують інновації.

Практика управління проектами має тисячорічну історію, сучасний математичний фундамент управління проектами складається з окремих фрагментів — «фінансової математики» (калька з англійської), елементів економічної теорії, теорії лінійних систем. В зв'язку з глобалізацією, глобальними масштабами і впливами на оточення сучасних проектів природно включати в модель проекту проблеми збереження оточення.

Помилковим є «проектне рішення»: виробництво цільового продукту — окремо, ринок і продажі, переробку відходів основного виробництва — окремо. Джерелом абстрактних моделей і практичних рішень можуть бути природні стійкі екологічні системи [4], [5] — джерело ідей для розробки управління системами проектів. Головна проблема в еволюції сучасних систем виробництва — відставання математичного і програмного забезпечення сучасних виробництв від розвитку технологій і зростання складності сучасних виробництв [4], [6]. Оптимізація виробництва ускладнюється високою розмірністю, динамічністю і суттєвою нелінійністю характеристик виробничих систем. Це потребує розробки нових моделей, методів і програм для нових комп'ютерно інтегрованих систем управління.

Виробничі системи і техпроцеси виробництва, як об'єкти моделювання і управління, мають велику кількість змінних і параметрів. Складні нелінійні зв'язки між змінними, недостатність апріорної інформації про закономірності перебігу процесів створюють значні труднощі при моделюванні технологічних процесів (ТП), якщо користуватись класичними методами оптимізації такими, як лінійне, випукле, цілочислове програмування. Головний недолік класичних методів — комбінаторне зростання обчислювальних витрат у разі зростання розмірності задачі оптимізації. Вимоги існуючих методів — лінійність, неперервність функцій і похідних, не вирішують проблему розмірності. Сучасні методи оптимізації є пошуковими і не гарантують отримання задовільного результату за гарантований час.

Мета дослідження — розробка математичної моделі і програмних модулів оптимального управління системою проектів, що знімає проблеми розмірності і нелінійностей об'єктів управління. Для досягнення мети поставлені такі завдання дослідження:

- аналіз аналогів і прототипів об'єкта розробки;
- розробка елемента системи проектів — «монопроекту»;
- розробка структури і функцій системи проектів;
- оптимальне агрегування структури «система проектів»;
- приклади розв'язання задач управління часом виконання монопроектів.

Виробничі системи і техпроцеси виробництва як об'єкти моделювання і управління обтяжені декількома проблемами, які поки що не мають задовільних розв'язань. Це:

- проблема розмірності об'єктів управління, названа Р. Беллманом «прокляттям розмірності» [8];
- проблема пошукових методів оптимізації;
- проблема раціональних структур для управління великими системами.

Щодо проблем нелінійності, нестационарності, невизначеності, нечіткості — це вторинні проблеми в рамках задекларованої в назві статті методології оптимального агрегування [3].

Аналіз прототипів — задач оптимального агрегування і оптимального розвитку

Стаття не є наукометричним аналізом стану області «управління проектами» — це тема для монографій. Розв'язання поставлених завдань не є покращенням і розвитком відомих аналогів і прототипів. Прототипи визначаємо не за ключовими словами, а за об'єктом, моделями і методами. Близькими аналогами є роботи [17] та [1], [3], [4], [12], [18]—[21], [24], [25]. Конкретизуємо базові математичні моделі проектів розвитку виробництва. Проект — занадто широко вживаний до «самоочевидності» термін, особливо в англійській термінології. Певні наукові поняття є важкими для сприйняття через відсутність (новизну) понять. У авторів є напрацьовані рішення щодо методів оптимального агрегування і методів розв'язання варіаційних задач оптимального розвитку за термінологію Р. Беллмана.

Визначення базових понять

Використовуємо ресурсний підхід [1]—[3]. Ресурси — матеріальні, інформаційні, енергетичні та інші витрати в процесах виробництва і розвитку. Внутрішні, зовнішні ресурси — системно-аналітичні поняття, що залежать від того, як проводяться границі системи: внутрішні ресурси — ті, що створені в границях системи.

Продукти виробництва — результати виробництва — матеріальні об'єкти, що задовольняють потреби і мають ціну і цінність, інформаційні та інтелектуальні продукти — математичні моделі, програми, дані вимірювань станів функціонування та ін. Продукти у виробничих системах і системах проектів можуть мати внутрішнє і зовнішнє використання. Підсистеми виробничої системи — це сукупність обладнання (виробничих потужностей), виконує певні технологічні операції.

Сьогодні невисокотехнологічне виробництво неконкурентне, тому підсистеми виробництва мають інтегровані підсистеми розробки і модифікації програмного забезпечення, лабораторії контролю молекулярного складу і структури деталей та інше. Такі підсистеми віднесемо до класу інтегровані системи «виробництво, розвиток». В підсумку розглядаємо такі класи підсистем «виробництво», «виробництво, розвиток», «виробництво, рециклінг», «обслуговування і логістика», «інновації». Залежно від рівня технологічного процесу, технологічним об'єктом управління можуть бути технологічні агрегати і установки, групи верстатів, окремі виробництва (цехи, дільниці), що реалізують окремі частини загального процесу виробництва [1]—[4]. Деталізуємо процеси у виробничій системі:

Процес функціонування виробничої системи — технологічне перетворення вхідних ресурсів у вихідні продукти — цільові і побічні (відходи, ресурси інших техпроцесів) без суттєвих змін технології, ефективності та виробничої потужності.

Процес розвитку виробничої системи — зміна технології, конструкції та виробничих потужностей, а також структурні зміни — закриття і відкриття підсистем, простоювання, консервація. В оптимальному агрегуванні ресурси розподіляються між виробництвом і розвитком [3], [4], [12], [18].

Процес освоєння та «випалювання дефектів», в результаті чого ефективність і надійність виробничої системи досягають планових показників і потім реалізуються, як нові потужності в процесах «розвитку» і, власне, в процесах «виробництва продукції». Ідеальними є системи, де процес освоєння відсутній — після встановлення і включення система видає якісну продукцію. Слід відрізнити освоєння планове для інноваційних об'єктів і освоєння через недосконалість технологічного об'єкта. За термінологією [26] сучасне виробництво є «трипродуктовим». Продукти це: нові технології, нові виробничі системи, продукти для індивідуального і суспільного використання. Тобто сучасне виробництво повинно мати підсистеми «освоєння», «розвиток», «виробництво». Управління проектами можемо розділити на:

- оперативне управління — визначення і реалізація поточних оптимальних управлінських дій, метою яких заданий поточний стан технологічної системи;

- стратегічне управління — визначення і реалізація поточних управлінських дій, метою яких є досягнення бажаного стану технологічної системи в певний кінцевий період, тобто зміна майбутнього стану через поточні управління. Для проектів типовий бажаний стан — закінчення і здача об'єкта.

Оптимальна стратегія управління — функція часу або фазових координат технологічної системи така, що забезпечує екстремум певного критерію в кінцевий момент процесу. Для задач розвитку це, звичайно, інтегральні критерії типу «накопичений випуск продукції за плановий період», «накопичені витрати за плановий період» за відповідних обмежень на ресурси і обсяги випуску продукту [1]—[3], [9], [12], [14].

Методи оптимального агрегування

Подаємо ресурсні визначення базових понять оптимального агрегування. Технологічний елемент — перетворювач певних ресурсів у певний продукт. Розподілені технологічні системи можуть бути багатопродуктовими і багаторесурсними [2], [3]. Це дає нам можливість оперувати з агрегованими — одноресурсними, однопродуктовими структурами, котрі еквівалентні багаторесурсним, багатопродуктовим структурам. *Продукт* — результат виробництва, що знайшов використання за межами, або в середині системи. Це вироби, матеріали, продукти, інформація та ін.

Функція виробництва (ФВ) — залежність між кількістю витрачених ресурсів і кількістю виробленого продукту в деякій технологічній системі. Модель виробничої функції — математичний

опис ФВ для певного класу реальних технологічних елементів. Далі, за замовчуванням, замість терміну «модель виробничої функції» використовуємо термін «функція виробництва» (ФВ) [2], [3]. *Ресурсні зв'язки і структури*. Виробничі системи поєднуються в підсистеми вищого рівня. Розглянемо типові ресурсні структури виробництва. Відрізняємо ресурсні структури виробництва і продукту виробництва. Звертаємо увагу на «самоочевидні» поняття тому, що ця робота базується на методології оптимального агрегування, яка має відмінності від методів і методологій класичної науки. Особливість виробничих систем — ієрархічність, наявність математичних моделей різного рівня деталізації. Дослідженням ієрархічних виробничих систем описані у великій кількості статей і монографій, написаних вченими з різних областей науки — технічними спеціалістами, економістами, математиками, спеціалістами з електротехніки, ракетно-космічної техніки [5]—[11], [14]—[16], [22], [23]. Операційна суть оптимального агрегування — заміна вибору точки в багатовимірному просторі системою виборів точки в одновимірних фазових просторах. Так поставив стратегічну мету своїх досліджень Р. Беллман [9]. Методи оптимального агрегування дозволяють замінити багатовимірну задачу нелінійного програмування еквівалентною системою одновимірних задач, для оптимізації яких вибрано метод прямого перебору. Це дозволяє зняти низку проблем, породжених методами пошуку, апроксимації функцій, спрощення моделей.

Розглянемо типові ресурсні структури — паралельні, послідовні та інші, які є об'єктами алгебри оптимального агрегування. Для кожного класу структур потрібно створювати відповідний бінарний оператор. Це нетривіальна задача тому, що в бінарний оператор вбудовується оптимізація розподілу ресурсу між парою елементів. Реалізація бінарного оператора — функція користувача з параметрами. Параметризація операцій оптимального агрегування дає можливість вирішення складних проблем. На рис. 1 показано моделі виробничого елемента і базових структур поєднань елементів.

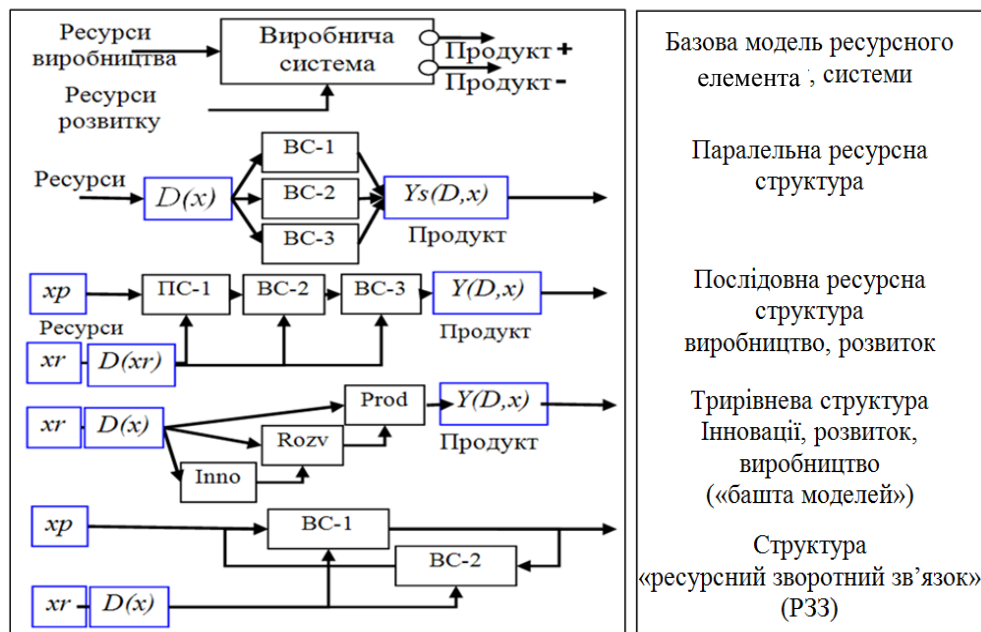


Рис. 1. Базові ресурсні структури виробничих систем

Звернемо увагу на два класи ресурсних входів — ресурси для поточного виробництва і ресурси розвитку. Ресурси виробництва перетворюються в продукцію виробництва, ресурси розвитку перетворюють виробничі потужності в напрямку підвищення їх ефективності. В рамках методології оптимального агрегування розроблено розширену модель оптимального агрегування «виробництво, розвиток». Бінарний оператор оптимального агрегування «виробництво, розвиток» розподіляє ресурс інтегрованої системи між випуском продукції і підвищенням ефективності власне виробництва. В математичному аспекті маємо систему з параметричними зв'язками.

На рис. 2 подано оптимальне агрегування базових структур. Для кожної структури подано формулу оптимального агрегування в структурному вигляді — функцію користувача з параметром X — входним ресурсом.

В оптимальному агрегуванні важливий компонент подання інформації — 3D графіки. На рис. 3 наведені приклади оптимального агрегування паралельної (частина А) і послідовної (частина В) бінарних структур для відповідних пар функцій виробництва (ФВ).

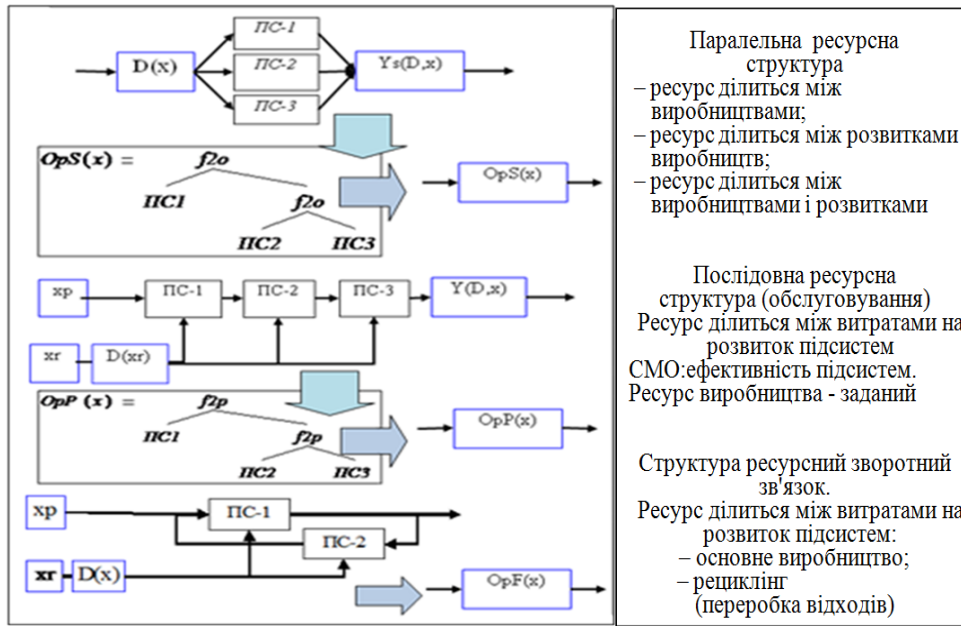


Рис. 2. Оптимальне агрегування типових структур ВС

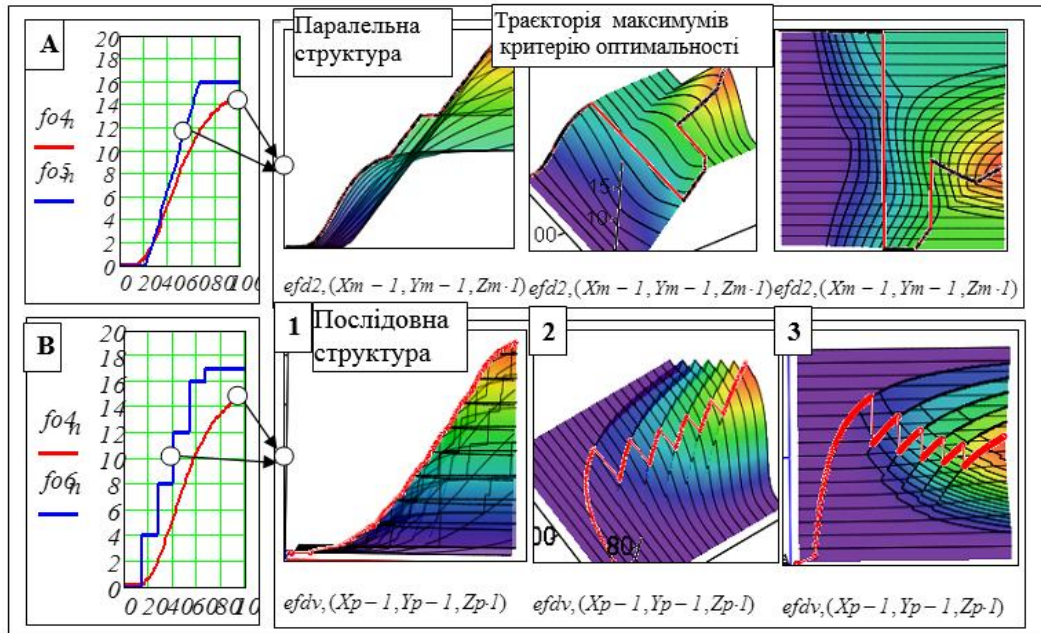


Рис. 3. Візуальний аналіз бінарних операцій оптимального агрегування

Для тестування взяті гладкі і негладкі ФВ. В частинах А та В побудовані по три однакових 3D графіка, але в різних проекціях. На кожному 3D-графіку виведені:

- цільова функція (критерій оптимізації);
- годограф максимумів на поверхні цільової функції.

Осі 3D графіка: X — витрати ресурсу, Y — значення функції розподілу ресурсу α , Z — значення цільової функції. На проекціях графіків подані: 1 — оптимальні еквівалентні функції виробництва (обслуговування); 2 — загальний вид цільової функції і годографа максимумів; 3 — функція оптимального розподілу ресурсу нормовану ($0 \leq \alpha \leq 1$).

Звернемо увагу на другий приклад — оптимальне агрегування гладкої і ступінчастої функції. Подивимось графіки 1 — оптимальна еквівалентна функція виробництва (ОЕФВ) — без розривів, і 3 — функція оптимального розподілу має численні розриви, відповідно кожній «сходинці» функції виробництва елемента.

Бачимо, що на відміну від класичних методів, метод оптимального агрегування працює з дискретними і дискретизованими функціями «витрати, випуск». Метод однаково обробляє лінійні і

нелінійні, випуклі і невивуклі функції. Звернемо увагу на проекції 1 3D графіків — їх обвідні є ОЕФВ. На рис. 2 подано процес — результат моделювання — структурні формули. На рис. 3 — візуальний аналіз бінарної операції оптимального агрегування для двох прикладів.

На рис. 4 подано інформаційну модель оптимального агрегування.

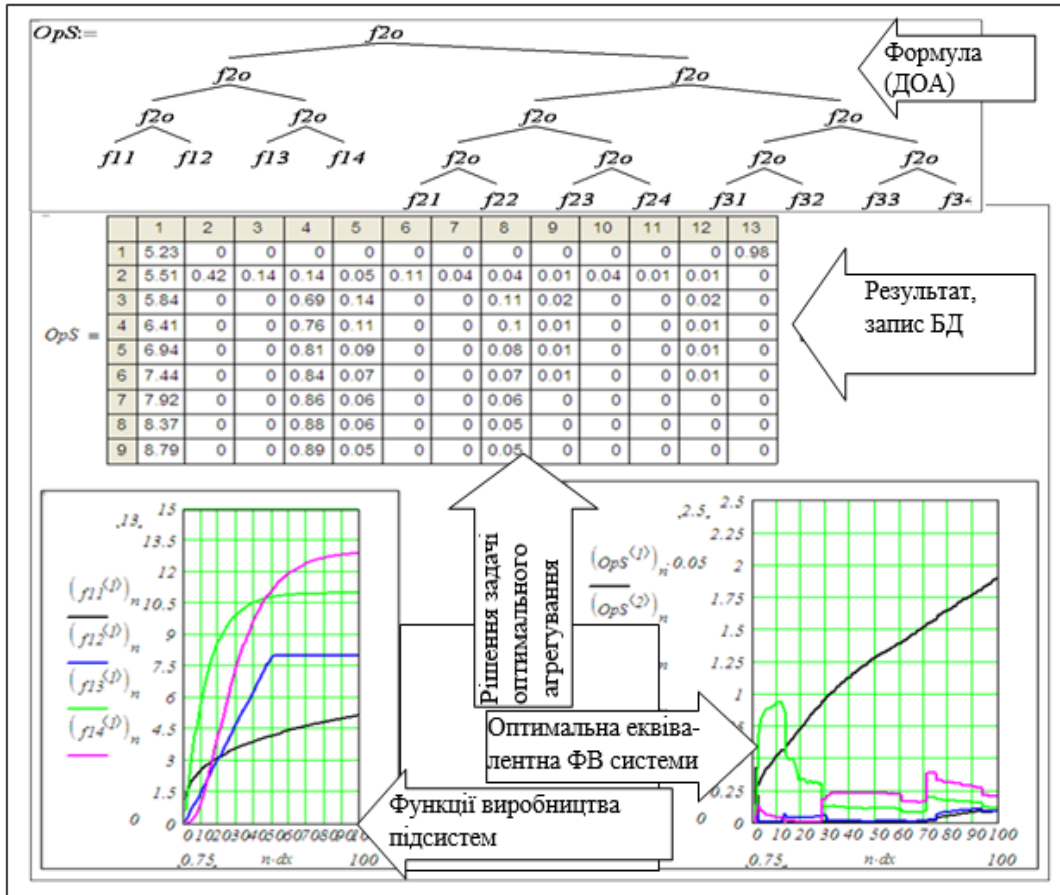


Рис. 4. Оптимальне агрегування довільної структури. Інформаційний аналіз

Інформаційна структура, подана на рис. 4, складається з таких об’єктів:

- бінарного дерева оптимального агрегування (ДОО) системи з 12 елементів;
- OpS — результат обчислення ДОО (ДОО — це матриця зі структурою подібною запису бази даних, рядки — кроки дискретизованого процесу обчислень, стовпці — дані стану агрегованої системи);
- нижня частина: відповідні графіки, екстраговані з матриці OpS .

Підведемо підсумки загального і предметного (на прикладах) аналізу методів оптимального агрегування. Ми виконуємо розробку моделі і програм для ефективного управління системою проектів, підсистем і окремих елементів системи проектів (монопроектів). Бачимо, що методи оптимального агрегування відповідають вимогам до систем управління проектами і можуть бути настроєні на проекти з будь-якою специфікою.

На рис. 5 подано порядок розв’язання прикладних задач управління на базі методів оптимального агрегування.

Схема на рис. 5 має три рівня:

- визначення ресурсної структури об’єкта елементів і зв’язків між елементами;
- отримання бінарного дерева оптимального агрегування (ДОО);
- збирання розподіленої комп’ютерної системи управління на базі ДОО. В цьому випадку кожен елемент ресурсної структури має ізоморфне відображення в структури наступного рівня: (ФВ11 → FV11, ФВ14 → FV14). Також відображаються і зв’язки між елементами: (ФВ11 → ФВ12) ⇔ $f2o$; (ФВ13 → ФВ14) ⇔ $f2fb$. Інтерпретація цих виразів: паралельна структура відображується в оператор оптимального агрегування $f2o$, структура «ресурсний зворотний зв’язок» — у відповідний бінарний оператор $f2fb$.

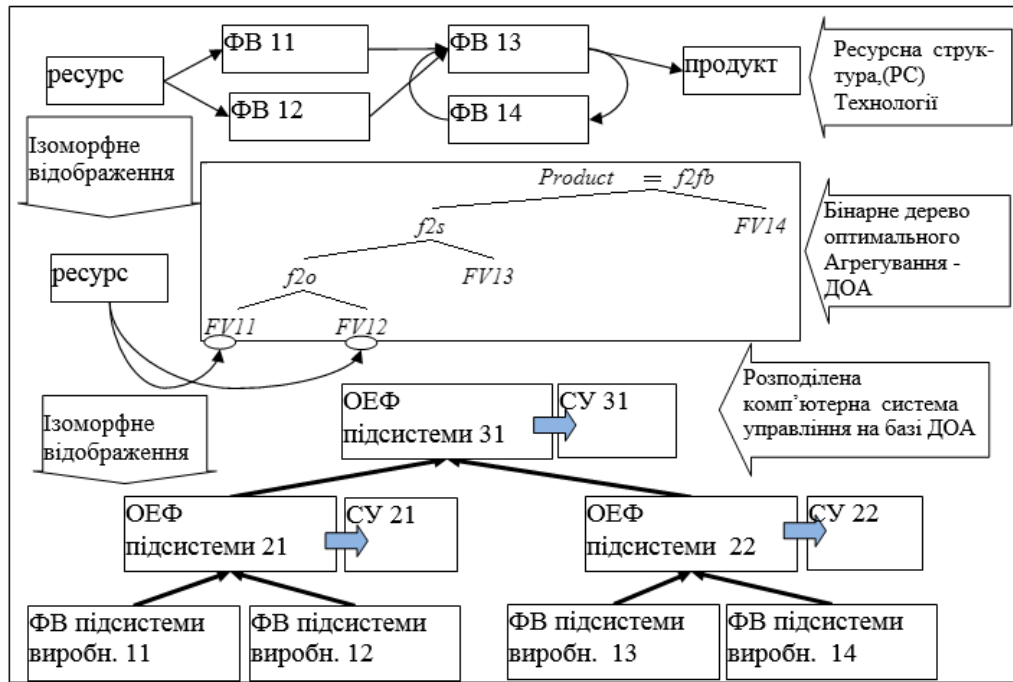


Рис. 5. Порядок розв'язання задач управління на базі методів оптимального агрегування

Третій рівень на рис. 5 — це відображення в розподілену комп'ютерну систему управління розглядається в подальшій частині статті. Моделі і методи оптимального агрегування відрізняються від аналогів тим, що класичні роботи починаються з формалізованого викладення обмежень: лінійність, строга монотонність, випуклість, наявність неперервних похідних, а потім за допомогою аналітичних методів знаходиться точне чи наближене аналітичне розв'язання інтелектуально пошуковими числовими методами, обчислювальні витрати яких зростають комбінаторно. Класичні теорії будувалися навколо зручних класів функцій — логарифмічних, експоненційних; статистична наука теж побудована навколо пуассонівських, гауссівських, гіперболічних розподілів. Існував інший шлях вибору функцій — знайти «механізми», що є причинами реальних об'єктів і процесів, прикладами є роботи видатних вчених [5], [7], [9]. В класичних прикладних роботах математичні моделі об'єктів мали як джерело статистику. Дж. Форрестер [5] запропонував для створення моделей виробництва використовувати «породжуючі механізми». Він також стверджував, що модель певного виробництва актуальна на етапі його побудови, а модель існуючого виробництва мало актуальна. Сьогодні умови функціонування виробництв і можливості комп'ютерних систем роблять напрям створення «цифрових копій об'єкта» актуальним.

Методи оптимального управління розвитком

Для побудови управління поточним станом вибрано методологію оптимального агрегування. Для побудови стратегічного управління проектами вибираємо рішення варіаційних задач розвитку з критеріями «першого роду» — сумарними витратами, доходами. Критерій накопичення — не єдина альтернатива для проектів, можлива побудова управління на базі критерію «сумарні витрати ресурсу розвитку». Варіаційні задачі з таким критерієм є важливим компонентом моделей систем проектів. Визначимо базові поняття.

Функція розвитку — залежність між обсягом ресурсів, що вкладаються в розширення виробничої потужності (максимального значення ФВ), і прирощенням виходу «продукції». В цій роботі поняття «функція виробництва», «функція розвитку», «оцінка» — конкретні, суто технологічні показники. Функція виробництва при наявності розвитку буде вже нестационарною — змінною в часі [19]—[21].

Плановий період — інтервал часу від початку розвитку до моменту, коли це виробництво вичерпує свої можливості, замінюється принципово іншими за технологією і навіть за призначенням. Оптимальний процес розвитку — результат розв'язання варіаційної задачі з інтегральним критерієм типу «накопичений сумарний прибуток за плановий період» [3], [9], [12].

Критерій:
$$J = \int_0^{T_p} f(x, cv, cp) dt = \int_0^{T_p} \left[x(t) \cdot (cp(t) - cv(t)) - f_{inv} \left(\frac{d}{dt} x(t) \right) \right] dt$$

Функція освоєння
$$f_{cv}(cp, t) = vv \cdot p_0^{K_0 \cdot \ln(t)} \cdot \frac{K_0}{t} \cdot \ln(p_0) - \frac{vp}{Fd(cp)^2} \cdot \frac{d}{dt} (Fd(cp))$$

Функція Гамільтона:
$$H(cv, cp) = \sum_{i=0}^n \psi_i \cdot f_i = \psi_j \cdot f_j + \psi_{cv} \cdot f_{cv} + \psi_x \cdot x$$

Рівняння спряжених (з критерієм і собівартістю) функцій:

$$\frac{d}{dt} \psi_j(t) = - \frac{\partial}{\partial J} H(cv, x, cp); \quad \frac{d}{dt} \psi_{cv}(t) = \frac{\partial}{\partial cv} H(cv, x, cp).$$

Розв'язання для функції Гамільтона (робочий вираз – з програми)

$$Hr(cv, cp, t) := \left[Fd(cp) \cdot (cp(t) - cv(t)) - K_{inv} \cdot \left(\frac{d}{dt} Fd(cp(t)) \right) \right] \dots + \left(\int_0^t Fd(cp(t)) dt + Co2 \right) \cdot \left[vv \cdot p_0^{K_0 \cdot \ln(t)} \cdot \frac{K_0}{t} \cdot \ln(p_0) - \frac{vp}{Fd(cp)^2} \cdot \frac{d}{dt} (Fd(cp)) \right]$$

Рис. 6. Математична модель варіаційної задачі розвитку для задачі розвитку з урахуванням освоєння — «цінові стратегії»

Цим результатом є функція часу або координат стану динамічного об'єкта. Такі функції задають управління на весь період процесу.

Розвиток — зміна виробничих потужностей, номенклатури, конструкцій і технологій виробництва продуктів. Практична мета підприємства — виживання у глобальній ринковій системі. Напрямок досягнення мети — підвищення ефективності виробництва і ефективності використання продукції. Засіб — розробка математичної моделі оптимального розвитку. На рис. 6 наведено приклад моделі варіаційної задачі «цінові стратегії».

На рис. 7 подано приклад розрахунку оптимального процесу розвитку для варіаційної задачі оптимального розвитку.

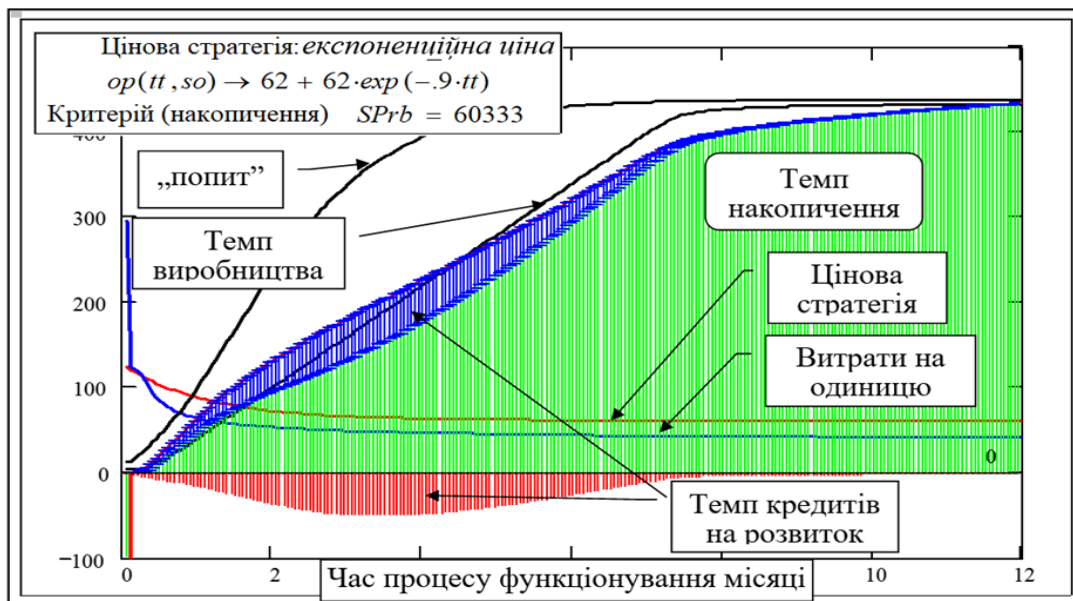


Рис. 7. Моделювання проекту розвитку з урахуванням кредитів

На рис. 8 показана інформаційна структура підсистеми «оптимального розвитку». Наведені приклади процесів розвитку — малі фрагменти постановки і розв'язання задач, отримання розв'язків досить складної варіаційної задачі [3], [20], [21]. Досвід авторів в роботі з такими об'єктами свідчить про необхідність цілісного розуміння компонентів «оптимальне агрегування» і «оптимальний розвиток» — для їх об'єднання в цілісний об'єкт «монопроект».

На рис. 8 подано разом компоненти модуля оптимальний процес розвитку (подібно рис. 3, 4). Бачимо: функцію користувача $KM(F, pr, pd, Tpl)$, її текст, специфікацію вектора стану, 3D-графік функції Гамільтона і її годограф максимумів. В нижній частині подано графіки процесу оптимального розвитку, стрілками — відповідні точки.

Порівняємо графіки процесів розвитку на рисунках 7 і 8: процеси подібні, але не тотожні — це різні варіаційні задачі. В першій змінна управління — ціна продажу продукту виробництва, в другій — пропорція розподілу ресурсу між витратами на виробництво і на розвиток. Тобто, для формування моделі монопроект ми беремо не окремі розв'язки задач однокрокової і багатокрокової

оптимізації, а класи моделей «оптимальне агрегування» і «оптимальний розвиток» з відповідними методологіями і узагальненими математичними моделями.

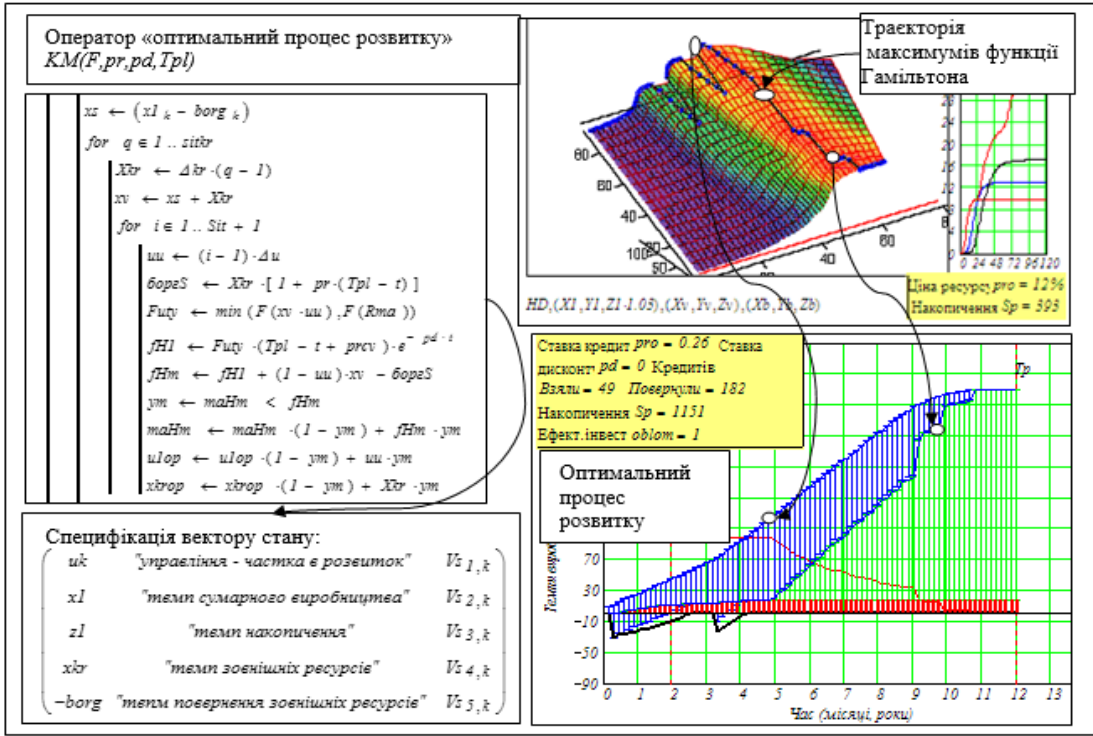


Рис. 8. Оптимальний розвиток виробничої системи. Інформаційний аналіз

Розробка і аналіз елемента системи проектів — «монопроекта»

На базі аналізу функцій, які повинні виконувати система управління проектом вибрано рішення розробки моделі управління проектом як поєднання модулів «оптимальне агрегування» і «оптимальний розвиток». В розділі 1 проведено аналіз і тестування цих модулів для різних моделей об'єктів і методів оптимізації. Модулі «оптимальне агрегування» і «оптимальний розвиток» обмежено використовувались як автономні. Накопичення розробок і досліджень дозволило поставити задачу інтеграції цих модулів в модуль оптимального управління виробництвом і розвитком. Назва «монопроект» підкреслює цілісність обчислень і застосування оперативного і стратегічного оптимальних управлінь об'єктом. На рис. 9 подано дві альтернативи поєднання модулів «оптимальне агрегування» і «оптимальний розвиток»: 1 — статичний зв'язок; 2 — динамічний зв'язок. В альтернативі 2 маємо зворотний зв'язок з модулем «динаміка підсистем».



Рис. 9. Зв'язки модулів «оптимальне агрегування» і «оптимальний розвиток»

На рис. 10 подано приклад процесів в модулі «динаміка підсистем» і дані коментарі. В методі оптимального агрегування функції «витрати, випуск» дискретизовані, і в програмі оптимального агрегування реалізовані режими обчислень спряжених задач оптимізації: «максимум сумарного виробництва» і «мінімум сумарних витрат». Також вбудовано модуль імітації випадкових збурень і відмов підсистем [25].

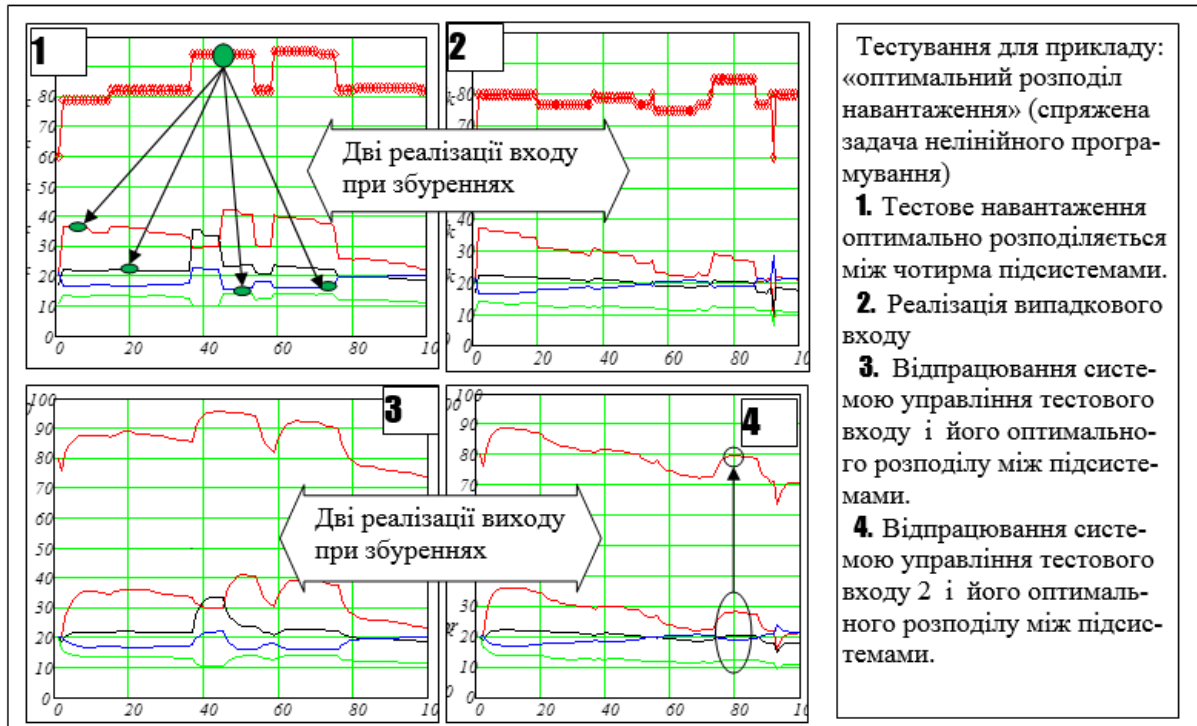


Рис. 10. Динаміка оптимально агрегованої системи». Тестування

Тобто, модуль «монопроект» базується на системі з апробованих і відкритих для розвитку модулів оптимізації і може бути використаним для побудови управління системою проектів.

Модель системи проектів

Вибираємо для системи проектів ієрархічну структуру, але не з «страт», «ешелонів», та «шарів прийняття рішень» [16], а з підсистем з конкретними ресурсними та інформаційними зв'язками, елементів бінарного дерева оптимального агрегування (ДОА) (рис. 11). На відміну від інтуїтивних схем, стрілки передачі інформації на верхні рівні та управління на нижні рівні — математично визначені. На рис. 10 подано приклад моделювання динаміки для однорівневої структури.

На рис. 11 деталізація функцій багаторівневої схеми, показаної на рис. 5. Відмінність запропонованої багаторівневої ієрархічної структури в тому, що інформація від нижніх рівнів верхнім передається згідно з алгоритмом оптимального агрегування. На рис. 4 і 5 подано:

- ресурсну схему системи як технологічного перетворювача «ресурси — продукти»;
- бінарне дерево оптимального агрегування, що задає структуру бінарних операцій оптимального агрегування;
- матриця результату агрегування, що містить результати оптимального розподілу ресурсу, починаючи з нижнього рівня.

В бінарному операторі оптимального агрегування розробник може ввести управління інформаційною структурою операнда: записувати, не записувати, закрити певні дані в операнді результату. Тобто, інформація і управління в багаторівневному бінарному дереві оптимального агрегування може бути об'єктом саме інформаційного управління.

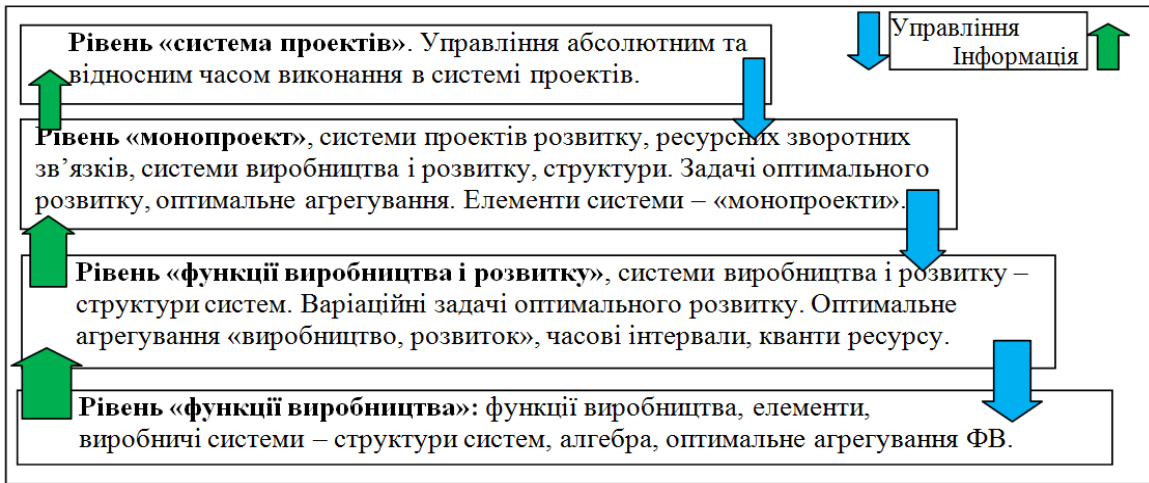


Рис. 11. Структура задач розробки управління системою проектів

На рис. 12 подано приклад конкретизації структури, зображеної на рис. 11.

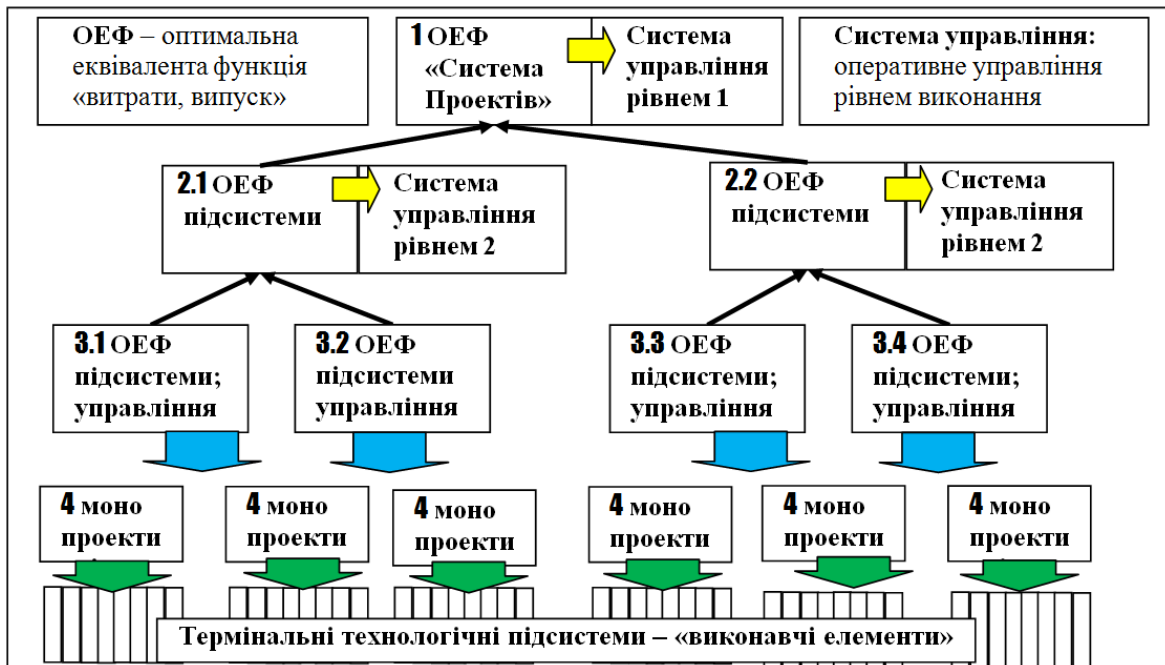


Рис. 12. Ієрархічна структура для системи проектів на базі оптимального агрегування

На рис. 12 подана структура з чотирьох рівнів. Четвертий рівень — монопроекти, елементи яких умовно назвемо «виконавчими елементами». Рівень 3 — підсистеми, елементи яких — це оптимально агреговані структури з монопроектів. Рівень 2 — підсистеми, елементи яких — оптимально агреговані підсистеми системи проектів (умовно показано по дві підсистеми). Рівень 1 — верхній рівень системи проектів — «центр». Рівні 1 і 2 складаються з блоків ОЕФ — стратегічного управління, та блоків «управління рівнем» — оперативного управління. Така структура вже відпрацьована в [19]—[21]. В цілому структура «система проектів» — працездатна, без проблем великої розмірності. Для моделі системи проектів виконується розробка операторів оптимального агрегування для операцій «управління часом виконання», «передача технологічних ресурсів між монопроектами», «оптимальне управління «внутрішніми кредитами».

На рис. 13 показано схему програмного забезпечення «системи проектів». В лівому стовпці подано базові модулі, розроблені при створенні моделей «оптимальне агрегування» і «оптимальний розвиток», які постійно оновлюються. В правому стовпці подано нові модулі, що створюються для «обслуговування» нового класу об’єктів — систем проектів.



Рис. 13. Структура моделей і програмних модулів для системи проєктів

Приклади розв'язання задач управління системами проєктів

Наведемо два приклади реалізації для модулів «зв'язки в часі» і «ринкові вікна» (рис. 13). Це приклади постановки і розв'язання задач класу «знайти корінь нелінійного рівняння», «знайти момент часу в динамічній задачі оптимального агрегування, коли оптимальний розподіл ресурсу набуде певного значення». Подібних задач в практиці управління системами проєктів достатньо, і вони розв'язуються на базі інтелекту менеджера. Запропонований підхід не є покращенням існуючих напрацювань вчених, він змінює «акценти» у розв'язанні задач оптимізації: з пошукових методів багатовимірної оптимізації на розв'язання прикладних задач за допомогою безпошукових алгебраїчних методів. Треба тільки поставити прикладну задачу адекватно вбудованим в програми методам оптимізації однокрокових і багатокрокових задач. На рис. 14 подано приклад розв'язання задачі управління часом виконання проєкту: знаходяться ставки кредитів і дисконту, що забезпечують отримання термінального стану в потрібний момент часу. На рис. 14 показано два процеси — тривалістю 10 і 6 місяців з однаковим кінцевим станом.

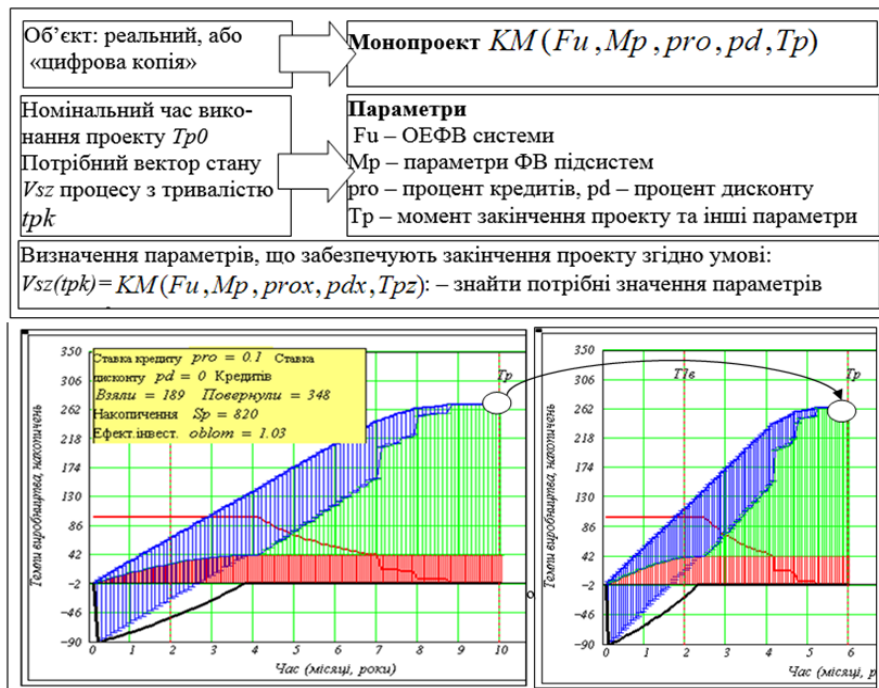


Рис. 14. Управління часом виконання проєкту на базі моделі монопроєкту

На рис. 15 подано приклад розв’язання задачі управління «ринковими вікнами».

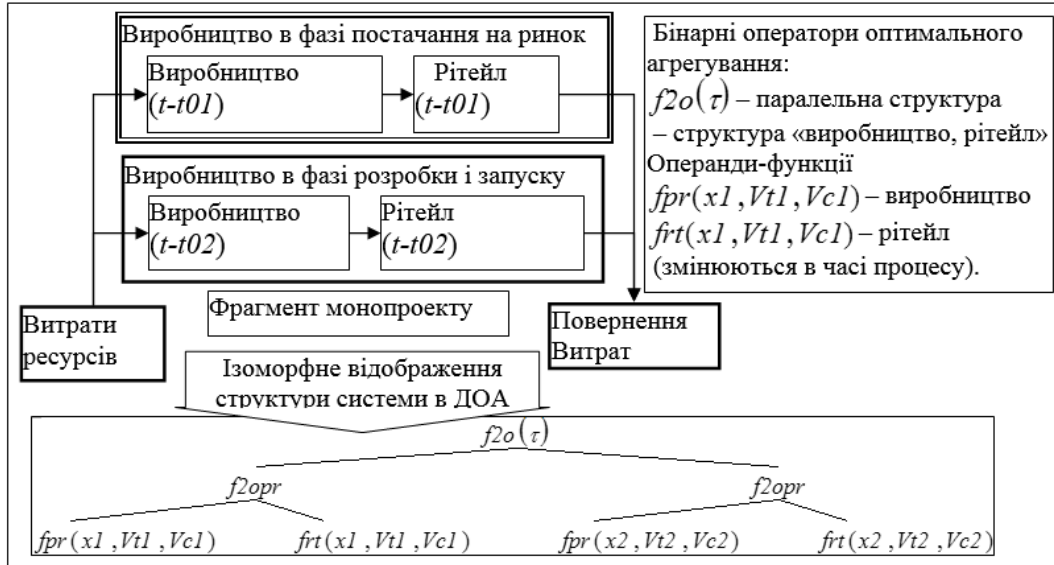


Рис. 15. Управління ринковими вікнами. Оптимізація інтервалу між випусками на ринок моделей певного продукту

На рис. 16 подано приклад типових моделей ринкових вікон. Ринкові вікна та їхні моделі — безмежна область виробництва і рітейлу. На рис. 15 подане розв’язання на базі оптимального агрегування структури виробництв двох моделей продукту в різних фазах ринкового вікна.

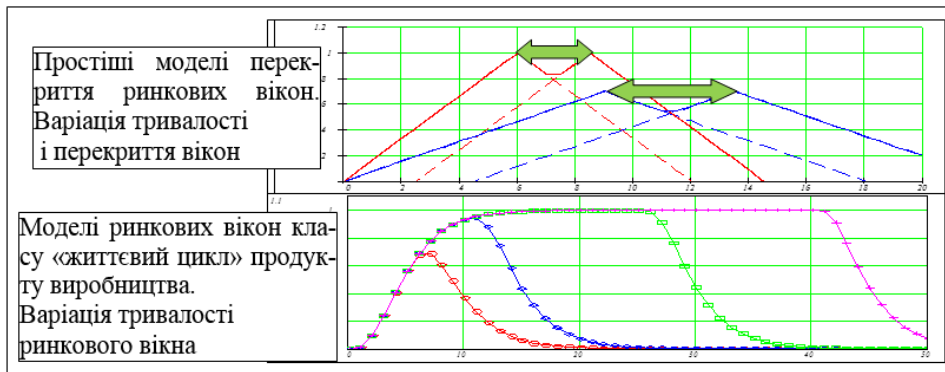


Рис. 16. Приклади моделей ринкових вікон

В цілому постановка подібних задач відноситься до прикладного системного аналізу, орієнтованого на застосування модуля «монопроект». Модуль «монопроект» дає можливість отримувати оптимальні рішення для широкого кола прикладних задач управління проектами. Це тема подальших досліджень за тематикою «управління системами проектів».

Висновки

Розглянуто розробку і дослідження математичних моделей функціонування і розвитку сучасних систем проектів. Теоретичні дослідження в цьому напрямку ведуться більше десяти років. Також систематично вивчалися публікації стосовно реальних проектів. На основі комплексного аналізу реальних проектів і теоретичних досліджень з процесів оптимального виробництва і розвитку зроблено висновок: управління проектами і системами проектів не має цілісної теоретичної бази. Дослідження цієї роботи спрямовані на розробку параметризованих математичних моделей і методів, які можуть бути адаптованими до різних класів проектів — логістичних, аграрних, індустріальних, освітніх.

В роботі поставлено мету суттєвого підвищення ефективності управління процесами функціонування і розвитку сучасних систем проектів за рахунок розробки нових моделей, орієнтованих на характерні задачі систем проектів, зокрема управління часом виконання окремих проектів. Для досягнення цієї мети поставлені і розв’язані такі задачі:

- проведення аналізу існуючих методів оптимального управління системами проектів як склад-

ними багаторівневими процесами розвитку і виробництва;

– розробка математичні моделі управління часом виконання окремих проектів, що важливо в умовах узгодження в часі фаз будівництва і життєвих циклів продукції виробництва.

На базі інтеграції моделей і програмних модулів оптимального агрегування та оптимального розвитку створено модель елемента системи проектів. Вибрано і обґрунтовано структуру багаторівневого управління системою проектів, базовану на оптимальному агрегуванні окремих проектів процесами виробництва і розвитку.

Розроблено метод управління ринковими вікнами з використанням параметризованих функцій виробництва, розвитку і попиту. Запропоновано програмну реалізацію методу оптимального управління ринковими вікнами — вибором моментів переходу на нову модель продукту виробництва. Таким чином, отримана оптимальна адаптивна безпошукова комп'ютерно-інтегрована система, виконано тестування всіх програмних модулів системи управління і підтверджено їх коректність і ефективність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Т. М. Боровська, І. С. Колесник, та В. А. Северілов, *Метод оптимального агрегування в оптимізаційних задачах*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009, 229 с.
- [2] Т. М. Боровська, С. П. Бадьора, В. А. Северілов, та П. В. Северілов, *Моделювання і оптимізація процесів розвитку виробничих систем з урахуванням використання зовнішніх ресурсів та ефектів освоєння*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2009, 255 с.
- [3] Т. М. Боровська, *Математичні моделі функціонування і розвитку виробничих систем на базі методології оптимального агрегування*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2018, 308 с. ISBN 978-966-641-731-5.
- [4] Taisa M. Borovska et al., "Adaptive production control system based on optimal aggregation methods," *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108086O (1 October 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2501520>.
- [5] J. Forrester, *Fundamentals of cybernetics of the enterprise (Industrial dynamics)*: Translated from English, Moscow, USSR: Progress, 1971, 340 p.
- [6] V. I. Opoitsev, *Equilibrium and stability in models of collective behavior*. Moscow, USSR: World, 1977.
- [7] J. Forrester, *Basics of Cybernetics enterprises (Urban Dynamics)*. Moscow, USSR: Progress, 1971.
- [8] W. Leontiev, "Theoretical assumptions and nonobservable facts," *The American economic review*, no. 9 (4), pp. 1-7, December, 1970.
- [9] R. Bellman, I. Glikhsberg, and O. Gross, *Certain problems of mathematical control theory*. Moscow, USSR: Publishing House of Foreign Literature, 1962, 233 p.
- [10] Bruno G. Rüttimann, *Introduction to Modern Manufacturing Theory*. Zürich, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018, 149 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58601-4>.
- [11] N. J. Nersessian, and S. Chandrasekharan, "Hybrid analogies in conceptual innovation in science," *Cognitive Systems Research*, no. 10(3), pp. 178-188, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2008.09.009>.
- [12] Т. М. Боровська, В. А. Северілов, С. П. Бадьора, та І. С. Колесник, *Моделювання задач управління інвестиціями*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2009, 178 с.
- [13] М. В. Васильська, І. С. Колесник, та В. А. Северілов, «Моделі-предиктори: проблеми розробки і адекватності», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 114-121, 2011.
- [14] Р. Беллман, и Р. Калаба, *Динамическое программирование и современная теория управления*. М., Россия: Наука, 1969, 131 с.
- [15] М. Пешель, *Моделирование сигналов и систем*. М., Россия: Мир, 1981, 302 с.
- [16] М. Месарович, Д. Мако, и И. Такахара, *Теория иерархических многоуровневых систем*. М., Россия: Мир, 1973, 344 с.
- [17] R. Fagin, R. Kumar, and D. Sivakumar, "Efficient similarity search and classification via rank aggregation," *Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD international Conference on Management of Data (San Diego, California)*. SIGMOD '03. ACM Press, New York, NY, pp. 301-312, 2003. <https://doi.org/10.1145/872794.872795>.
- [18] P. V. Severilov., T. N. Borovska, Yu. N. Dmytryk, and E. P. Khomyn, "Modeling and optimization of agrarian systems with waste recycling in bioreactors," *Nauka i studia (Poland)*, № 16 (126), pp. 42-50, 2014. ISSN 1561-6894.
- [19] Т. Н. Боровская, И. С. Колесник, В. А. Северилов, и И. В. Шульган, "Оптимальное агрегирование интегрированных систем "производство-развитие," *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2 (30), с. 18-28, 2014. ISSN 1999-9941.
- [20] Т. Н. Боровська, «Оптимальне агрегування виробничих систем з параметричними зв'язками», *Східно-Європейський журнал передових технологій*, т. 4, № 11(70), с. 9-19. 2014. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26306>.
- [21] Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов, та П. В. Северілов, «Моделі оптимального інноваційного розвитку виробничих систем», *Східно-Європейський журнал передових технологій: Математичне та інформаційне забезпечення комп'ютерно-інтегрованих систем управління*, т. 5, № 2 (71), с. 42-50, 2014. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.28030>.
- [22] James Pollock, Jon Coffman, Sa V. Ho, and Suzanne S. Farid, "Integrated Continuous Bioprocessing: Economic, Operational, and Environmental Feasibility for Clinical and Commercial Antibody Manufacture. *Biotechnol. Prog.*," *The Global Home of Chemical Engineers*, vol. 33, no. 4, 2017, <https://doi.org/10.1002/btpr.2492>.
- [23] Simone Brethauer and Michael Hanspeter Studer, "Consolidated bioprocessing of lignocellulose by a microbial consortium. *Energy Environ. Sci.*," *The Royal Society of Chemistry*, no. 7, pp. 1446-1453. 2014. <https://doi.org/10.1039/c3ee41753k>.

[24] Taisa M. Borovska, Inna V. Vernigora, Dmitry I. Grishin, Victor A. Severilov, Konrad Gromaszek, et al., "Adaptive production control system based on optimal aggregation methods," *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108086O (1 October 2018).
<https://doi.org/10.1117/12.2501520>.

[25] Taisa Borovska, Inna Vernigora, Irina Kolesnyk, and Andriy Kushnir, "Control of multi-channel multiphase queuing system based on optimal aggregation methodology," *Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference "Computer science and information technologies" CSIT'2018*, Lviv, Ukraine, 11-14 September 2018, vol. 1, pp. 259-265.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 6.02.2020

Боровська Таїса Миколаївна — д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем управління, e-mail: taisaborovska@gmail.com ;

Гришин Дмитро Ігорович — аспірант кафедри комп'ютерних систем управління;

Колесник Ірина Сергіївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки;

Северілов Віктор Андрійович — канд. техн. наук, доцент.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

T. M. Borovska¹

D. I. Hryshyn¹

I. S. Kolesnyk¹

V. A. Severilov¹

Development of Models and Methods for Optimal Control of Project Systems Based On the Optimal Aggregation Methodology

¹Vinnitsia National Technical University

There has been considered the management of project systems taking into account the life cycle of the product. A mathematical model and software for project systems has been developed. The software has modules to adjust the parameters of the mathematical model, enter data and analyze the results of the simulation. The main interpretation of the mathematical model is the complex of production, retail, logistics of components and final products and recycling systems. Technology systems can be in the states of design, construction, and production, modification of technologies and products of production. The purpose of the article is to develop mathematical models: individual production projects, taking into account demand, competition, technology renewal and production of products; Development of project system models with time management in mind.

The conceptual theoretical basis of development has been chosen: resource approach, methodology of optimal aggregation and solution of variation problems of optimal allocation of resources in the processes of operation and development of objects. An integrated mathematical model of "monoproject" has been developed, performing optimal aggregation and optimization of the development strategy. The result of calculations of the module is "monoproject"-matrix structures, similar to the records in databases — solving the problems of optimal operational and strategic management. The variation is solved for a one-dimensional optimal equivalent object followed by "disaggregation" - the distribution of the optimal strategy across all subsystems.

The result of using the "monoproject" software module is to remove the dimension problem in solving one-step and multi-step optimization problems. Specifically, it is the elimination of search engines and the possibility of parallel calculations. The following new scientific and practical results have been obtained: optimal management of the start and end of individual monoprojects; optimal management of market windows — moments of decommissioning of some products and the launch of new products; the development of new binary operators of optimal aggregation of elements of the system of projects — monoprojects. A simulation of the project test system has been performed.

Keywords: optimal aggregation, variational problem, optimal development, project system, monoproject.

Borovska Taisa M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Computer Control Systems, e-mail: taisaborovska@vntu.edu.ua ;

Hryshyn Dmytro I. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Control Systems;

Kolesnyk Iryna S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computer Engineering;

Severilov Viktor A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor

Т. Н. Боровская¹
Д. И. Гришин¹
И. С. Колесник¹
В. А. Северилов¹

Разработка моделей и методов оптимального управления системами проектов на базе методологии оптимального агрегирования

¹Вінницький національний технічний університет

Рассмотрено управление системами проектов с учетом жизненного цикла продукта. Выполнена разработка математической модели и программного обеспечения для систем проектов. Программное обеспечение имеет модули для настройки параметров математической модели, модули ввода данных и анализа результатов моделирования. Основной интерпретацией математической модели является комплекс производства, ритейла, логистики компонентов и конечных продуктов и систем рециклинга. Технологические системы могут находиться в состояниях проектирования, строительства, выпуска продукции, модификации технологий и продукта производства. Цель статьи — разработка математических моделей: — отдельных проектов как производств продуктов с учетом спроса, конкуренции, необходимости обновления технологий и продуктов производства; — систем проектов с учётом управления временем выполнения отдельных проектов. Выбрана концептуальная теоретическая база разработки: ресурсный подход, методология оптимального агрегирования и решение вариационных задач оптимального распределения ресурсов в процессах функционирования и развития объектов. Разработана интегрированная математическая модель «монопроект», выполняющая оптимальное агрегирование и оптимизацию стратегии развития. Результат вычислений модуля «монопроект»: матричные структуры, подобные записям в базах данных — решения задач оптимального оперативного и стратегического управления. Вариационная задача решается для одномерного оптимального эквивалентного объекта с последующим «деагрегированием» — распределением оптимальной стратегии по всем подсистемам. Результатом использования программного модуля «монопроект» является снятие проблемы размерности при решении одношаговых и многошаговых задач оптимизации. Конкретно, это устранение поисковых процедур и возможность параллельных вычислений. Получены следующие новые научные и практические результаты: оптимальное управление моментами старта и окончания выполнения отдельных монопроектов; оптимальное управление рыночными окнами — моментами снятия с продаж некоторых продуктов и запуск новых продуктов; разработка новых бинарных операторов оптимального агрегирования элементов системы проектов — монопроектов. Выполнено моделирование тестовой системы проектов.

Ключевые слова: оптимальное агрегирование, вариационная задача, оптимальное развитие, система проектов, монопроект.

Боровская Таиса Николаевна — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры компьютерных систем управления, e-mail: taisaborovska@gmail.com ;

Гришин Дмитрий Игоревич — аспирант кафедры компьютерных систем управления;

Колесник Ирина Сергеевна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники;

Северилов Виктор Андреевич — канд. техн. наук, доцент