

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

БОРОВСЬКА ТАЇСА МИКОЛАЇВНА

УДК 625.115:330.105

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ
МОДЕЛЕЙ РОЗВИТКУ РОЗПОДІЛЕНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Вінниця – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті, Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Дубовой Володимир Михайлович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри комп'ютерних систем
управління.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Михальов Олександр Ілліч,
Національна металургійна академія України,
м. Дніпропетровськ,
завідувач кафедри інформаційних технологій і
систем.

доктор технічних наук, доцент
Романюк Вадим Васильович,
Хмельницький національний університет,
професор кафедри прикладної математики та
соціальної інформатики

доктор технічних наук, професор
Усов Анатолій Васильович,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри вищої математики та
моделювання систем.

Захист відбудеться «04» березня 2016 р. о 12³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд.210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «03» лютого 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні виробничі системи характеризуються високою параметричною і структурною динамічністю, високою концентрацією виробництва. Характерні риси виробничих систем – використання ефективних високих технологій, що створюються у великих науково-дослідних комплексах. Потім виробничі системи фактично будуються навколо вибраної технології. Самі технології можуть розроблятися десятиріччями, але після створення реалізуються швидкими темпами під тиском глобальних факторів. Особливо слід виділити виробництва, в яких домінуючими факторами є енерговитратність та екологічність використаних технологій. Типові приклади виробничих систем, де визначальним фактором є технології – металургійні виробництва, системи котлоагрегатів, системи біореакторів. Структури таких систем є відображенням структури технологічних процесів. Це можуть бути вертикально інтегровані згідно етапам технологічних процесів структури, структури з паралельно працюючими виробничими елементами. Особливість паралельних структур – одночасна робота технологічних агрегатів різних поколінь. Сьогодні обов'язковим компонентом технологічних систем є підсистеми для переробки відходів виробництва, зокрема, біореактори. Для структур таких виробничих систем характерні зворотні зв'язки. Виробничі системи звичайно випускають спектр продуктів, підрозділи виробничих систем можуть бути територіально розподіленими.

Процеси розвитку виробничих систем на базі інновацій характеризуються суттєвими невизначеностями. Нестабільним і статистично непрогнозованим є зовнішнє оточення. Тому актуальною є задача оптимального розподілу ресурсів в просторі – між підсистемами, і в часі – по етапах процесів функціонування і розвитку з урахуванням невизначеностей і суттєвих нелінійностей технологічних елементів. Існуючі методи оптимального розподілу ресурсів в процесах розвитку не відповідають вимогам практики тому, що базуються на вимогах лінійності, випуклості, неперервності, стаціонарності характеристик елементів. Відсутні задовільні методи для оптимізації процесів розвитку систем високої розмірності. Результати вдосконалення відомих методів є недостатніми, не відповідають вимогам сучасності. Для практичного застосування – вбудовування в автоматизовані системи прогнозування і планування, моделі для нових об'єктів повинні створюватись швидко, безпомилково і «на випередження», тобто, модель нової виробничої системи необхідно створювати до створення реальної системи і нових продуктів виробництва.

Аналогами даної дисертації вибрано роботи Р. Беллмана, Л. С. Понтрягіна, В. Г. Болтянського, В. І. Опойцева і В. Н. Буркова, де розглянуті декомпозиційні підходи до оптимізації, В. М. Глушкова, Е. А. Берзіна, А.Д. Цвіркуна, де подано ефективні підходи до задач розвитку, роботи з методології побудови моделей складних технічних систем Я. З. Ципкіна, М. Пешеля, М. Д. Месаровича, Н. Н. Моїсеєва, Дж. Форрестера, І. В. Кузьміна, В. М. Дубового. Синтез методологій оптимізації та моделювання виробничих систем і можливостей сучасних математичних пакетів і пакетів для моделювання дозволив отримати но-

ві результати.

Для подолання неповноти наявних моделей і методів відносно специфіки сучасних виробничих систем необхідно вирішити актуальну науково-практичну проблему відсутності методологічної основи для побудови цілісного підходу до моделювання процесів функціонування та розвитку розподілених виробничих систем, що зумовлює недостатню ефективність функціонування і розвитку таких систем. Отже, теоретичні дослідження, направлені на вирішення цієї важливої наукової і практичної проблеми, мають важливе значення і постійну актуальність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційного дослідження увійшли у звіти: – з держбюджетної науково-дослідної роботи на тему: «Розробка теорії та алгоритмічних засобів моделювання та дослідження систем в умовах невизначеності» № 46–Д–254 (номер держ. реєстрації 0102U002258); – з господарської науково-дослідної роботи на тему «Розробка програмних модулів для комплексної оцінки ефективності інноваційних проектів» № 46/1 (номер держ. реєстрації 01102U000456); – з господарської науково-дослідної роботи на тему «Розробка програм для аналізу ефективності інвестиційних проектів» № 4605 (номер держ. реєстрації 01102U001412); – з господарської науково-дослідної роботи на тему «Разработка системы поддержки решений по планированию многопродуктового производства на ОАО «Салют» (Россия). Рекомендации по кредитной и ценовой политике предприятия» № 46/2, з господарської науково-дослідної роботи на тему «Разработка системы поддержки принятия решений в проектировании и строительстве биогазовых систем, оптимизированных по суммарным затратам и надежности» (Россия) № 46/3, з господарської науково-дослідної роботи на тему «Разработка программных модулей для анализа рисков на этапах строительства, запуска и функционирования предприятий, включающих биореакторные установки» (Литва) № 46/5, з господарської науково-дослідної роботи на тему «Розробка програмних модулів для комплексної оцінки ефективності проектів розвитку виробництва» № 46/6 у відповідності до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 року - інформаційні та комунікаційні технології, а саме – технології та засоби математичного моделювання, оптимізації та системного аналізу розв'язання надскладних завдань державного значення.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування і розвитку розподілених виробничих систем шляхом створення ефективних математичних моделей та імітаційного моделювання процесів розвитку таких систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1) виконати аналіз існуючих методів створення математичних моделей для задач розвитку виробничих систем (ВС): динамічних, нестационарних, нелінійних;

2) розробити методологію побудови еквівалентних оптимальних елементів для паралельних, послідовних і кільцевих структур виробничих систем на базі методу оптимального агрегування;

3) розробити методи отримання наближених рішень варіаційних задач розвитку, зокрема, отримання наближень функції Гамільтона в просторі стратегій управління;

4) розробити узагальнену декомпозиційну структуру і методи моделювання і оптимізації для варіаційних задач розвитку розподілених виробничих систем з функціями розвитку класу «обмежені, нестрого монотонні і нестрого позитивні»;

5) виконати аналіз, узагальнення і реалізацію узагальненої структури і методу локального управління окремим виробником в активному оточенні інших виробників певного сегменту виробництва;

6) розробити метод екстремального адаптивного управління розподілом навантаження між паралельно працюючими технологічними елементами в умовах високої невизначеності на базі системи послідовно працюючих регуляторів;

7) розробити і обґрунтувати концепцію побудови системи моделей виробничої системи на базі тривірневої декомпозиції – структурної, функціональної, редукційної;

8) розробити, дослідити і реалізувати концепцію метамоделі, як моделі сумісного розвитку нової виробничої системи та її моделі;

9) розробити і дослідити систему імітаційних моделей класу «виробники – продукти – користувачі», що відтворює динаміку функціонування і розвитку кожного елемента з кожного класу – «виробники», «продукти», «користувачі»;

10) на основі розроблених концепцій, теоретичних засад, математичних моделей і методів розробити комплекс програмно-методичного забезпечення для впровадження на підприємствах і організаціях для виконання прогнозування і планування, для впровадження в навчальний процес у формі звичайних та електронних посібників, дистанційних курсів та ін., провести апробацію результатів роботи в Інтернеті.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування та розвитку розподілених виробничих систем.

Предметом дослідження є математичні моделі для прогнозування та планування процесів розвитку виробничих систем.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використані:

1) теорія систем, теорія управління, зокрема теорія оптимального адаптивного управління, теорія імпульсних систем для побудови математичних моделей розподілених виробничих систем, варіаційні методи, методи лінійного і нелінійного програмування для розробки математичних моделей процесів розвитку і обґрунтування декомпозиційних методів моделювання розподілених систем;

2) методи теорії функцій та функціонального аналізу, математичний аналіз, теорія множин при розробці теоретичних основ і обґрунтуванні метамоделей для процесів інноваційного розвитку;

3) теорія ймовірності і випадкових процесів, теорія процесів з розгалуженням, теорія нечітких множин для побудови моделей;

4) методи і технології моделювання в середовищах математичних пакетів для створення комплексу робочих моделей.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі розв'язано науково-прикладну проблему забезпечення цілісного підходу до моделювання процесів функціонування та розвитку розподілених виробничих систем за рахунок використання таких наукових результатів:

1. Вперше розроблено методологію побудови еквівалентних оптимальних елементів для паралельних, послідовних і кільцевих структур виробничих систем на базі методу оптимального агрегування, що відрізняється від існуючих методів агрегування отриманням оптимальної характеристики «вхід-вихід», а від існуючих методів оптимізації розподілу ресурсів - декомпозицією багатовимірної задачі оптимізації в послідовність одновимірних задач. Це в підсумку робить метод нечутливим до виду функцій виробництва, і малочутливим до розмірності виробничої системи, що дозволяє будувати ефективні моделі для оптимізації процесів функціонування і розвитку оптимально агрегованих виробничих систем.

2. Отримав подальший розвиток метод Беллмана отримання наближень у просторі стратегій управління для розв'язання варіаційної задачі розвитку, що відрізняється від існуючого методу тим, що варіаційна задача розвитку виробничої системи розв'язується не методом динамічного програмування, а за принципом максимуму Понтрягіна з використанням дискретизованого гамільтоніану й уступки у максимальному значенні функціонала якості. Це дозволяє отримувати наближення оптимальної стратегії, що дають значення інтегрального критерію, яке відрізняється від оптимального щонайбільше на 3%.

3. Вперше розроблено декомпозиційну структуру і відповідний метод моделювання і оптимізації процесу розвитку виробничої системи, що відрізняється від існуючих методів тим, що розв'язання варіаційної задачі розвитку розбивається на дві послідовні задачі: - задачу заміни виробничої системи оптимальним за критерієм сумарного виробництва еквівалентним елементом (результат №1) та - варіаційну задачу розвитку для еквівалентного оптимального елемента (одновимірного об'єкту), де управління на кожному кроці процесу - розподіл ресурсу виробничої системи між накопиченням і розвитком, що дає максимум функції Гамільтона, згідно методу принципу максимуму. Це дає можливість отримувати розв'язання варіаційної задачі розвитку для розподілених виробничих систем з функціями розвитку класу «обмежені, нестрого монотонні і нестрого позитивні», а також суттєве зменшення обчислювальних витрат для розподілених виробничих систем великої розмірності.

4. Вперше запропоновано і реалізовано узагальнену структуру і метод локального управління окремим виробником в активному оточенні інших виробників певного сегменту виробництва, що відрізняється від існуючих методів декомпозицією процесу управління на такі кроки: - визначення пропорції розподілу ресурсу виробничої системи між частками на ризикове і детерміноване управління; - розподілу цих часток між виробництвами окремих продуктів. Запропонований метод локального управління є узагальненням – змішаною стратегією на базі відомих детермінованих та імовірнісних методів, що дає: - можливість адаптації локального управління станом сегмента виробництва до невідомостей стану виробництва, потреб, появи нових технологій; - можливість

імітації управління окремих виробників сегменту за рахунок доступної статистики і побудови імітаційної моделі системи виробників для реалізації нового підходу «один на фоні всіх» до оцінки ризиків певного виробника з урахуванням імітації дій інших виробників.

5. Отримав подальший розвиток метод реалізації оптимального розподілу навантаження у виробничих системах з паралельно працюючими елементами в умовах високої невизначеності за допомогою екстремальної адаптивної системи, що відрізняється від існуючих методів оптимального адаптивного управління використанням послідовно працюючих регуляторів: - стабілізації навантаження виробничої системи і мінімізації витрат виробництва, де перший регулятор крім стабілізації навантаження генерує тестові дані для другого регулятора, що перерозподіляє навантаження для мінімізації витрат виробництва. Запропонований метод дає можливість забезпечити задовільну роботу виробничої системи при нелінійностях функцій виробництва елементів з класу нестрого монотонних і нестрого позитивних функцій.

6. Вперше запропонована і реалізована концепція побудови системи моделей виробничої системи на базі трирівневої декомпозиції – структурної, функціональної, редуційної, що відрізняється від існуючих підходів і методів декомпозиції моделей виробничих систем тим, що кожний елемент системи моделей є результатом застосування трьох відповідних операцій декомпозиції моделі різних структурних класів, з різними рівнями редуції (спрощення). Паралельне використання альтернативних моделей в регуляторах, ідентифікаторах, предикторах подібно неідентичному резервуванню в технічних системах підвищує ефективність і надійність. Запропонована декомпозиційна структура дозволяє формалізувати процес побудови моделей виробничих систем, що тільки створюються.

7. Вперше запропонована, реалізована і досліджена концепція метамоделі – математичної моделі спільного розвитку системи: «нова виробнича система та імітаційна модель цієї системи», що відрізняється від існуючих підходів і методів: - формуванням імітаційної моделі на базі трирівневої декомпозиції (результат № 6); - двостороннім інформаційним обміном «об'єкт – модель»; - урахуванням дуальності цільового призначення моделі виробничої системи: як відображення суттєвих властивостей об'єкту; як еталону об'єкту і засобу отримання знань та досвіду для управління функціонуванням і розвитком об'єкта. Запропонована метамодель в загально-теоретичному аспекті є розширенням концепції спостерігача стану на систему з двох нелінійних і нестационарних об'єктів, що дає можливість для переходу від евристичних методів розробки моделей до ефективних формалізованих процедур.

8. Вперше запропонована, реалізована і досліджена система імітаційних моделей «виробники, продукти, користувачі», де може бути відтворена поведінка (динаміка) кожного елемента кожного з класів «виробники», «продукти виробництва», «користувачі», що відрізняється від існуючих аналогів, тим, що систему складають моделі «виробники», «продукти», «користувачі» з різними рівнями агрегування (результат №1), різними методами локального управління (результат №4) і різними рівнями спрощення (результат №6). Альтернативні

моделі є сумісними за вхідними і вихідними змінними, що дає можливість порівнювати результати моделювання за альтернативними моделями.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі розроблених концепцій, теоретичних принципів, математичних моделей і методів створені нові алгоритми і робочі моделі. На основі запропонованого підходу до моделювання процесів розвитку розподілених систем отримані такі практичні результати:

- створені на базі теоретичних результатів алгоритми і програми моделювання оптимальних процесів розвитку дозволяють підвищити ефективність автоматизованих систем управління розподіленими виробничими системами;

- всі розроблені моделі реалізовані як комплекс програмного забезпечення, що дозволяє вести системні дослідження для актуальних практичних задач прогнозування і планування процесів розвитку з урахуванням ефектів освоєння, з використанням альтернативних математичних моделей, що у результаті дозволяє отримувати оптимальні стратегії розвитку і досліджувати їх чутливість до варіацій параметрів виробничих функцій елементів. Використання векторизації обчислень в програмах моделювання дозволяє виконувати моделювання розподілених систем високої розмірності на звичайних ПК за рахунок розпаралелювання.

Отримані на основі наукових досліджень практичні результати дисертаційних досліджень впроваджено на підприємстві Вінницької філії ТОВ „КСК–Автоматизація” (м. Вінниця) комплекс програмних модулів для оцінки інноваційних проектів (акт впровадження від 25.01.2010 р.), на ВАТ "Салют" (м. Самара, Росія) впроваджено комплекс програмно-методичного забезпечення задач оптимального управління багатопродуктовим виробництвом ВАТ "Салют", рекомендації по кредитній і цінovій політиці підприємства (акт впровадження від 01.02.2010 р.), на підприємстві ТОВ фірми «Радіо» (м. Вінниця) впроваджено комплекс програм для аналізу проектів (акт впровадження від 18.01.2010 р.), на ТОВ "Агробіогаз" (м. Санкт-Петербург, Росія) впроваджено комплекс програмно-методичного забезпечення задач проектування та будівництва біогазових систем, оптимізованих за сумарними витратами і надійності (акт впровадження від 12.01.2011 р.), на ЗАО «Addesco» (Литва) впроваджено комплекс програмно-методичного забезпечення для аналізу ризиків при будівництві, запуску і функціонуванні біореакторних систем (акт впровадження від 01.07.2012 р.), в ТОВ «Пфаннер Бар» запроваджено комплекс програмних модулів для оцінки ефективності проектів розвитку виробництва (акт впровадження від 01.07.2013 р.).

Впровадження результатів дослідження підтверджено відповідними актами. Соціальний та науково-технічний ефект від запроваджень полягає в: зменшенні ризиків інноваційних проектів; зменшенні втрат і ризиків виробництва, оптимізації кредитної та цінovої політики підприємства; підвищенні ефективності прогнозів; підвищенні ефективності проектів розвитку виробництва при заданому рівні ризиків. Також результати, отримані в дисертаційній роботі, систематично використовуються в навчальному процесі у Вінницькому національному технічному університеті на кафедрі «Комп'ютерних систем управлін-

ня». В цьому напрямку на базі результатів роботи видано шість посібників з грифом міністерства освіти і науки України та дистанційні курси.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати отримані здобувачем самостійно і опубліковано в роботах [4, 17, 35, 40–42, 48, 52, 53]. З робіт, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем: [1–3, 6–13, 19, 20, 22–25, 30, 33, 37–39, 46, 47, 49, 50] – узагальнення методу оптимального агрегування і системи моделей процесів оптимального розвитку оптимально агрегованої виробничої системи; [8, 9, 11, 12, 27, 36, 51] – запропоновано і реалізовано узагальнену структуру локального управління в розподілених виробничих системах, отримав подальший розвиток метод реалізації оптимального розподілу ресурсу в умовах високої невизначеності через побудову екстремальної системи з послідовно працюючими регуляторами за схемою «управління, тест, ідентифікація, управління, настроювання»; [3, 5, 14–16, 20, 21, 26, 28, 29, 31, 32, 34, 43, 44] – запропонована і реалізована концепція побудови системи моделей інноваційного розвитку на базі тривимірної деконпозиції, концепція метамоделі, система імітаційних моделей "виробники, продукти, користувачі"; [1, 2, 8–13, 18–20, 24, 45] – виконано узагальнення інтерфейсів за областями призначення: – засоби і технології проведення досліджень на моделях; – засоби і технології використання моделей в навчальному процесі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних в дисертаційній роботі досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних наукових конференціях “Контроль і управління в технічних системах” (м. Вінниця, 2001р.), „Інтернет–Освіта–Наука” (м. Вінниця, 2002, 2004, 2008, 2010 рр.), “Контроль і управління в складних системах” (м. Вінниця, 2003, 2005, 2008, 2010, 2012, 2014 рр.), „Автоматика” (м. Вінниця, 2006 р., м. Харків, 2010 р., м. Київ, 2012 р., м. Одеса, 2015 р.), «Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія» (м. Вінниця, 2010, 2014 рр.), «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту», ISDMCI’2010 (м. Євпаторія, Україна, 2010 р.), VI międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Stosowane naukowe opracowania – 2010», Praha (Ceska), VI międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Dynamika naukowych badan – 2010», Przemysl (Polska), VI международна научна практична конференція «Динамиката на съвременната наука – 2010», София (България), VII международна научна практична конференция «Научният потенциал на света – 2011», София (България), на науковій конференції “Проблеми підручника для вищої школи” (м. Вінниця, 2001р.), міжвузівській науково-методичній конференції „Дистанційні технології навчання та їх засоби” (м. Вінниця, 2004 р.), International Scientific and Technical Conference "Computer science and information technologies", CSIT’2015 (Lviv, Ukraine), International Conference "System Analysis and Information Technologies", SAIT 2015 (Kyiv, Ukraine), на щорічних науково-технічних конференціях ВНТУ з 1999 року. Була проведена робота з апробації результатів досліджень в Інтернеті. За напрямком досліджень даної роботи в продукті Google – Кнол опубліковано більше 120 статей на базі матеріалів поси-

бників та публікацій, виставлених на сайтах ВНТУ, з них більше 30 – в англomовному секторі.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 124 роботи, у тому числі 2 монографії, 35 статей у фахових виданнях України, з них 10 одноосібних, 10 публікацій у періодичних виданнях іноземних держав, 7 свідоцтв на реєстрації авторських прав на комп'ютерні програми у Державному департаменті інтелектуальної власності України, 55 тез доповідей та 6 посібників з грифом МОН, підготовлених на базі результатів роботи. Основний зміст дисертації опубліковано в 53 роботах.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи становить 395 сторінок, у тому числі 284 сторінки основного тексту, 123 рисунків. Бібліографія включає 350 джерел і викладена на 41 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертації обґрунтовано актуальність проблеми досліджень, а також зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Сформульовано мету та задачі досліджень, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** досліджується стан проблеми підвищення ефективності прогнозування і планування процесів розвитку виробничих систем. Серед великої кількості джерел відібрано і конструктивно – з розробкою робочих моделей і моделюванням, - проаналізовано ключові для вибраного напрямку досліджень роботи. Розвиток теорії математичного моделювання в останні десятиріччя все більше орієнтується на ефективне використання можливостей комп'ютерів. Одним з перших в цьому напрямку був Р. Белман, що зумів поєднати аналітичні методи оптимізації з числовими методами. Так з'явився метод динамічного програмування, що є прикладом реалізації методології Беллмана: замінювати задачу вибору точки в багатовимірному фазовому просторі послідовністю задач вибору точки в фазових просторах малої розмірності. Метод принципу максимуму Л. Понтрягіна для певних класів задач є більш ефективним ніж метод динамічного програмування. М. Болтянський знайшов розв'язання для системи задач оптимального за швидкодією управління. Розпаралелювання багатовимірних оптимізаційних задач є також продуктивним напрямом в теорії управління розподіленими системами. Як базовий зразок цього напрямку вибрано роботи В. Опойцева і В. Буркова. Свій час випереджувала робота В. Глушкова «Моделирование развивающихся систем», і менш відома робота Е. Берзіна «Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем». З напрямку «методи побудови математичних моделей» в якості зразків методології вибрано роботи Я. Ципкіна, М. Пешеля, М. Месаровича, Н. Моїсєва. Розглянуто тренди еволюції технічних систем, їх моделей і технологій моделювання розподілених технічних систем. У зв'язку з великою швидкістю зміни технологій, невизначеностями, існує нагальна потреба в моделях для спеціалістів-практиків: персональних аналітичних системах прогнозування, моде-

лях-предикторах, «порадниках», «помічниках», «експертах». Відомі програми такого класу з багатьох причин не відповідають сучасним потребам. В таких умовах продуктивною є методологія Д. Форрестера – створення нових моделей на базі виявлення і відтворення «породжуючих механізмів», а статистика залучається на етапі верифікації моделі. Ця методологія ефективна для виробничих систем, структура і функції яких визначаються технологіями виробництва. Проаналізовані базові задачі моделювання і оптимізації технічних систем – задачі розподілу, розвитку, обміну ресурсами, балансу потреб і випуску та існуючі моделі для цих задач. Проведений комплексний і предметний аналіз динаміки і статистики виробничих систем дозволив побудувати базову систему моделей виробництва і розвитку – основу для цілісної відкритої системи моделей. Складові цієї системи: моделі функціонування, розвитку і функціонування і розвитку системи виробників.

Модель функціонування – однокрокова задача

Функція виробництва (ФВ):

$$y = f(x, Vp, k), \quad (1)$$

де y – продукт; x – ресурс; Vp – вектор параметрів; k – клас ФВ.

Пряма базова задача оптимізації виробничої системи:

$$y_i = f_i(x_i), \quad i = 1..N, \quad (2)$$

де x_i – ресурс, для i -го елемента, N – кількість елементів у виробничій системі.

Критерій і ціль оптимізації:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N f_i(x_i) \rightarrow \max. \quad (3)$$

Обмеження:

$$G(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N x_i - R = 0, \quad (4)$$

де x_i – змінні управління.

Спряжена базова задача. Критерій і ціль оптимізації:

$$Gs(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N x_i \rightarrow \min. \quad (5)$$

Обмеження:

$$Fs(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N f_i(x_i) - Ys = 0, \quad y_i = f_i(x_i), \quad (6)$$

де y_i – змінні управління.

Модель розвитку – багатокрокова задача.

Елементи виробничої системи: підсистеми «розвиток» і «виробництво»

Функція розвитку (ФР):

$$y1 = fr(x1, Vp1, k1), \quad (7)$$

де $x1$ – ресурси для підсистеми «розвиток», $y1$ – продукт підсистеми «розвиток»: розширені, модифіковані, нові виробничі потужності, $Vp1$ – вектор параметрів, $k1$ – клас ФР.

Функція виробництва (ФВ):

$$y2 = fv(x2, Vp2 + Ds(y1), k2), \quad (8)$$

де x_2 – ресурси для підсистеми «виробництво», y_2 – продукт виробництва, Vp_2 – вектор параметрів, k_2 – клас ФВ, $D_s(y_1)$ – функція відображення y_1 у вектор параметрів Vp_2 .

Переходимо до дискретної моделі.

Базова задача оптимізації процесу розвитку виробничої системи.

Модель об'єкту:

$$\left. \begin{aligned} y1_k &= fr(x1_{k-1}, Vp1_{k-1}, k1), \\ y2_k &= fv(x2_{k-1}, Vp2_{k-1}, k2), \\ Vp2_k &= Vp2_{k-1} + Ds(y1_{k-1}), k = 1, \dots, N, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де N – число кроків процесу.

Критерій і ціль оптимізації

$$J_N = \sum_{k=1}^N fv(x2_{k-1}, Vp2_{k-1}, k2) \cdot \alpha_k \cdot \Delta T \rightarrow \max, \quad (10)$$

де α_k – управління – $\arg\max$ функції Гамільтона. Обмеження на управління (розподіл ресурсу між накопиченням і розвитком): $0 \leq \alpha_k \leq 1$.

Модель функціонування і розвитку системи виробництв.

Модель системи N фірм, M продуктів подаємо в дискретизованій робочій формі. Подані далі рівняння виконуються в програмному середовищі пакету моделювання і можуть бути приведені до векторизованої форми. Процеси виробництва і розвитку j -го продукту в i -ій фірмі:

$$\left. \begin{aligned} (Y1_t)_{i,j} &= fr[(X1_{t-1})_{i,j}, Mp1_{i,j}, k1] \\ (Mp2_t)_{i,j} &= (Mp2_{t-1})_{i,j} + Ds[(Y1_{t-1})_{i,j}] \\ (Y2_t)_{i,j} &= fv[(X2_{t-1})_{i,j}, (Mp2_{t-1})_{i,j}, k2] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де $i = 1, \dots, N$ – індекс фірми, $j = 1, \dots, M$ – індекс продукту, $t = 1, \dots, Tp$ – індекс кроку, $Y1, Y2$ – матриці поточних виходів ФР і ФВ системи виробників, Mp_2 – матриця векторів параметрів ФВ системи виробників.

Базова задача оптимізації: кожна фірма максимізує сумарний поточний випуск:

$$J_{t,i} = \sum_{j=1}^M (Y_t)_{i,j} \rightarrow \max. \quad (12)$$

Управління – дворівневе: розподіл 1 – поточного ресурсу фірми на детерміновану і стохастичну (бонус) частки. Розподіл 21 – детермінованої частки між усіма продуктами згідно оцінкам їх ефективності. Розподіл 22 – «лотерея», згідно якій бонус дістається одному продукту згідно розподілу оцінок ефективностей.

Обмеження: ресурсів кожної фірми, потреб по кожному продукту.

На рис. 1 подана класифікація моделей розподілених виробничих систем.

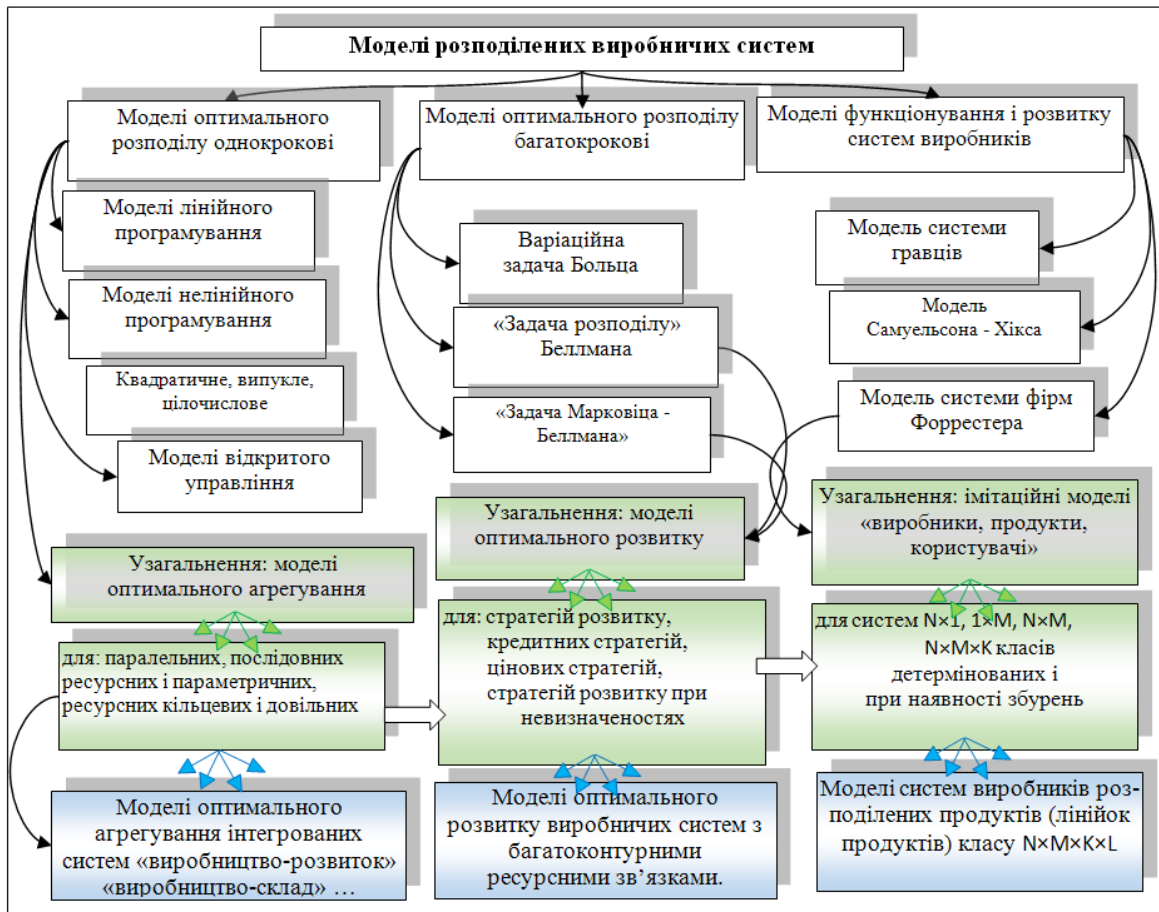


Рисунок 1 – Класифікація моделей розподілених виробничих систем

Стовпці класифікації відповідають вибраним класам моделей, на верхньому рівні подано класичні і фундаментальні моделі, на середньому рівні – можливі узагальнення моделей, на нижньому рівні – конкретні актуальні задачі, для яких не знайдено задовільних рішень. Визначені напрями та задачі дослідження. За результатами аналізу проблеми сформульовані концепція прогнозування та оптимального управління розвитком.

У другому розділі досліджуються агреговані моделі, що подають розподілену виробничу систему як єдиний елемент, еквівалентний за відношенням «вхід – вихід» розподіленій виробничій системі, і оптимальний. Методологічна новизна розділу в цілому – побудова алгебри для функцій виробництва і вбудування задачі оптимізації в моделі функціонування і розвитку виробничих систем. Особливість розробки – інтеграція етапів: «вибір концепції», «створення і обґрунтування математичної моделі», «програмна реалізація – створення робочої моделі» і «проведення досліджень на моделі». Математичні пакети дозволяють одразу реалізувати і дослідити кожний крок створення моделі. Це не тільки підвищує темп розробки моделі і забезпечення виявлення і усунення помилок, але відкриває можливості знаходження нових рішень в розробці системи моделей виробничої системи. Специфіка моделі – використання комплексних тривимірних графіків. В програмному середовищі існує стандартна можливість зміни ракурсів цих графіків. Тому використовуємо моделювання і візуалізацію вже на першому етапі дослідження.

На рис. 2 подано «інформаційний блок» візуального аналізу бінарного оператора оптимального агрегування для конкретного прикладу – елементів з невиспуклими ФВ класів «кусочно-лінійна» і «S-функція».

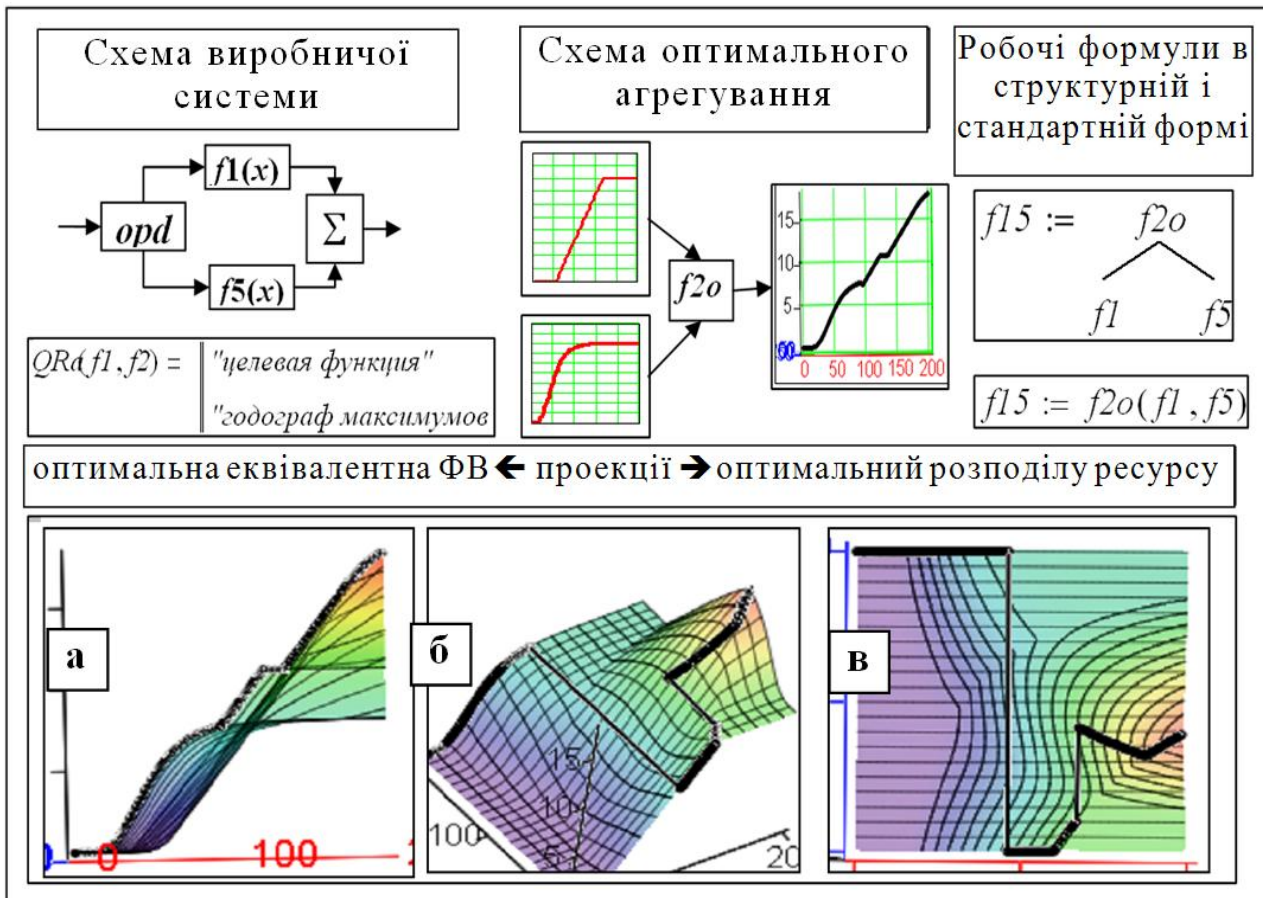


Рисунок 2 – Бінарний оператор оптимального агрегування. Проекції 3D графіка цільової функції: а – оптимальна еквівалентна ФВ; б – годограф максимумів; в – оптимальний розподіл ресурсу

В нижній частині рис. 2 подано три проєкції 3D графіка, де можна бачити: цільову функцію – залежність сумарного випуску від витрат і розподілу ресурсу (рис. 2а), і функцію оптимального розподілу ресурсу (рис. 2в). На проєкції (рис. 2б) можна бачити причини розривів. Специфіка даної роботи – дослідження моделей виробничих систем в рамках двох наукових дисциплін – математики і програмування. Вираз: $f15 = f2o(f1, f5)$ в рамках математики – оператор, що бере дві нестрого монотонні функції і повертає функцію того ж класу; в рамках програмування – це функція користувача, що бере дві структури даних і повертає структуру даних того ж класу.

В роботі поставлені і вирішені задачі оптимального агрегування інших структур, що дозволило перейти від методу оптимального агрегування для паралельної структури до методології оптимального агрегування.

На рис. 3 подано формалізацію типових ресурсних зв'язків між елементами виробничої системи. Виробничий елемент розглядається як система з двома входами – ресурсним і параметричним, і двома виходами – цільовим продуктом і відходами. Це забезпечує цілісність системи моделей виробництва.

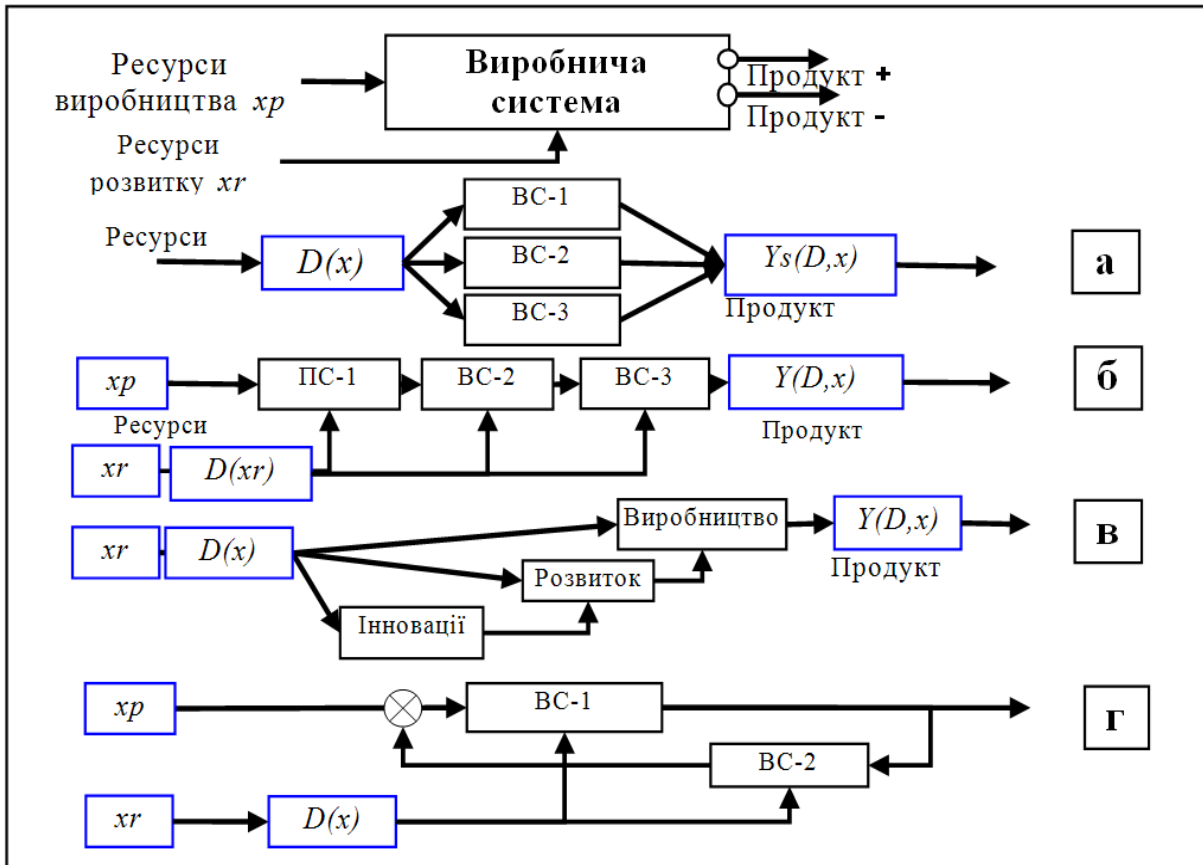


Рисунок 3 – Формалізація зв'язків між елементами ВС. Типові структури: а – система з паралельно працюючими елементами; б – система з послідовно працюючими елементами; в – система з параметричними зв'язками; г – система зі зворотним ресурсним зв'язком

Для паралельної структури із загальним входом і виходом розв'язується задача: оптимізація розподілу ресурсів виробництва. Для структури з послідовного ланцюжка підсистем розв'язується задача: оптимізація розподілу ресурсів розвитку. Для структури з послідовного ланцюжка підсистем інновації, розвиток, виробництво розв'язується задача: оптимізація розподілу ресурсів між цими підсистемами. Для структури з ресурсним додатним зворотним зв'язком розв'язується задача: оптимізація розподілу ресурсів між підсистемами «основне виробництво» і «переробка відходів» (у ресурс або додатковий продукт). У всіх задачах цільова функція – сумарний або кінцевий випуск продукції. $D(x)$ – блоки розподілу ресурсу.

Класична задача нелінійного програмування (див. рівняння (1) – (6)) була розширена: замість пошуку оптимального розподілу ресурсу для заданого обмеження ресурсу, поставлена задача знаходження функції: залежності виходу виробничої системи від величини обмеження по ресурсу. Прототип вибраного підходу – методологія Беллмана для рішення оптимізаційних задач. Головні складові цієї методології – функції Беллмана, принцип інваріантного занурення і принцип оптимальності Беллмана. Форма розв'язання для узагальненої однокрокової задачі оптимального агрегування паралельних структур:

$$Y_s = fops(X_s), \quad x_i = Dop(X_s), \quad (13)$$

де Y_s – сумарне виробництво, X_s – сумарний ресурс, $f_{ops}(X_s)$ – оптимальна еквівалентна ФВ (ОЕФВ) системи, $Dop(X_s)$ – вектор-функція оптимального розподілу ресурсу.

Форма розв'язання бінарної задачі оптимізації:

$$y = f_{2op}(X_s), f_{2op} = F2o(f_1, f_2), x_1 = \alpha o \cdot X_s, x_2 = (1 - \alpha o) \cdot X_s, \quad (14)$$

де f_{2op} – бінарний оператор оптимального агрегування для паралельної структури з функціями виробництва f_1, f_2 ; x_1 – ресурс, виділений елементу з ФВ f_1 , x_2 – ресурс, виділений елементу з ФВ f_2 , αo – оптимальна частка ресурсу, яка виділена першому елементу, $(1 - \alpha o)$ – оптимальна частка ресурсу, яка виділена другому елементу.

При виконанні умови асоціативності задача оптимального агрегування виробничої системи з довільним числом елементів може бути замінена еквівалентною послідовністю одновимірних задач оптимізації, наприклад, для паралельної структури з чотирьох елементів з ФВ f_1, f_2, f_3, f_4 для отримання ОЕФВ f_{ops} необхідно виконати три бінарних операції оптимального агрегування:

$$f_{ops} = F2op(f_1, F2op(f_2, F2op(f_3, f_4))),$$

де $F2op$ – бінарний оператор оптимального агрегування.

Розроблені і дослідженні програмні модулі бінарних операторів для інших структур ресурсних зв'язків у виробничих системах. На рис. 4 подані паралельна, послідовна і кільцева структури для виробничих систем і приклади їх оптимального агрегування.

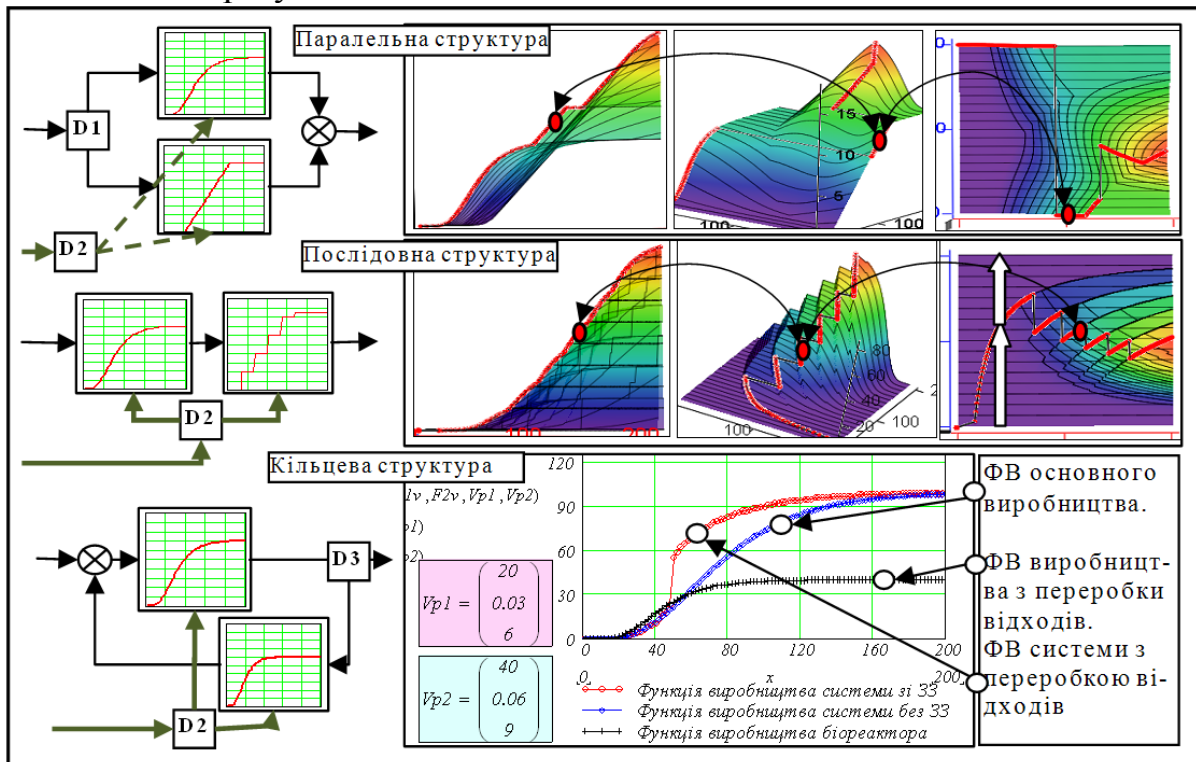


Рисунок 4 – Тестування операторів оптимального агрегування для типових структур виробничих систем

Для перших двох структур подано по три проекції тривимірного графіка цільової функції з накладеним на цільову функцію годографом максимумів. Для кільцевої структури подано три графіки функцій виробництва основного виробництва, виробництва з переробкою відходів, системи з переробкою відходів. Розриви функцій оптимального розподілу ресурсів обумовлені невивуклими і негладкими ФВ. Відомі методи оптимізації вимагають від ФВ існування неперервних похідних, вивуклості, лінійності. Напрацювання бази робочих математичних моделей для типових ресурсних зв'язків між елементами виробничих систем дозволило поставити, вирішити і обґрунтувати ізоморфне відображення структур ресурсних зв'язків виробничої системи (ВС) в структуру бінарного дерева оптимального агрегування.

На рис. 5 представлено приклад такого відображення для ВС з паралельними, послідовними і кільцевими структурами. Введено також агрегування підсистем «виробництво» і «розвиток», що сьогодні є інтегрованими. Подане в нижній частині рис. 5 бінарне дерево – це робоча формула в структурній формі. Таке візуальне подання рішення задачі корисне при вивченні методології оптимального агрегування ВС і при постановці і вирішенні нових задач.

В схемі на рис. 5 використані такі оператори оптимального агрегування: f_{2o} – для паралельної структури; f_{2pr} – для системи «виробництво, розвиток»; f_{2lr} – для послідовної ресурсної структури; f_{2ps} – для структури «виробництво, склад»; f_{2os} – для структури «ресурсний зворотний зв'язок». Елементи нижнього рівня бінарного дерева – функції виробництва і розвитку, аргументи функцій – величини ресурсів і вектори параметрів функцій. Структурна формула є визначенням функції користувача $Fops(Xs, MP)$, де Xs – витрати ресурсів, MP – матриця параметрів системи. Результат виконання функції користувача $Fops(Xs, MP)$ – матриця тієї ж структури, що і дискретизовані ФВ: $f_{1p}, f_{2p}, f_{3p}, f_{4p}, f_{5p}$ – перший стовпець значення функції, наступні стовпці – значення оптимальних розподілів ресурсу.

Паралельне виконання теоретичних досліджень і розробки робочих моделей дозволили виконати теоретичне обґрунтування методів оптимального агрегування для окремих задач і на цій основі побудувати методологію оптимального агрегування. Основа методології – алгебра оптимального агрегування, формалізація якої виконана згідно стандартам загальної алгебри. Розглянуті всі пункти визначення алгебраїчної системи, але в роботу включені тільки суттєві пункти для поставлених в роботі задач. Метод оптимального агрегування паралельних структур створює алгебраїчну систему: $\langle A; WF; WR \rangle$, де A – множина дискретизованих ФВ (носіїв алгебри); WF – оператор оптимального агрегування (оператор алгебри, визначений на A), WR – множина відносин, визначених на A (домінування повне, часткове). Бінарний оператор $f_{2o}(f_1, f_2)$ оптимального агрегування бере дві дискретизовані ФВ f_1 та f_2 , представлені матрицями з фіксованим числом рядків і змінним числом стовпців, і повертає об'єкт того ж класу – дискретизовану оптимальну ФВ, подану матрицею тієї ж структури.

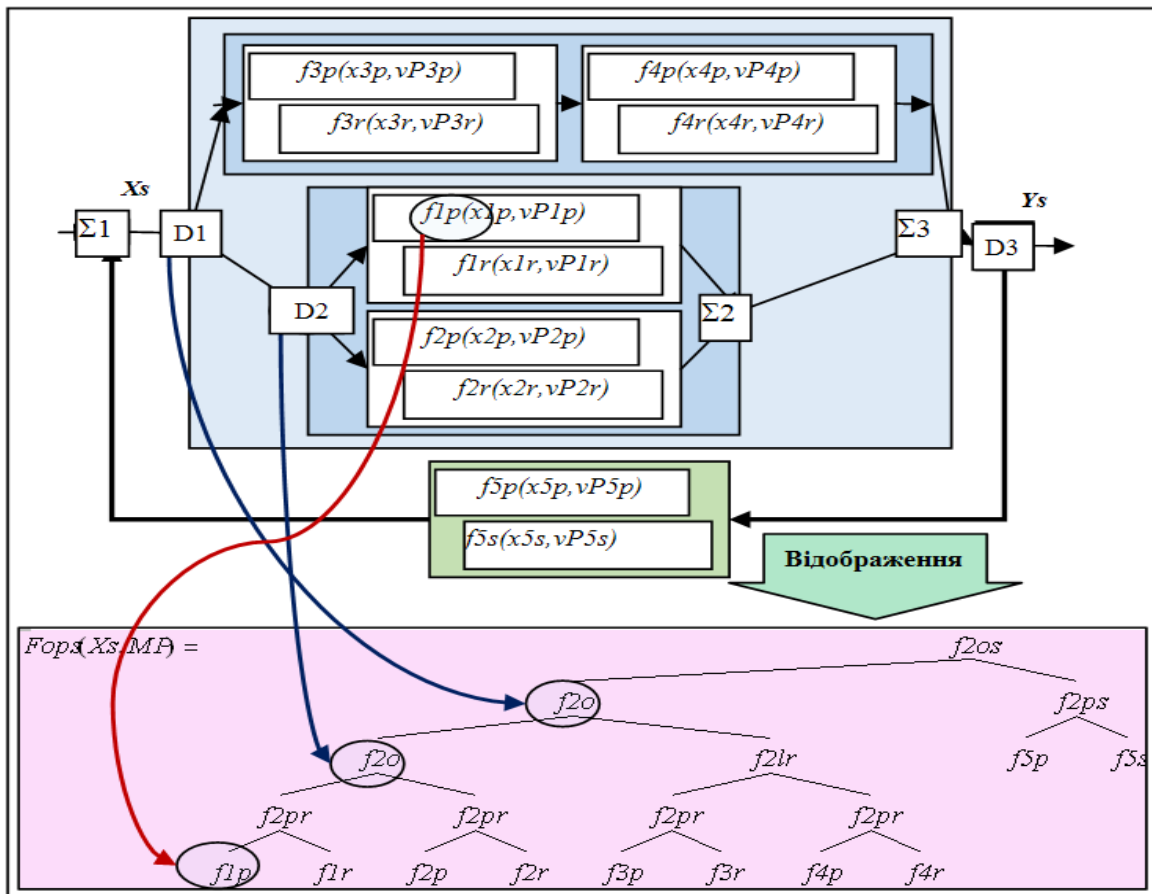


Рисунок 5 – Відображення структури виробничої системи в структуру бінарного дерева оптимального агрегування. Приклад

Властивості оператора оптимального агрегування для паралельних структур асоціативність і комутативність:

$$f_{2o}(f_1, f_{2o}(f_2, f_3)) = f_{2o}(f_2, f_{2o}(f_3, f_1))$$

Декомпозиція багатовимірної задачі оптимального розподілу ресурсу в послідовність одновимірних оптимізаційних задач – наслідок асоціативності бінарного оператора $f_{2o}(f_1, f_2)$. На базі узагальнення методу оптимального агрегування для паралельних структур розроблено оператори оптимального агрегування:

- послідовних ресурсних структур: $f_m(f_1, f_2)$ – бінарний некомутативний, асоціативний оператор оптимального агрегування;
- послідовних параметричних структур: $f_p(f_i, f_r, f_v)$ – тернарний некомутативний оператор оптимального агрегування структур «інновації, розвиток, виробництво»;
- структур з ресурсними зворотними зв'язками $f_{os}(f_1, f_2)$ – бінарний оператор оптимального агрегування систем з ресурсним зворотним зв'язком. Інтерпретація – переробка відходів і повернення ресурсів у цикл виробництва, та ін.

Сформульовані і доведені теореми стосовно властивостей бінарних операторів оптимального агрегування.

Теорема 1. Бінарний оператор оптимального агрегування для виробничої системи (ВС) з N паралельно поєднаних елементів, які мають нестрого моно-

тонно зростаючі ФВ і адитивним критерієм оптимальності ВС є асоціативним і комутативним, що дозволяє замінити N -вимірну задачу оптимізації системою одновимірних задач оптимізації, що потребує $(N-1)$ застосувань бінарних операцій оптимального агрегування паралельної структури, і в підсумку дає оптимальну еквівалентну функцію «витрати – випуск» виробничої системи.

Теорема 2. Бінарний оператор оптимального агрегування для виробничої системи (ВС) з N послідовно поєднаних елементів, які мають нестрого монотонно зростаючі ФВ і узагальненим мультиплікативним критерієм оптимальності ВС є асоціативним і некомутативним, що дозволяє замінити N -вимірну задачу оптимізації послідовністю з одновимірних задач оптимізації, що потребує $(N-1)$ застосувань бінарних операцій оптимального агрегування послідовних структур до суміжних пар послідовної структури, що в підсумку дає оптимальну еквівалентну функцію «витрати – випуск» виробничої системи.

Теорема 3. Структура ресурсних зв'язків раціональної виробничої системи, елементи якої мають нестрого монотонні узагальнені ФВ, а зв'язки відносяться до класів паралельних, послідовних і кільцевих поєднань може бути ізоморфно відображена в ієрархічне бінарне дерево оптимального агрегування, операнди нижнього рівня якого – узагальнені ФВ елементів, а вузли – бінарні оператори оптимального агрегування паралельних, послідовних структур і структур з ресурсними зворотними зв'язками, що дозволяє замінити багатовимірну задачу оптимізації ВС послідовністю з одновимірних задач оптимізації, і в підсумку дає оптимальну еквівалентну функцію «витрати – випуск» виробничої системи. Доведення базується на використанні попередніх результатів – теорем про агрегування паралельних, послідовних поєднань, зворотного зв'язку, та аналізу властивостей перетворень для монотонних функцій.

Рішення ряду оптимізаційних задач дозволило визначити порядок вирішення задач на базі методології оптимального агрегування: – аналіз ресурсної структури заданої виробничої системи; – аналіз ресурсних зв'язків між елементами, виділення нових класів зв'язків; – розробка структури операндів і бінарних операторів оптимального агрегування для нових класів зв'язків; – рішення задачі методом оптимального агрегування – відображення структури виробничої системи в структуру бінарного дерева оптимального агрегування;

- дослідження адекватності моделей та формування параметризованої оптимальної еквівалентної функції виробництва (ОЭФП) системи.

Розроблені і досліджені моделі і методи оптимального агрегування дозволили побудувати ефективні методи отримання рішень низки варіаційних задач оптимального розвитку виробничих систем. Задачі оптимального розвитку виробничих систем є складними багатовимірними варіаційними задачами, аналітичні рішення яких існують тільки для занадто спрощених моделей. Розроблений і досліджений в даній роботі метод вирішення задач оптимального розвитку дозволяє звести варіаційну задачу з інтегральним критерієм першого роду до алгебраїчної задачі. Аналоги і прототипи робочої моделі оптимального розвитку виробничої системи – роботи Р. Беллмана: дослідження варіаційної «задачі розподілу» і окремого випадку – «задачі Марковіца», для якої Беллман знайшов розв'язання для випадку лінійних функцій виробництва.

Відмінності розробленого методу розв'язання варіаційної задачі розвитку від моделей Беллмана: – використано метод оптимального агрегування для заміни розподіленої виробничої системи еквівалентним оптимальним елементом; – розширено постановку задачі введенням можливості використання зовнішніх ресурсів (кредитів), урахуванням процесів освоєння виробництва та обмежень потреб в продуктах виробництва; – для отримання оптимальної стратегії управління використано метод принципу максимуму Понтрягіна.

На рис. 6 подано схему вирішення задачі оптимального розвитку.

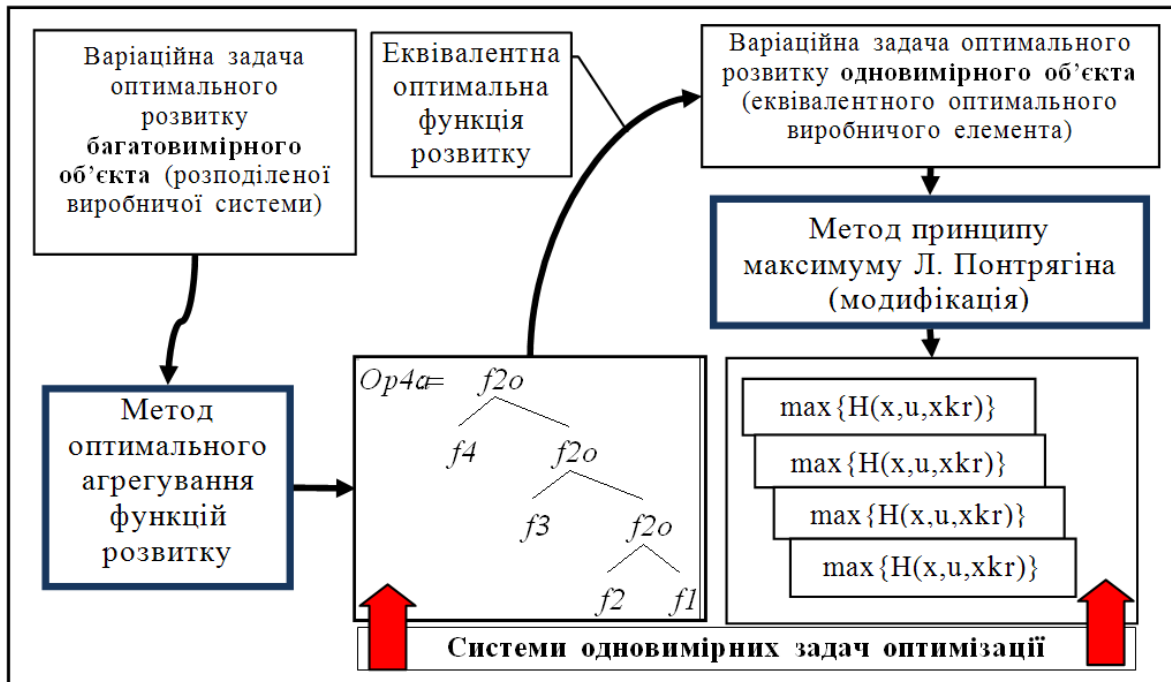


Рисунок 6 — Декомпозиційна структура для варіаційної задачі розвитку

В даній роботі вибрано метод принципу максимуму Понтрягіна. Причина – певні переваги в моделюванні оптимальних процесів розвитку і обчисленні функції Гамільтона. Головна відмінність від аналогів в тому, що спочатку виконується оптимальне агрегування для багатовимірного об'єкта (розподіленої виробничої системи). Варіаційна задача оптимального розвитку вирішується для одновимірного об'єкта (еквівалентного оптимального виробничого елемента) методом принципу максимуму. Метод принципу максимуму – декомпозиційний: в ньому задача знаходження екстремуму інтегрального функціонала замінюється задачею максимізації функції Гамільтона. Змінні оптимізації – розподіли поточних ресурсів між розвитком і накопиченням (прирошенням інтегрального критерію). В підсумку варіаційна задача замінюється послідовністю одновимірних задач визначення екстремуму: цільової функції однокрокової задачі оптимального агрегування і функції Гамільтона. Головна перевага методу – обчислення всіх задач методом прямого перебору, що знімає всі проблеми багатовимірної пошукової оптимізації.

Модифікуємо базову модель розвитку (7) – (10) – вводимо оптимальне агрегування ВС і рішення варіаційної задачі методом принципу максимуму. Оптимальне агрегування – заміна ВС оптимальним еквівалентним елементом.

Зміна управління в критерії (10) α_k – поточний розподіл ресурсу між розвитком і накопиченням:

$$x1_k = y2_{k-1} \cdot (1 - \alpha_{k-1}) \cdot \Delta T.$$

Обмеження управління: $0 \leq \alpha_k \leq 1$. Функція Гамільтона, визначення:

$$H(x, u) = \sum_{i=0}^N \psi_i \cdot f_i; \quad \frac{d}{dt} \psi_j(t) = -\frac{\partial}{\partial J} H(x, u); \quad \frac{d}{dt} \psi_x(t) = -\frac{\partial}{\partial x} H(x, u). \quad (15)$$

Оптимальне управління: $\alpha_{op} = \arg \max_{\alpha} (H(x_k, \alpha_k))$.

Дезагрегування: розподіл ресурсів розвитку між підсистемами ВС – рутинна операція, дані для якої містяться в структурі операнда «оптимальна еквівалентна ФР».

В аспекті обчислювальних методів задача знаходження екстремуму функції $N \cdot K$ змінних замінюється задачею знаходження екстремумів $(N-1) \cdot (K-1)$ функцій однієї змінної.

Аналітичні рішення варіаційної задачі розвитку відомі для дуже спрощених моделей функціонування і розвитку. В роботі запропоновано і досліджено новий підхід до отримання функції Гамільтона. Суть підходу – отримання параметризованих рішень диференціальних рівнянь для спряжених функцій числовими методами. Це знімає обмеження на вид нелінійностей в диференціальних рівняннях, а параметризоване розв'язання є задовільним замінником аналітичного розв'язання. Подаємо приклад точного розв'язання задачі отримання функції Гамільтона. Задано:

$$\text{критерій оптимальності: } J_1 = \int_0^{T_p} x(t) \cdot (1 - u(t)) \cdot dt,$$

диференціальне рівняння динаміки прирощення темпу виробництва:

$$\frac{d}{dt} x(t) = \text{fin}(x(t) \cdot u(t)),$$

де обмеження управління: $0 \leq u(t) \leq 1$.

Додаємо змінну стану – критерій і записуємо відповідні рівняння:

$$\frac{d}{dt} x(t) = \text{fin}(x(t) \cdot u(t)) = f_x; \quad \frac{d}{dt} J_1(t) = x(t) \cdot (1 - u(t)) = f_j. \quad (16)$$

Записуємо вираз для функції Гамільтона:

$$H(x, u) = \sum_{i=0}^N \psi_i \cdot f_i = \psi_j \cdot f_j + \psi_x \cdot f_x, \quad (17)$$

де f_j, f_x – праві частини рівнянь (16). Підставимо їх у (17)

$$H(x, u) = \psi_j \cdot (x(t) \cdot (1 - u(t))) + \psi_x \cdot \text{fin}(x(t) \cdot u(t)). \quad (18)$$

Записуємо рівняння для визначення спряжених функцій:

$$\frac{d}{dt} \psi_j(t) = -\frac{\partial}{\partial J} H(x, u); \quad \frac{d}{dt} \psi_x(t) = -\frac{\partial}{\partial x} H(x, u). \quad (19)$$

Знаходимо окремі похідні від $H(x, u)$ (18) і підставляємо їх в (19)

$$\frac{\partial}{\partial J} H(x, u) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial x} H(x, u) = \psi_J \cdot (1 - u) + \psi_x \cdot u \cdot \frac{\partial}{\partial x} \text{fin}(u \cdot x). \quad (20)$$

Розв'язуємо отримані диференціальні рівняння (19) з урахуванням (20).
Перше рівняння – для випадку максимізації критерію J_1 :

$$\frac{d}{dt} \psi_J(t) = 0; \quad \psi_J(t) = \text{const}.$$

Для вирішення другого рівняння використовуємо числові методи. Рішення визначено як функція заданого параметру:

$$\frac{d}{dt} \psi_x(t) = -\psi_J \cdot (1 - u) - \psi_x(t) \cdot u \cdot \frac{\partial}{\partial x} \text{fin}(u \cdot x) = -\psi_x(t) \cdot u \cdot \frac{\partial}{\partial x} \text{fin}(u \cdot x) - (1 - u). \quad (21)$$

Підставимо розв'язання диференціальних рівнянь для спряжених функцій у (18) і отримаємо остаточний вираз для функції Гамільтона

$$H(x, u) = x(t) \cdot (1 - u(t)) + \psi_n(u, x, dFr, k) \cdot \text{fin}(x(t) \cdot u(t)), \quad (22)$$

де спряжена функція $\psi_n(u, x, dFr, k)$ визначена в середовищі пакету моделювання як функція управління u , темпу випуску продукції x , похідної від функції розвитку dFr . Отримання функції Гамільтона – складна задача, тому в роботі було досліджене наближення в просторі стратегій, що суттєво зменшує обчислювальні витрати і тому дозволяє реалізувати адаптацію до збурень. Нормоване значення відхилення наближеного J_{1ko} і точного значення J_{1o} інтегрального критерію: $\Delta J_1 := \frac{J_{1ko} - J_{1o}}{J_{1o}}$. Точність наближення складає приблизно 3 %.

Аналогічно вирішені задачі оптимального розвитку для випадку використання зовнішніх ресурсів («кредитні стратегії»), для випадку урахування процесів освоєння при введенні нових виробничих потужностей і продуктів виробництва («цінові стратегії»), для випадку урахування обмежень потреб в продукті. При вирішенні варіаційних задач виконувалась комплексна перевірка коректності. Сформульована і доведена теорема, що є обґрунтуванням третього нового наукового результату.

Теорема 4. Варіаційна задача оптимального, за інтегральним критерієм першого роду, розвитку виробничої системи (ВС) з довільною структурою ресурсних зв'язків (теорема 3) може бути розбита в послідовність двох оптимізаційних задач: 1) задачі оптимального агрегування ВС, 2) одновимірної задачі оптимального розвитку, яка вирішується методом принципу максимуму, що дозволяє замінити багатовимірну задачу оптимізації розвитку системою одновимірних задач оптимізації – бінарних операцій оптимального агрегування і одновимірних задач максимізації функції Гамільтона, і в підсумку дає оптимальну стратегію розвитку для кожного елемента і для ВС в цілому.

Доведення базується на порівнянні функцій Гамільтона для оптимально агрегованої і неагрегованої ВС і властивостях оптимальної еквівалентної ФВ (теорема 3). Далі наведено приклад доведення теореми для випадку ВС з паралельно поєднаними елементами. Доведення для інших припустимих структур виконуються аналогічно. Запишемо функцію Гамільтона для виробничої систе-

ми. На кожному кроці процесу розвитку повинна обчислюватись ця функція і знаходитись її максимум по змінним α і u_j :

$$Hka(x, \alpha, u) = xs \cdot (1 - \alpha) + \left(\sum_{j=1}^N fin(xs \cdot \alpha \cdot u_j)_j \right) \cdot (Tp - t) - zp(t) \cdot (1 + pr \cdot (Tp - t)), \quad (23)$$

де xs – сумарний ресурс виробничої системи; $0 \leq \alpha \leq 1$ – безрозмірна змінна управління – розподіл ресурсу між розвитком і накопиченням; $u_j, j = 1, \dots, N$ – безрозмірні управління нижнього рівня: $u_1 + u_2 + \dots + u_N = 1$ – частки ресурсу розвитку для кожного елементу виробничої системи Tp – плановий період для процесу розвитку; t – поточний час процесу; $zp(t)$ – темп зовнішніх для даної системи ресурсів.

Перша складова в (23): $xs \cdot (1 - \alpha)$ – ресурси виділені в накопичення; друга складова $\sum_{j=1}^N fin(xs \cdot \alpha \cdot u_j)_j$ – сумарне поточне прирощення темпу виробництва.

Незалежно від того, якою буде частка ресурсу для розвитку, розподіл ресурсу між розвитком окремих виробництв повинен бути оптимальним. Запишемо локальну задачу оптимізації другої складової виразу в дужках в стандартному виді. Введемо означення: $R = xs \cdot \alpha$, $r_i = R \cdot u_i$, $i = 1, \dots, N$.

Визначимо: цільову функцію N змінних:

$$F(r_1, r_2, \dots, r_N) = \sum_{j=1}^N fin(r_j)_j, \quad (24)$$

обмеження ресурсу:

$$G(r_1, r_2, \dots, r_N) = R - \sum_{j=1}^N r_j = 0, \quad (25)$$

обмеження управління:

$$0 \leq u_j \leq 1. \quad (26)$$

Потрібно знайти розподіл (r_1, r_2, \dots, r_N) , що дає максимум цільової функції та задовольняє обмеження. Застосовуємо метод оптимального агрегування для задачі з адитивним критерієм (24 – 26). Шукаємо функціональну залежність $Dop(R)$ – вектор-функцію оптимального розподілу ресурсу. Деякий компонент вектор-функції $Dop(R)$ визначає залежність оптимального для i -го елемента системи обсягу ресурсу від загального обмеження по ресурсу. Визначимо еквівалентну оптимальну функцію розвитку:

$$Fop(R) = \sum_{j=1}^N fin(Dop(R)_j)_j. \quad (27)$$

Числовими методами оптимізації завжди можна знайти функції $Fop(R)$ та $Dop(R)$. Нарешті підставимо (27) у (23) і отримуємо вираз для функції Гамільтона еквівалентної оптимальної системи:

$$Hka(xs, \alpha) = xs \cdot (1 - \alpha) + Fop(xs \cdot \alpha) \cdot (Tp - t) - zp(t) \cdot (1 + pr \cdot (Tp - t)). \quad (28)$$

Еквівалентність заміни суми в (27) на оптимальну еквівалентну функцію в (21) витікає з теореми 2 про еквівалентність оптимально агрегованої функції

багатовимірній функції за входом-виходом для всіх значень сумарного ресурсу в діапазоні визначення. Тепер, якщо у вираз (23) підставити оптимальні значення $u_j, j=1, \dots, N$, то функції (23) і (28) будуть тотожними функціями від xs і α .

$$\arg \max_{\alpha} (Hka(xs, \alpha, u_{op}(xs, \alpha))) = \arg \max_{\alpha} (Hka(xs, \alpha)).$$

Тобто, тотожними будуть і оптимальні стратегії розвитку. Теорема доведена.

Розглянемо практичні аспекти застосування еквівалентних оптимальних моделей розвитку. Розроблена методологія дозволяє виконувати повний аналіз оптимального процесу розвитку (рис. 7).

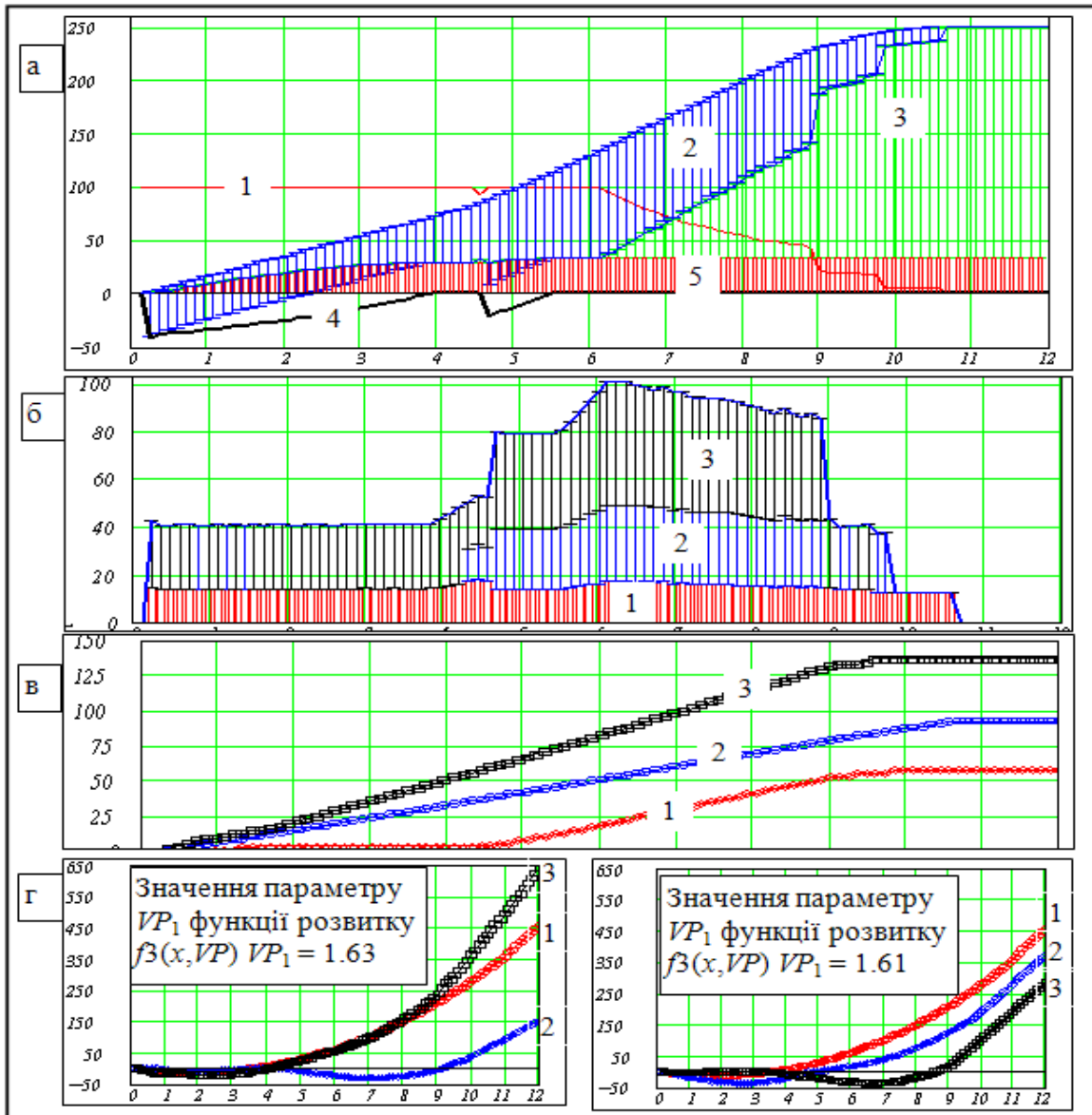


Рисунок 7 – Приклад розрахунку оптимального процесу розвитку; а – процеси в системі (1 – оптимальна стратегія розвитку – безрозмірна функція розподілу ресурсу системи між розвитком і накопиченням, 2 – витрати розвитку, 3 – накопичення, 4 – кредитування, 5 – повернення кредитів); б – витрати ресурсів на розвиток елементів 1, 2, 3; в – темпи виробництва в елементах 1, 2, 3; г – порівняння процесів віддачі елементів при двох значеннях параметра ФР елемента №3: 1.63 і 1.61

В модель еквівалентної оптимальної моделі розвитку входить оптимальна еквівалентна ФР системи $Fop(xs \cdot \alpha)$, що отримана методом оптимального агрегування. Ця функція розраховується один раз (за умови досить постійних параметрів функцій розвитку), а потім використовується в розв'язанні варіаційної задачі оптимального розвитку одновимірного об'єкта (еквівалентного оптимального виробничого елемента). На базі отриманих теоретичних результатів були виконані програмно методичні розробки для запровадження. Досить великий обсяг досліджень оптимальних процесів розвитку показав суттєві переваги рішень задач оптимального розвитку на базі методології оптимального агрегування над відомими рішеннями: – відсутність обмежень на вид функцій виробництва і розвитку, можливість онлайн-переобчислення оптимальної стратегії для системи в цілому і кожного елемента при змінах параметрів і зупинці функціонування елементів, що в підсумку зменшує втрати при наявності невизначеностей і збурень на 5-12%.

У **третьому розділі** досліджується система імітаційних моделей виробничих систем і систем виробників розподілених систем. Представлена в розділі 2 система моделей виробничих систем не дає адекватного відображення таких аспектів функціонування і розвитку як взаємодія з конкурентами, постачальниками, користувачами і обумовленими цим ризиками активного оточення. Створення систем імітаційних моделей для об'єктів певної предметної області (металургія, агровиробництво, ...) – складний неповністю формалізований процес. Моделі цього розділу – результат предметного вивчення моделей і технологій їх створення з робіт Р. Беллмана, Дж. Форрестера, М. Пешеля, В. Глушкова, Н. Моїсеєва, М. Месаровича, С. Хайтуна і роботи з підприємствами і організаціями. Як показав аналіз відомих моделей функціонування і розвитку розподілених виробничих систем, неможливо отримати задовільні моделі для аналізу ризиків не розширюючи границі системи. Відомі моделі і методи аналізу ризиків неадекватні для сучасних виробництв, в першу чергу, через швидкі зміни об'єктів моделювання і складні нелінійні взаємодії.

Вибрано підхід на базі структурно-функціонально-редукційної декомпозиції і створено систему імітаційних моделей класів: $1M$ – один (агрегований) виробник, M продуктів; $N1$ – N виробників, один (агрегований) продукт; NM – N виробників, M продуктів, NMK – N виробників, M продуктів, K користувачів. В усі моделі були вбудовані генератори глобальних і локальних випадкових збурень. Такий підхід породжує ряд проблем. Проблема об'єму обчислень вирішується за рахунок векторизації (розпаралелювання) обчислень і оптимального агрегування користувачів, продуктів виробництва і виробників. Проблема створення узагальненої моделі локального (на рівні підприємства) і глобального (на рівні корпорації, галузі) управління в умовах невизначеностей і збурень вирішується за рахунок паралельного використання методу оптимального агрегування, на базі методології оптимального агрегування і управління на базі точної статистики. Відповідно до прийнятої методології розбиваємо процес створення задовільної моделі в процес створення послідовності моделей, що уточнюються і ускладнюються.

Для підвищення ефективності розроблених моделей функціонування і ро-

звітку потрібно було ввести в них більш адекватні моделі невизначеностей зовнішнього середовища. Найбільш значимими складовими невизначеностей сьогодні є діяльність інших виробників по розробці нових технологій і продуктів виробництва, а також моделі вибору користувачів на множині альтернатив певного класу продуктів виробництва. Для адекватного відображення невизначеностей вибрана концепція моделювання «один на фоні всіх» – моделюємо процес функціонування і розвитку певного виробника разом з моделюванням його оточення – інших виробників та користувачів певного класу продуктів.

Сучасні розподілені системи звичайно є також і децентралізованими – кожний елемент виробничої системи самостійно вибирає напрямки розвитку і розподіляє власні ресурси виходячи тільки з власного критерію ефективності. Управлінські рішення елемент приймає на базі неповної і неточної інформації про стан системи, неточних математичних моделей, що використовуються для прогнозування і планування. Все це обумовлює вибір структури управління підприємства – елемента системи виробників (рис. 8). Функція управління – розподіл ресурсів елемента, що має три рівні:

- розподіл між витратами на розвиток і витратами поза межами системи;
- розподіл між детермінованій і стохастичній («лотерейній») частками;
- розподіл між виробництвами окремих продуктів.

На базі запропонованої схеми управління (рис. 8) і базової моделі (11), (12) виконано розробку моделі систем виробників з урахуванням локального управління. Базова узагальнена модель локального управління. Обробка вхідних даних:

- ковзне середнє змінних стану:

$$xs_{i,j} = xs_{i,j} \cdot \alpha + (X_{t+1})_{i,j} \cdot (1 - \alpha), \quad (29)$$

- ковзне середнє темпів змінних стану:

$$dxs_{i,j} = dxs_{i,j} \cdot \beta + \Delta xs_{i,j} \cdot (1 - \beta), \quad (30)$$

- показник ефективності:

$$efp_{i,j} = a1 \cdot xs_{i,j} + a2 \cdot dxs_{i,j}. \quad (31)$$

Локальне управління. Визначення розподілу ресурсів.

Розподіл 1: імовірнісна частка: $Rpm_{i,t} = Rs_{i,t} \cdot lox_i$,

детермінована частка: $Rdp_{i,t} = Rs_{i,t} \cdot (1 - lox_i)$.

Розподіл 2: "лотерейний": $(rpm_t)_{i,j} = Rpm_{i,t} \cdot P(rzp_{i,j})$,

пропорційний: $(rdp_t)_{i,j} = Rdp_{i,t} \cdot rzp_{i,j}$.

Розподіл 3: для кожного елемента: $r_{i,j} = (rpm_t)_{i,j} + (rdp_t)_{i,j}$,

де $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, M$ – індекси елементів та продуктів; $0 \leq lox_i \leq 1$ – частка поточного ресурсу системи, що розподіляється ймовірно ("лотерейний розподіл"); $Rs_{i,t}$ – поточний сумарний ресурс i -го елемента; $Rpm_{i,t}$ – імовірнісна мольна; $Rdp_{i,t}$ – детермінована пропорційна частки ресурсу; $P(rzp_{i,j})$ – випадкова подія: ресурс $Rpm_{i,t}$ виділений для розвитку виробництва j -го продукту;

$(rpm_i)_{i,j}$, $(rdp_i)_{i,j}$ – імовірнісна та детермінована складові поточного ресурсу, виділеного у розвиток j -го продукту; $r_{i,j}$ – локальне управління: поточний ресурс, виділений i -им елементом у розвиток j -го продукту.

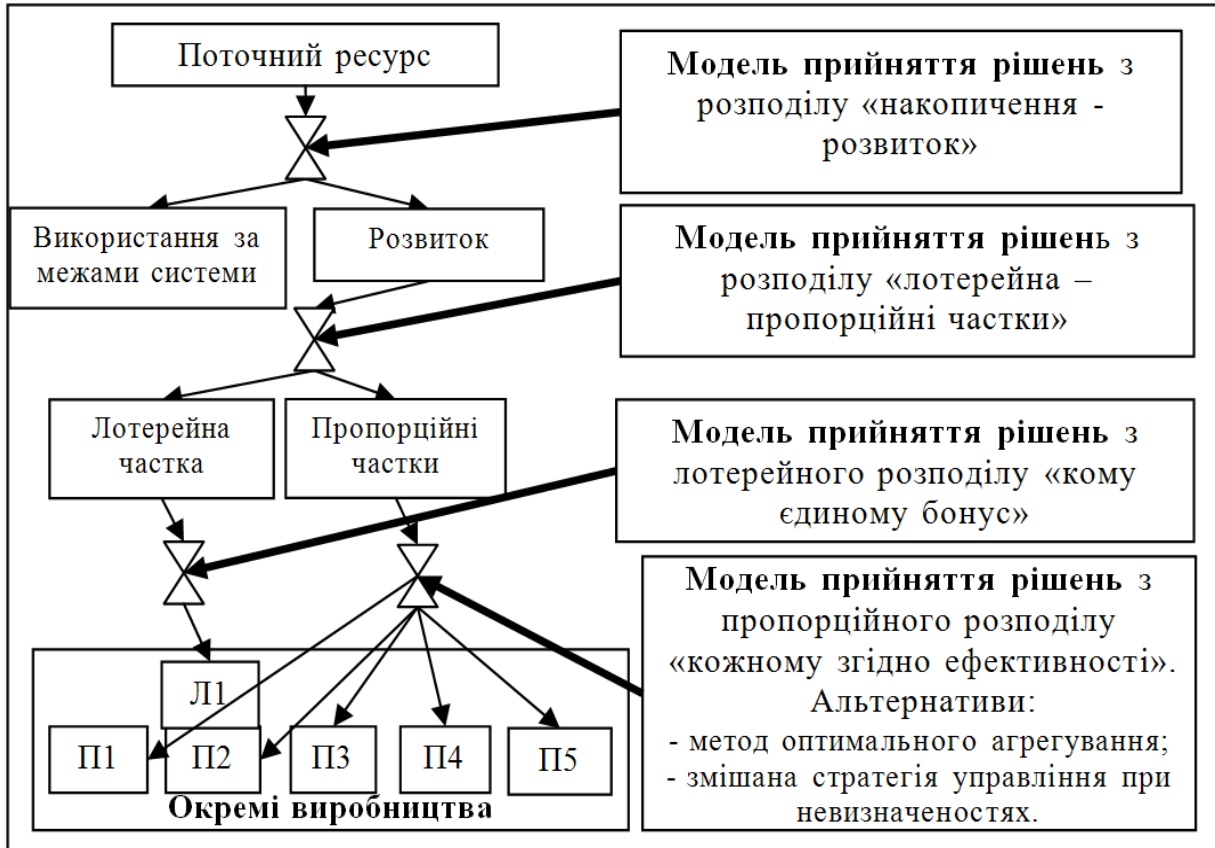


Рисунок 8 — Узагальнена схема локального управління

Параметри $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$ – об'єкти налаштування в залежності від швидкості змін і рівня шумів. Параметр $0 \leq \text{lox} \leq 1$, задає розподіл ресурсу елемента на дві частини: імовірнісну та детерміновану частки. Частка lox випадає одному продукту, але згідно реалізації розподілу ймовірностей, що формується нормуванням ефективностей продуктів; частка $(1 - \text{lox})$ ділиться детерміновано відповідно цьому ж розподілу. Змінюючи параметр lox отримуємо широкий спектр детермінованих та імовірнісних законів управління. Модель управління відтворює відомі алгоритми локального управління вибором параметрів $\alpha, \beta, \text{lox}$. Розроблено більше десяти комплексів «робоча модель + інтерфейси», виконано значний обсяг продуктивних досліджень.

На рис. 9 подано приклади моделювання системи «16 виробників, 16 продуктів виробництва» і аналізу «один на фоні всіх». Нові моделі потребували нових інтерфейсів для комплексного аналізу процесів. Вибрана концепція моделювання «один на фоні всіх»: на графіки динаміки рангових розподілів виробників за сумарними темпами виробництва (рис. 9в і 9г) накладено траєкторії в просторі «час, ранг, темп випуску» двох вибраних виробників, що використовують різні управління: ризикове і безризикове. Конкретний виробник може задати параметри інших виробників і шукати оптимальні для себе стратегії управління в активному середовищі.

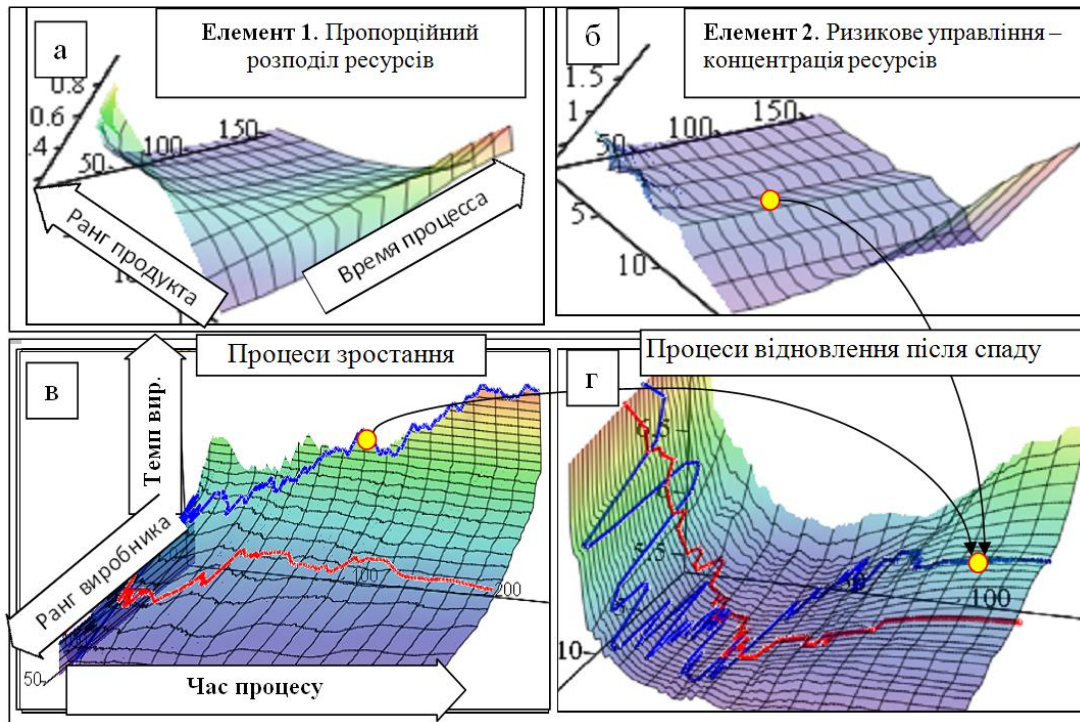


Рисунок 9 – Моделювання системи «N виробників, M продуктів». Приклади: а – динаміка розподілу ресурсів виробником 1 між виробництвами окремих продуктів, ранжованих за обсягами продаж, при використанні безризикового управління; б – динаміка розподілу ресурсів виробником 2 при використанні ризикового управління; в – динаміка рангових розподілів виробників за сумарними темпами виробництва для сценарію «зростання виробництва»; г – динаміка рангових розподілів виробників для сценарію «відновлення виробництва після спаду»

На рис. 10 подано приклад аналізу «статистики віртуальної реальності для системи виробників малої розмірності. Можлива інтерпретація: глобальний ринок певної високотехнологічної продукції ділять 4 великих виробника. Для такої системи виробників з багатьох причин неможливо зібрати коректну і повну статистику, але можливо отримати задовільні оцінки параметрів виробництва і використання продуктів виробництва – вхідні дані імітаційної моделі, що відтворює «породжуючі механізми». Отримані негаусівські багатомодові розподіли. Моді відповідають ймовірностям ситуацій контролю виробником виробництва: одного, двох, трьох продуктів. Створені моделі систем виробників відтворюють властивості процесів, що спостерігаються в реальних системах: - гіперболічні рангові розподіли – індикатори оптимальності усталених режимів, – негармонічні коливальні процеси типу хвиль Кондратьєва і хвиль Кузнеца. Критичні показники для реальних виробничих систем – ефективності виробництва, розвитку і надійність. В прикладі на рис. 10 ефективності виробників – зовнішні параметри. Для підвищення корисності моделі системи виробників необхідно створення моделей технологічних процесів – першоджерел показників ефективності і надійності. Виконано створення і дослідження оптимального управління такими розподіленими технологічними системами:

- адаптивна екстремальна система оптимального розподілу навантаження

між технологічними агрегатами, з послідовно працюючими регуляторами – стабілізації сумарного навантаження і оптимального розподілу навантаження – альтернатива методу оптимального агрегування;

- система термінального управління, оптимальна за критерієм витрат на управління і стійка до відмов виконавчих елементів;

- система управління із спостерігачами, стійка до відмов вимірювачів, оптимальна за витратами на управління і стійка до відмов вимірювачів.

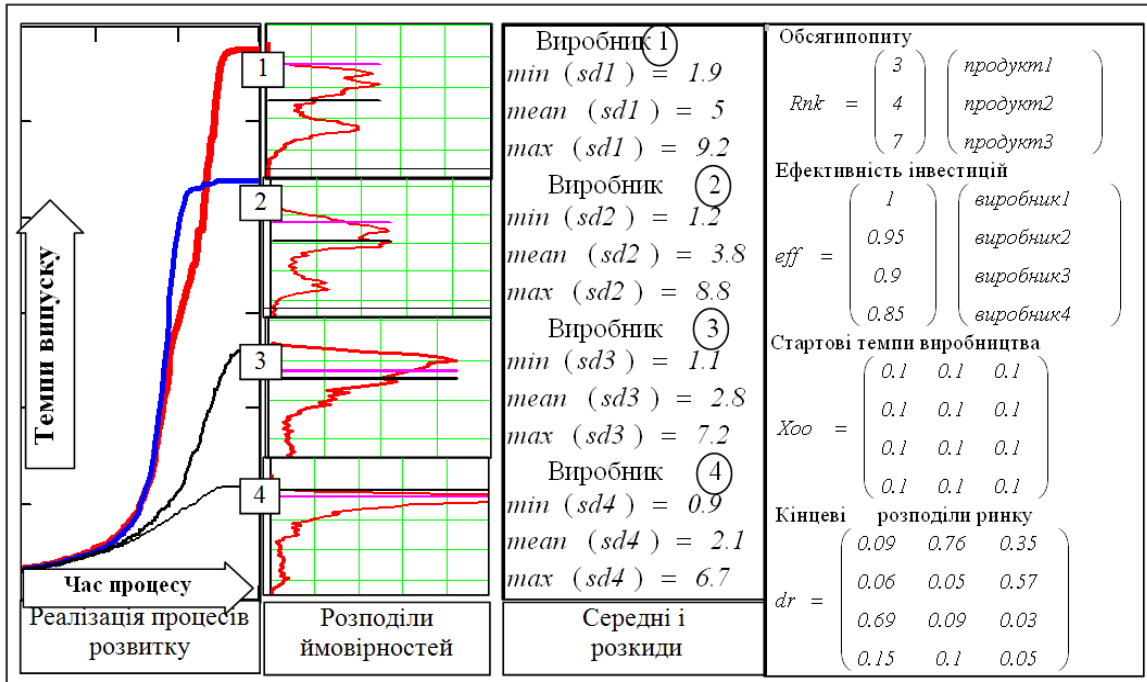


Рисунок 10 – Статистика моделі «4 виробника, 3 продукти». Вибірка 2000 прогонів

За результатами досліджень отримано три нових наукових результати: – узагальнена структура і метод локального управління в розподілених виробничих системах; – реалізації оптимального розподілу ресурсу в умовах високої невизначеності через побудову екстремальної системи з послідовно працюючими регуляторами; – концепція побудови системи моделей розвитку виробничих систем на базі 3D-декомпозиції – структурної, функціональної, редуційної.

Останній новий науковий результат є теоретичним узагальненням результатів досліджень моделей систем виробників галузі і розподілених технологічних систем. Суть результату – побудова системи моделей розвитку виробничих систем на базі 3D-декомпозиції – структурної, функціональної, редуційної, що на відміну від існуючих підходів і методів в систему моделей включаються і використовуються паралельно моделі різних структурних класів і моделі одного структурного класу, але з різними рівнями редуції (спрощення). Паралельне використання альтернативних моделей забезпечує взаємоконтроль моделей розвитку для ще не реалізованих виробничих систем та підвищення надійності прогнозування для реалізованих виробничих систем. Результат 3D-декомпозиції – багатоваріантна, надлишкова структура, що дає певне упоряд-

кування для множини моделей складної системи. Розробка нових моделей для нових задач є потужним сектором індустрії виробництва «інформаційних продуктів», що потребує раціональних структур моделей і раціональних технологій їх конструювання.

У **четвертому розділі** подано розробку і дослідження моделей функціонування і розвитку систем «виробники, продукти, користувачі» і метамоделі процесу паралельної побудови моделі виробничої системи і власне виробництва. Термін «метамодель» – поширене і багатозначне поняття. Найближчим до моделей і методів даної роботи – «орієнтованого на моделювання інжинірингу» є система UML, де введена багаторівнева система моделей – від M_0 – реальності до моделей реальності – M_1 , метамodelей першого рівня – M_2 , другого рівня – M_3 , ... В UML, число таких рівнів не обмежується. Обмеження рівнів – конструктивність, практична цінність. Сьогодні моделі є важливим «промисловим продуктом», особливо необхідним при створенні великих, складних, інноваційних систем. Комп'ютерні 3D-моделі споруд, транспортних засобів, технологічних агрегатів і збиральних цехів створюються до початку виробництва і послідовно виконують роль засобу проектування, еталону і засобу управління виробництвом, засобу тестування. Положення про створення моделі підприємства до початку створення підприємства сформульоване Дж. Форрестером в «Industrial Dynamics» поки не набуло широкого застосування.

Моделі розвитку сучасних виробництв належать до іншого класу, ніж моделі-апроксимації відображення вже існуючих реальних об'єктів або процесів. Назвемо ці класи так: дескриптивні моделі – такі, що описують існуючий реальний об'єкт; прескриптивні моделі – такі, що не тільки предписують, яким повинен, або може бути майбутній реальний об'єкт, але і дозволяють оперувати з ними як з «віртуальною реальністю» – проводити експерименти, виконувати модифікації і так набирати «віртуальну статистику». Ці два класи мають суттєво відмінні процеси їх побудови. Назвемо ці процеси метамоделями.

Стосовно тематики даної роботи метамодель процесу розвитку виробничих систем визначена як модель процесів сумісного розвитку створюваної виробничої системи і створюваної моделі цієї виробничої системи. В розділі створена і досліджена абстрактна агрегована метамодель, і комплекс моделей функціонування і розвитку системи «виробники, лінійка продуктів, користувачі» (*НМК-модель*). Саме для такої багатовимірної нелінійної нестационарної системи потенційно корисною є реалізація метамоделі: *НМК-модель* є головним елементом системи управління виробництвом, а інформація про стан виробництва і потреб використовується для корекції *НМК-моделі*. Ця задача вирішена завдяки результатам досліджень в попередніх розділах: – методології оптимального агрегування для однокрокових і багатокрокових задач; класифікаційній структурі для *НМ-моделей*; – розробки системи робочих моделей класу «виробники, продукти виробництва».

НМК-моделі мають на порядки більшу розмірність порівняно з моделями розділів 2 і 3. Це спричинило необхідність пошуку ефективних структур операндів і операторів різницевого рівняння динаміки систем. Створено оператори перетворення стану як узагальнення відомих дискретних моделей динаміки:

– лінійна система, де стан об'єкту і управління задаються векторами:

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + B \cdot u_k, \quad (32)$$

– адитивна нелінійна система, стан об'єкту задається матрицею, а оператор переходу дає прирощення стану:

$$Ms_{k+1} = Ms_k + Ud(Ms_k, dMs_k), \quad (33)$$

– нелінійна система, стан об'єкту задається структурою, елементи якої можуть бути векторами, матрицями, а оператор переходу дає наступний стан:

$$Msd_{k+1} = Op(Msd_k, U_k, P), \quad (34)$$

де в (32 – 34) x_k, u_k – вектори стану і управління, A, B – відповідні матриці, Ms_k – матриця стану, елементами якої можуть бути вектори, матриці, dMs_k – прирощення матриці стану за крок квантування, $Ud(\cdot)$ – оператор управління, $Op(\cdot)$ – оператор, що бере: dMs_k – поточний стан, U_k – поточне управління, P – вектор параметрів і повертає наступний стан об'єкту Msd_{k+1} .

подаємо моделі у двох формах: в інтегральній і в прирощеннях. Матрична модель:

$$xm_{k+1} = Fm1(xm_k, um_k, vm_k); \quad xm_{k+1} = xm_k + Fm2(xm_k, um_k, vm_k) \cdot \Delta t. \quad (35)$$

Узагальнена матрична модель для імітаційної моделі класу *NMK* з тривіірними структурами стану – "інформаційними кубами", що мають координати "виробник, продукт, користувач":

$$xkb_{k+1} = Fm3(xkb_k, ukb_k, vkb_k); \quad xkb_{k+1} = xkb_k + Fm4(xkb_k, ukb_k, vkb_k) \cdot \Delta t. \quad (36)$$

Згідно (35, 36) розроблено моделі виробництва і розвитку систем виробників, систем виробників з урахуванням поведінки користувачів, виробництва лінійки продуктів, забезпечення стохастичних потоків потреб, урахуванням процесів освоєння виробництва і «навчанням» користувачів вибору продуктів виробництва.

Важлива особливість процесів паралельного створення виробничої системи і моделі цієї системи – створення моделі ВС на базі неповної інформації про об'єкт, і одночасно відсутність задовільної моделі-предиктора для управління процесом функціонування і розвитку ВС. Виникає необхідність раціонального управління процесом розвитку системи «виробнича система + модель виробничої системи». Така задача не нова – прискорення індустріального розвитку і поява перших «великих ЦВМ» стимулювала дослідження по створенню «кібернетичної корпорації», де в контур управління включається модель цієї корпорації. Така модель повинна постійно відсліджувати всі зміни об'єкта – корпорації. Одна з гілок досліджень в цьому напрямку – «експертні системи». Однак цей напрямок застиг у розвитку не через дефіцит обчислювальних потужностей, а через відсутність цілісної методології створення математичних моделей функціонування і розвитку виробничих систем. Досліджені в цій роботі методологія оптимального агрегування і трирівнева декомпозиція математич-

них моделей складних систем використані для побудови агрегованої метамоделі. На рис. 12 подано схему інформаційних зв'язків в системі «модель виробничої системи, виробнича система» і результат моделювання сумісного розвитку моделі ВС і ВС.

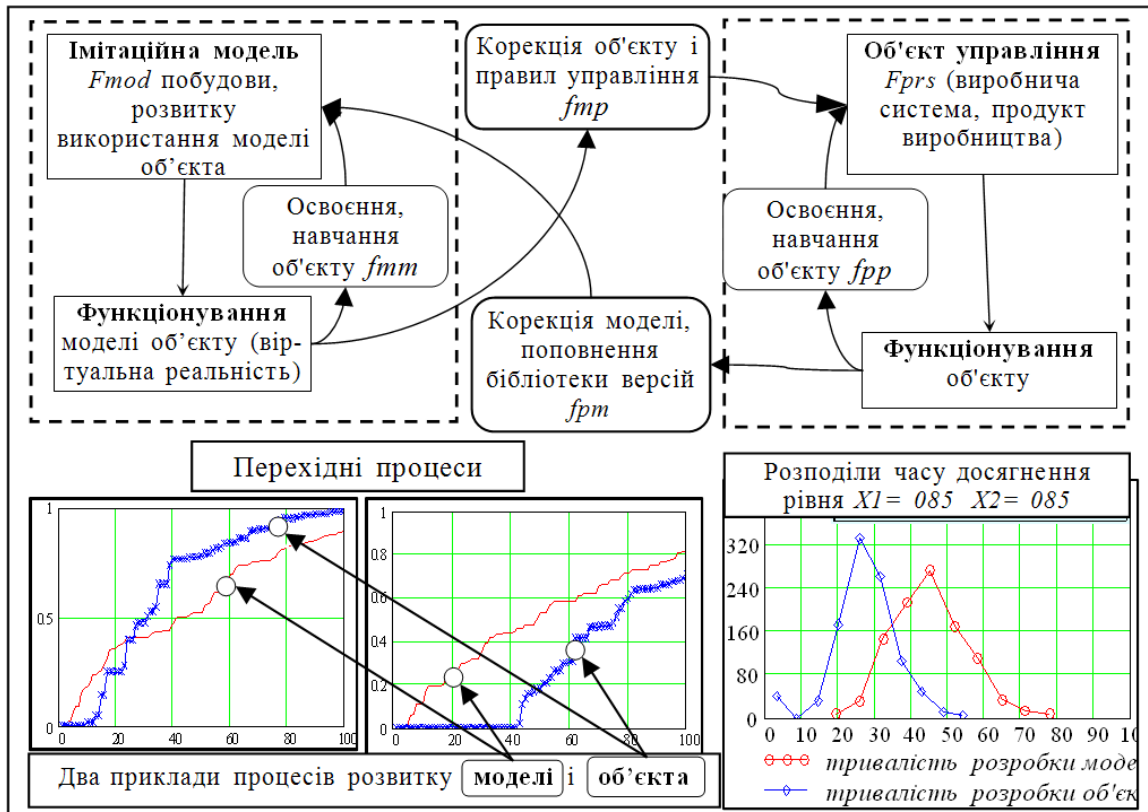


Рисунок 11 – Побудова метамоделі «модель – об'єкт»

Згідно інформаційним зв'язкам на рис. 11 і доступній загальній інформації та статистиці процесів функціонування і розвитку фірм, корпорацій, робіт з технологічного прогнозування виконано: – вибір ефективних змінних для агрегованої моделі; – розробку схеми системи з нелінійними, нечіткими і стохастичними зв'язками; – побудову стохастичних моделей розвитку моделі ВС і об'єкта – функцій F_{mod} , F_{prs} ; – побудову моделей інформаційних зв'язків – функцій f_{mm} , f_{pp} , f_{pm} , f_{mp} (рис. 11); – побудову робочих моделей процесів розвитку і віртуальної статистики процесів.

Вибрано такі змінні стану агрегованої метамоделі: $x_1(t)$ – рівень задовільності моделі нормований $0 \geq x_1(t) \leq 1$; $x_2(t)$ – рівень готовності виробництва нормований $0 \geq x_2(t) \leq 1$. Визначено функції зв'язків: $f_{mm}(x_1(t))$ – функція впливу поточного рівня задовільності моделі на темп росту задовільності моделі; $f_{pm}(x_2(t))$ – функція впливу рівня готовності виробництва на темп росту задовільності моделі; $Inm(t)$ – темп витрат на розробку моделі; $f_{pp}(x_1(t))$ – функція впливу поточного рівня готовності виробництва на темп росту готовності виробництва; $f_{mp}(x_2(t))$ – функція впливу задовільності моделі на темп готовності виробництва; $Inp(t)$ – темп витрат на створення виробничої системи.

Запишемо дискретизовану модель розвитку системи «ВС, модель ВС»:

$$x1_{k+1} = x1_k + F \bmod(x1_k, x2_k, fmm, fpm, VPm) \cdot \Delta t, \quad (37)$$

$$x2_{k+1} = x2_k + Fprs(x1_k, x2_k, fpp, fmp, VPP) \cdot \Delta t, \quad (38)$$

де VPm, VPP – вектори параметрів моделі ВС і ВС, $F \bmod(x1_k, x2_k, fmm, fpm, VPm)$, $Fprs(x1_k, x2_k, fpp, fmp, VPP)$ – функції користувача розвитку моделі і виробничої системи, що визначаються в середовищі пакета для моделювання, функції зв'язків fmm, fpm, fpp, fmp теж визначаються в середовищі пакету як функції користувача і можуть бути подані в (37), (38) в скороченому виді. В одній з версій робочої моделі в середовищі Mathcad, функції користувача формуються як залежності від параметрів функцій зв'язків, як у наступному фрагменті моделі:

$$\left\| \begin{array}{l} \text{for } k \in 1..Td \\ \left\| \begin{array}{l} x1_{k+1} \leftarrow x1_k + F \bmod p(x1_k, x2_k, kz1, kz2, vpF1, vpF2, um) \cdot \Delta T \\ x2_{k+1} \leftarrow x2_k + Fprsp(x1_k, x2_k, kz3, kz4, vpF3, vpF4, up) \cdot (k > 10) \cdot \Delta T \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (39)$$

Такі параметризовані версії метамоделі дозволяють відтворювати можливі інформаційні ситуації при зміні обсягів даних по об'єкту – виробничій системі. Дані стосовно параметрів моделі виробництва отримуються при документуванні витрат часу на розробку і моделювання. Розробка і дослідження версій моделей класів $1M, N1, NM, NМК$ дала достатній обсяг даних для побудови метамоделі, що може бути модулем для підтримки прийняття рішень. Розробка робочих моделей робить конструктивною орієнтацію на активне прогнозування, тобто не тільки на прогнози майбутнього на базі статистики минулого, але і на пошук задовільних і безпечних варіантів розвитку системи на імітаційних моделях. Виконано теоретичне узагальнення представлених в розділі математичних моделей систем «виробники, продукти, користувачі», моделей розподілених продуктів – «лінійок продуктів» і метамоделей сумісного розвитку виробничої системи та її моделі, як декомпозиційної структури на базі структурної, функціональної і редуційної декомпозицій.

У **п'ятому розділі** подано результати практичного застосування теоретичних результатів дослідження. На рис.12 подано таблицю характеристик розробленої цілісної системи моделей функціонування і розвитку виробничих систем. Стовпці таблиці на рис. 12 відповідають вимогам, поставленим в задачах даної роботи до моделей. Проблеми розмірності («швидкодія, збіжність») задач моделювання і оптимізації виробничих систем усунуті використанням методології оптимального агрегування і декомпозиційного підходу. Суттєва перевага розроблених моделей відносно аналогів – відсутність обмежень на функції виробництва і розвитку – обумовлена декомпозицією багатовимірних задач оптимізації в систему одновимірних задач. В розроблених моделях користувач має доступ саме до математичних моделей, що забезпечує ефективний розвиток моделі. Методологія оптимального агрегування, декомпозиційна структура моделей і комплекс сервісних програм аналізу процесів створюють можливість вбудованої параметричної ідентифікації. Моделі мають широкий спектр інтерпретацій: від великих виробничих і енергетичних систем до малих фірм, систем технологічних агрегатів, локальних комп'ютерних мереж. Моделі можуть вбу-

довуватись в контури автоматизованого управління, бути модулями систем підтримки рішень і придатні для навчання, орієнтованого на створення робочих моделей.

Модель функціонування - однокрокова задача (задача нелінійного програмування)			
Швидкодія, збіжність Лінійна залежність обчислювальних витрат від розмірності. Гарантовані результати за рахунок декомпозиції в систему одновимірних задач.	Обмеження на класи функцій Нестрого позитивні і монотонні, обмежені. Відсутність обмежень випуклості, гладкості, неперервності.	Модифікація і контроль Можливість неперервних змін користувачем: структурні і редуційні версії забезпечують контроль.	Ідентифікація Структура моделі дозволяє неперервно коректувати ФВ та ФР за даними «ресурси – продукти» об'єкта
Модель розвитку - багатокрокова задача, варіаційна задача			
Швидкодія, збіжність Лінійна залежність обчислювальних витрат від розмірності задач. Гарантовані результати за рахунок двох систем одновимірних задач.	Обмеження на класи функцій Нестрого позитивні і монотонні, обмежені. Відсутність обмежень випуклості, гладкості, неперервності.	Модифікація і контроль Можливість неперервних змін через доступ користувача до математичних моделей, контроль.	Ідентифікація Структура моделі дозволяє неперервно коректувати ФВ та ФР і обчислювати нову оптимальну стратегію.
НМК -моделі функціонування і розвитку (системи виробників)			
Швидкодія, збіжність На звичайному ПК потрібно 1-3 хвилини на прогон системи: 100 виробників, 20 продуктів, 1000 користувачів за рахунок векторизації.	Обмеження на класи функцій Відсутні обмеження на вид ФВ, ФР, критеріїв і функцій параметричних зв'язків.	Модифікація і контроль Можливість змін через доступ користувача до математичних моделей. Взаємоконтроль моделей.	Ідентифікація Імітаційна модель має сервісну оболонку комплексного аналізу часових, частотних, рангових характеристик.

Рисунок 12 – Ефективність системи розроблених моделей

Головне питання при запровадженні результатів досліджень в практику – розрахунки ефективності і ризиків інновації. На рис. 13 подано два приклади розрахунку ефекту від застосування методу оптимального агрегування. Приклад 1 (рис. 13а).

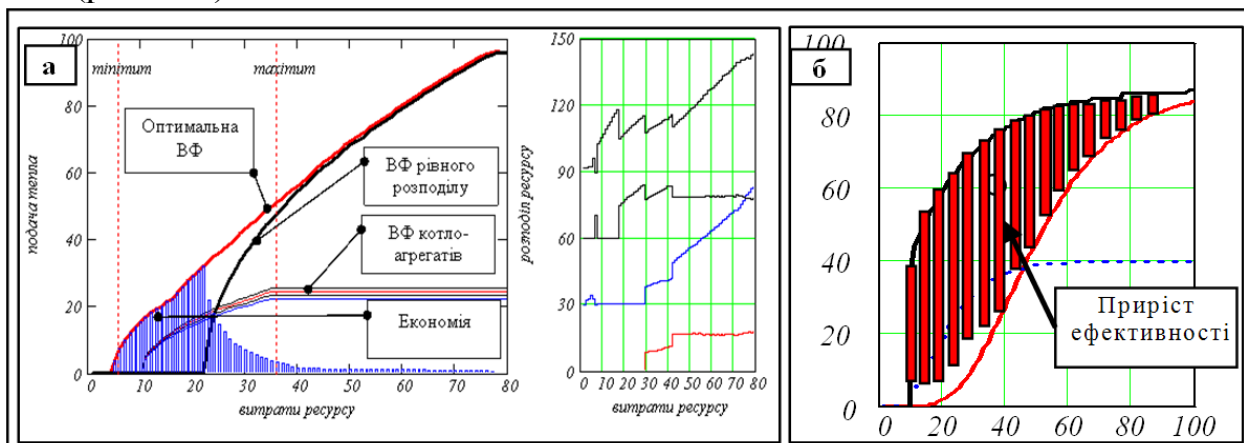


Рисунок 13 – Приклади розрахунку ефекту від застосування методу оптимального агрегування: а – підвищення ефективності системи котлоагрегатів за рахунок оптимального розподілу навантаження; б – підвищення ефективності агросистеми з БГУ за рахунок оптимального розподілу ресурсу розвитку

Підвищення ефективності системи котлоагрегатів, що постачають гарячу воду для побутових чи виробничих потреб, за рахунок оптимального розподілу навантаження. Економія витрат при навантаженнях менше номінального 3-7%. Приклад 2 (рис. 13б). Підвищення ефективності агропідприємства з системою біореакторів для переробки відходів рослинництва і тваринництва за рахунок оптимального розподілу ресурсу розвитку. Підвищення ефективності виробництва 5- 50%. Суть досить великого прирощення ефективності: повторне використання води в БГУ, переробка відходів в добрива та біогаз.

Підвищення ефективності в процесах розвитку обумовлене розподілом ресурсів виробництва і розвитку між продуктами і підрозділами виробництв за інтегральними критеріями оптимальності. Підвищення ефективності 10 -50% (кумулятивний ефект розвитку).

Запровадження результатів дослідження виконувалось в області машинобудування, багатопродуктових виробництв, агропідприємств, систем біопереробки органічних відходів.

Розробка програмних модулів для комплексної оцінки ефективності інноваційних проектів. Науково-технічний ефект: зменшення ризиків проектів розвитку виробництва, введення нових виробів і технологій. Конкретні напрямки впровадження: – нові методи побудови еквівалентних оптимальних характеристик для довільних виробничих систем; – методи моделювання процесів розвитку виробничої системи; – методика реалізації оптимального розподілу ресурсу в умовах суттєвої невизначеності. В підсумку методи і програми моделювання підвищують ефективність проектування за рахунок оперативного контролю і управління.

Розробка системи підтримки рішень з планування багатопродуктового виробництва. Об'єкти запровадження: комплекс програмно-методичного забезпечення задач оптимального управління багатопродуктовим виробництвом. Науково-технічний ефект: зменшення втрат і ризиків виробництва, оптимізація стратегій розвитку. Основні результати впровадження: методика наближеного рішення варіаційної задачі розвитку ВС, яка працездатна в умовах неповноти статистичних даних. Ефективність методики зумовлена тим, що наближення конструюються на базі фундаментальних законів для процесів виробництва і методів локального управління процесами виробництва окремих продуктів. Ефект запровадження – у зменшенні витрат і ризиків.

Розробка програмних модулів для комплексної оцінки ефективності проектів розвитку виробництва. Вид упровадженої продукції: комплекс програмних модулів для оцінки ефективності проектів розвитку виробництва. Соціальний та науково-технічний ефект підвищення ефективності проектів розвитку виробництва при заданому рівні ризиків. Основні результати впровадження: – нові методи побудови еквівалентних оптимальних характеристик для довільних структур виробничих систем; – метод оптимального агрегування для задачі моделювання розвитку виробничої системи; – методика реалізації оптимального розподілу ресурсу в умовах суттєвої невизначеності. Ці методи і програми моделювання підвищують ефективність проектування за рахунок використання оптимальних рішень.

Розробка програмних модулів для аналізу ризиків на етапах будівництва, запуску і функціонування підприємств, що включають біореакторні установки. Об'єкт запровадження – комплекс програмно-методичного забезпечення для аналізу ризиків при будівництві, запуску і функціонуванні біореакторних систем. Ефект – зменшення втрат і ризиків при будівництві та функціонуванні біореакторних систем. Ефект від використання СППР – зменшення втрат і ризиків.

У **додатках** наведено: класичні задачі розвитку і обміну – розробку робочих моделей і моделювання; робочі моделі оптимального однокрокового і багатокрокового розподілів ресурсів; робоча модель системи «виробники, продукти»; технологія створення базової версії метамоделі; аналіз адекватності розроблених моделей; приклади доведення теорем; масштабування задачі оптимального агрегування – приклади оптимізації виробничих систем великої розмірності; приклади апробації результатів роботи в Інтернеті, а також документи, що підтверджують пріоритет та впровадження.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень зроблено суттєвий внесок в розв'язанні актуальної науково-практичної проблеми відсутності методологічної основи для побудови цілісного підходу до моделювання процесів функціонування та розвитку розподілених виробничих систем, що зумовлює недостатню ефективність функціонування і розвитку таких систем, шляхом створення ефективних математичних моделей та імітаційного моделювання процесів розвитку розподілених виробничих систем. За результатами досліджень можна зробити такі висновки:

1. Виконано конструктивний (на базі комп'ютерного моделювання прототипів) аналіз стану існуючих методів створення та структур математичних моделей процесів розвитку сучасних виробничих систем, на базі якого вибрані структури виробничих систем як об'єктів управління, структури системи моделей об'єкта і декомпозиційні структури однокрокових і багатокрокових задач оптимального управління функціонуванням і розвитком виробничої системи, що дозволило сформулювати мету і задачі дослідження.

2. Вперше розроблено методологію побудови еквівалентних оптимальних елементів для паралельних, послідовних і кільцевих структур виробничих систем на базі методу оптимального агрегування, що відрізняється від існуючих методів агрегування отриманням оптимальної характеристики «вхід-вихід», а від існуючих методів оптимізації розподілу ресурсів – декомпозицією багатовимірної задачі оптимізації в послідовність одновимірних задач. Це в підсумку робить метод нечутливим до виду функцій виробництва, і малочутливим до розмірності виробничої системи, що дозволяє будувати ефективні моделі для оптимізації процесів функціонування і розвитку оптимально агрегованих виробничих систем (науковий результат №1).

3. Отримав подальший розвиток метод Беллмана отримання наближень у просторі стратегій управління для розв'язання варіаційної задачі розвитку, що відрізняється від існуючого методу тим, що варіаційна задача розвитку виробничої системи розв'язується не методом динамічного програмування, а за

принципом максимуму Понтрягіна з використанням дискретизованого гамільтоніану й уступки у максимальному значенні функціонала якості. Це дозволяє отримувати наближення оптимальної стратегії, що дають значення інтегрального критерію, яке відрізняється від оптимального щонайбільше на 3%.

4. Вперше розроблено декомпозиційну структуру і відповідний метод моделювання і оптимізації процесу розвитку виробничої системи, що відрізняється від існуючих методів тим, що розв'язання варіаційної задачі розвитку розбивається на дві послідовні задачі: – задачу заміни виробничої системи оптимальним за критерієм сумарного виробництва еквівалентним елементом (результат №1) та – варіаційну задачу розвитку для еквівалентного оптимального елемента (одновимірного об'єкту), де управління на кожному кроці процесу – розподіл ресурсу виробничої системи між накопиченням і розвитком, що дає максимум функції Гамільтона, згідно методу принципу максимуму. Це дає можливість отримувати розв'язання варіаційної задачі розвитку для розподілених виробничих систем з функціями розвитку класу «обмежені, нестрого монотонні і нестрого позитивні», а також суттєве зменшення обчислювальних витрат для розподілених виробничих систем великої розмірності (науковий результат №3).

5. Вперше запропоновано і реалізовано узагальнену структуру і метод локального управління окремим виробником в активному оточенні інших виробників певного сегменту виробництва, що відрізняється від існуючих методів декомпозицією процесу управління на такі кроки: – визначення пропорції розподілу ресурсу виробничої системи між частками на ризикове і детерміноване управління; – розподілу цих часток між виробництвами окремих продуктів. Запропонований метод локального управління є узагальненням – змішаною стратегією на базі відомих детермінованих та імовірнісних методів, що дає: – можливість адаптації локального управління станом сегмента виробництва до невизначеностей стану виробництва, потреб, появи нових технологій; – можливість імітації управління окремим виробником сегменту за рахунок доступної статистики і побудови імітаційної моделі системи виробників для реалізації нового підходу «один на фоні всіх» до оцінки ризиків певного виробника з урахуванням імітації дій інших виробників (науковий результат №4).

6. Отримав подальший розвиток метод реалізації оптимального розподілу навантаження у виробничих системах з паралельно працюючими елементами в умовах високої невизначеності за допомогою екстремальної адаптивної системи, що відрізняється від існуючих методів оптимального адаптивного управління використанням послідовно працюючих регуляторів: – стабілізації навантаження виробничої системи і мінімізації витрат виробництва, де перший регулятор крім стабілізації навантаження генерує тестові дані для другого регулятора, що перерозподіляє навантаження для мінімізації витрат виробництва. Запропонований метод дає можливість забезпечити задовільну роботу виробничої системи при нелінійностях функцій виробництва елементів з класу нестрого монотонних і нестрого позитивних функцій (науковий результат №5).

7. Вперше запропонована і реалізована концепція побудови системи моделей виробничої системи на базі трирівневої декомпозиції – структурної, функціональної, редуційної, що відрізняється від існуючих підходів і методів декомпозиції моделей виробничих систем тим, що кожний елемент системи моде-

лей є результатом застосування трьох відповідних операцій декомпозиції моделі різних структурних класів, з різними рівнями редукції (спрощення). Паралельне використання альтернативних моделей в регуляторах, ідентифікаторах, предикторах подібно неідентичному резервуванню в технічних системах підвищує ефективність і надійність. Запропонована декомпозиційна структура дозволяє формалізувати процес побудови моделей виробничих систем, що тільки створюються (науковий результат №6).

8. Вперше запропонована, реалізована і досліджена концепція метамоделі – математичної моделі спільного розвитку системи: «нова виробнича система та імітаційна модель цієї системи», що відрізняється від існуючих підходів і методів: – формуванням імітаційної моделі на базі трирівневої декомпозиції (результат № 6); – двостороннім інформаційним обміном «об’єкт – модель»; – урахуванням дуальності цільового призначення моделі виробничої системи: як відображення суттєвих властивостей об’єкту; як еталону об’єкту і засобу отримання знань та досвіду для управління функціонуванням і розвитком об’єкта. Запропонована метамодель в загальнотеоретичному аспекті є розширенням концепції спостерігача стану на систему з двох нелінійних і нестационарних об’єктів, що дає можливість для переходу від евристичних методів розробки моделей до ефективних формалізованих процедур (науковий результат №7).

9. Вперше запропонована, реалізована і досліджена система імітаційних моделей «виробники, продукти, користувачі», де може бути відтворена поведінка (динаміка) кожного елемента кожного з класів «виробники», «продукти виробництва», «користувачі», що відрізняється від існуючих аналогів, тим, що системі складають моделі «виробники», «продукти», «користувачі» з різними рівнями агрегування (науковий результат №1), різними методами локального управління (науковий результат №4) і різними рівнями спрощення (науковий результат №6). Альтернативні моделі є сумісними за вхідними і вихідними змінними, що дає можливість порівнювати результати моделювання за альтернативними моделями (науковий результат №8).

10. Практична цінність результатів роботи полягає у тому, що на основі розроблених концепцій, теоретичних засад, математичних моделей і методів створені нові методи і алгоритми. Створені на базі теоретичних результатів алгоритми і програми моделювання оптимальних процесів розвитку дозволяють підвищити ефективність автоматизованих систем управління розподіленими виробничими системами; – усі розроблені моделі реалізовано як комплекс програм для досліджень актуальних практичних задач прогнозування, планування і вбудовування в автоматизовані системи, що у підсумку дозволяє отримувати оптимальні стратегії розвитку та досліджувати їх чутливість до варіацій параметрів. Практичні результати дисертаційних досліджень впроваджено на підприємстві ТОВ „КСК–Автоматизація”, ТОВ фірма «Радіо», ОАО «Салют», Самара, ООО «Агробіогаз», Санкт Петербург, ЗАО «Addeco», Литва, ТОВ «Пфаннер Бар». Впровадження результатів дослідження підтверджено відповідними актами. Також результати, отримані в дисертаційній роботі, стали основою для шести посібників і використовуються в навчальному процесі у Вінницькому національному технічному університеті.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Боровська Т. М. Метод оптимального агрегування в оптимізаційних задачах: монографія / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2009. – 229 с. – ISBN 978–966–641–285–3.

2. Боровська Т. М. Моделювання і оптимізація процесів розвитку виробничих систем з урахуванням використання зовнішніх ресурсів та ефектів освоєння: монографія / [Т. М. Боровська, С. П. Бадьора, В. А. Северілов, П. В. Северілов]; за заг. ред. Т. М. Боровської. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 255 с. – ISBN 978–966–641–312–6.

Статті у фахових виданнях України

3. Боровська Т.М. Альтернативні моделі оптимального розвитку виробничих систем в умовах невизначеності / Т. М. Боровська, П. В. Северілов, Є. П. Хомин // Системні дослідження та інформаційні технології (Інститут прикладного системного аналізу НАН України та Міносвіти і науки України). – 2014. – № 4. – С. 121–136. ISSN 1681-6048.

4. Боровська, Т. Н. Оптимальне агрегування виробничих систем з параметричними зв'язками [Текст] / Т. Н. Боровська // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 4, № 11(70). – С. 9-19. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26306.

5. Боровська Т. М. Моделі оптимального інноваційного розвитку виробничих систем / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов, П. В. Северілов // Східно-Європейський журнал передових технологій: Математичне та інформаційне забезпечення комп'ютерно-інтегрованих систем управління. – 2014. – Т. 5, № 2(71). – С. 42–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28030.

6. Боровська Т. М. Оптимальне агрегування систем зі стохастичними функціями виробництва / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, П. В. Северілов, А. О. Маліночка // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – 2014. – № 792. – С. 41-52. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPT_2014_792_10.pdf

7. Боровская Т. Н. Оптимальное агрегирование интегрированных систем "производство-развитие" / Т. Н. Боровская, И. С. Колесник, В. А. Северилов, И. В. Шульган // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2014. № 2.(30) – С. 18–28. ISSN 1999-9941.

8. Боровська Т. М. Моделі ефективності і живучості технічних систем / Т. М. Боровська, Е. П. Хомин, П. В. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 1. – С. 89–95.

9. Боровська Т.М. Оптимізація управління інноваційним розвитком при невизначеностях / Т. М. Боровська, Г. Ю. Дерман // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 141–147.

10. Боровська Т. М. Узагальнення методу оптимального агрегування виробничих систем з довільними структурами [Електронний ресурс] / Г. Ю. Дерман, Т. М. Боровська, П. В. Северілов // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 4. – Режим доступу до журн.:

<http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011-4/2011-4.html>.

11. Боровська Т. М. Оптимізація управління розподіленим об'єктом «лінійка продуктів» [Електронний ресурс] / Е. П. Хомин, Т. М. Боровська, С. П. Бадьора // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 3. – Режим доступу до журн.:

<http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011-3/2011-3.html>.

12. Боровська Т. М. Прогнозування розвитку складних систем на базі імітаційних моделей [Електронний ресурс] / Т. М. Боровська, В. М. Кичак, М. В. Васильська // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 2. – Режим доступу до журн.:

<http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011-2/2011-2.html>.

13. Боровська Т. М. Розробка системи оптимального управління розвитком за наявності невизначеностей [Електронний ресурс] / Г. Ю. Дерман, Т. М. Боровська, В. А. Северілов // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 1. – Режим доступу до журн.:

<http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2011-1/2011-1.html>.

14. Боровська Т. М. Розробка моделей узагальнених систем "виробники – продукти – споживачі" [Електронний ресурс] / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов, І. І. Михайлова // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 1. – Режим доступу до журн.:

<http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2010-1/2010-1.html>.

15. Боровська Т. М. Моделювання розвитку підприємства "на фоні" підприємств і споживачів сегменту ринку / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 1. – С. 21–27.

16. Боровська Т. М. Моделювання і оптимізація систем виробництва біогазу [Електронний ресурс] / Т. М. Боровська, П. В. Северілов // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 2. – Режим доступу до журн.:

<http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-2/2009-2.html>.

17. Боровська Т. М. Створення метамоделей складних систем на базі методу структурно-функціонально-редукційної декомпозиції / Т. М. Боровська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 111–119.

18. Боровська Т. М. Структура і функції сучасного мультимедійного посібника. Орієнтація на моделювання / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 3. – С. 62–69.

19. Боровська Т. М. Детермінована модель для прогнозування розвитку розподілених систем / С. П. Бадьора, Т. М. Боровська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 2. – С. 41–54.

20. Боровська Т. М. Імовірнісна модель для прогнозування розвитку розподілених систем / С. П. Бадьора, Т. М. Боровська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 1. – С. 45–61.

21. Боровська Т. М. Оптимальна система управління запасами при невизначеності попиту / Т. М. Боровська, А. С. Васюра, П. В. Северілов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 1. – С. 113–118.

22. Боровська Т. М. Оптимальне управління розвитком багатопродуктової системи на базі метода агрегування / Т. М. Боровська, І. С. Колесник // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2005. – № 3 – С. 113–119.
23. Боровська Т. М. Оптимізація розподілу обмеженого ресурсу у виробничій системі на базі агрегування виробничих функцій / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2005. – № 1 – С. 12–18.
24. Боровська Т. М. Адаптивна система для оптимального розподілу навантаження між хімічними реакторами / Т. М. Боровська, А. С. Васюра, І. С. Колесник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 41–46.
25. Боровська Т. М. Оптимізація стратегій розвитку розподілених виробничих систем на базі агрегування виробничих функцій / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5. – С. 88–94.
26. Боровська Т. М. Моделі і методи для аналізу і оптимізації інвестиційних проектів / І. С. Колесник, Т. М. Боровська, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 4. – С. 56–61.
27. Боровська Т. М. Моделі обміну ресурсами в системах з асиметричною інформаційною структурою / Т. М. Боровська, С. П. Бадьора, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 2. – С. 76–81.
28. Боровська Т. М. Моделювання багатопродуктових виробничих систем / Т. М. Боровська, С. П. Бадьора, В. А. Северілов, І. С. Колесник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 1. – С. 48–54.
29. Боровська Т. М. Моделювання банківської системи / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов, П. В. Северілов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2004. – № 1. – С. 53–61.
30. Боровська Т. М. Оптимальне управління розвитком техніко-економічних систем. Кредитні стратегії / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 6. – С. 173–180.
31. Боровська Т. М. Оптимальне управління розвитком техніко-економічних систем. Цінові стратегії / Т. М. Боровська, С. П. Бадьора, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 6. – С. 143–150.
32. Боровська Т. М. Нечітка оптимізація розподілу обмеженого ресурсу у виробничій системі з неопуклими виробничими функціями елементів / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 5. – С. 36–41.
33. Боровська Т. М. Система для моделювання довільних ринків / Т. М. Боровська, С. П. Бадьора, Т. В. Січко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – № 6. – С. 72–77.
34. Боровська Т. М. Принципи побудови модульних мехатронних систем / В. А. Северілов, Т. М. Боровська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 3. – С. 22–28.

35. Боровська Т. М. Використання декомпозиційних структур для синтезу регуляторів / Т. М. Боровська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 1. – С. 5–14.

36. Боровська Т. М. Проблеми розробки адаптивних САУ для масових об'єктів / Т. М. Боровська, В. А. Северілов, А. С. Васюра // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 5. – С. 13–20.

Статті у закордонних виданнях (журналах, збірниках тощо)

37. Borovska T.N. Modeling and optimization of agrarian systems with waste recycling in bioreactors / P. V. Severilov., T. N. Borovska, Yu.N. Dmytryk, E. P. Khomyn // Nauka i studia (Poland). – 2014. – № 16 (126). – P. 42–50. – ISSN 1561-6894.

38. Боровская Т. Н. Анализ чувствительности производственных функций оптимально агрегированных систем / Т. Н. Боровская, Ю. Н. Лазарев // Вестник Самарского муниципального института управления (Россия). – 2014. – № 4 (31). – С. 26 – 37. – ISSN 2071-9558.

39. Боровская Т. Н. Разработка оператора оптимального агрегирования для систем со стохастическими функциями производства / Т. Н. Боровская, И. С. Колесник, П. В. Северилов, А. А. Малиночка // Современный научный вестник (Россия). – 2014. – № 27 (223). – С. 5–11. – ISSN 1561-6886.

40. Borovska T. N. Constructing of innovative development models / T. N. Borovska // Матеріали за VII міжнародна научна практична конференція «Научний потенціал на світа – 2011», Софія (България). – 17.09 – 25.09.2011. – Софія: «Бял ГРАД–БГ» ООД, 2011. – Том 9. Технологии. Съвременни технологии на информации. – С. 46 – 50.

41. Боровская Т. Н. Конструирование моделей развивающихся систем / Т. Н. Боровская // Materialy VI miedzynarodowej naukowí–praktycznej konferencji «Stosowane naukowe opracowania – 2010», Praha (Ceska). – 27.07 – 05.08.2010. – Przemysl: Nauka i studia, 2010. – Volume 8. – Str. 7 – 12.

42. Боровская Т. Н. Декомпозиционный подход к анализу эффективности и живучести технических систем / Т. Н. Боровская // Materialy VI miedzynarodowej naukowí–praktycznej konferencji «Dynamika naukowych badan – 2010», Przemysl (Polska). – 07.07 -15.07.2010. - Przemysl: Nauka i studia, 2010. - Volume 10 - Str.17- 22.

43. Боровська Т. М. Конструирование имитационной модели для системы мобильной связи / М. В. Васильская, Т. Н. Боровская, В. А. Северилов // Матеріали за VI міжнародна научна практична конференція «Динамиката на съвременната наука – 2010», Софія (България). – 07.07 – 15.07.2010. – Софія: «Бял ГРАД–БГ» ООД, 2010. – Том 9. – С. 49 – 53.

44. Borovska T. Expert system for forecasting development sociotechnical and economic systems / T. Borovska, M.Vasilskaya, V. Severilov//Internet – Education – Science: Forth International Conf. Vinnytsa, September 28 – October 16, 2004. – Baku (Azerbaijan) – Vinnytsia (Ukraine) – Veliko Turnovo (Bulgaria). – 2004. – Vol. 2. – P. 517–521.

45. Borovska T. Management of projects for development of new manufactures. Program complex for remote education / I. Kolesnik, T. Borovska,

V. Severilov // Internet – Education – Science: Forth International Conf. Vinnytsia, Septmber 28 – October 16, 2004. – Baku (Azerbaijan) – Vinnytsia (Ukraine) – Veliko Turnovo (Bulgaria). – 2004. – Vol. 1. – P. 259–263.

46. Borovska T. New information technologies of a system building of decisions supporting. Modelling of the markets with asymmetric information structure / T. Borovska, P. Severilov, V. Krasilenko // Internet – Education – Science: Forth International Conf. Vinnytsia, Septmber 28 – October 16, 2004. – Baku (Azerbaijan) – Vinnytsia (Ukraine) – Veliko Turnovo (Bulgaria). – 2004. – Vol. 2. – P. 525–529.

Тези доповідей

47. Borovska T. Optimization of agricultural enterprises based on the methodology of optimal aggregation / T. Borovska, I. Shulgan // Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference "Computer science and information technologies" CSIT'2015, Lviv, Ukraine, 14-17 September 2015. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2015. – P. 206-209. – ISBN 978-617-607-815-9.

<http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=csit-2015>

48. Боровська Т. М. Рішення задач управління виробничими системами на базі алгебри оптимального агрегування / Т. М. Боровська // Матеріали XXII міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика 2015», м. Одеса, Україна, 10-11 вересня 2015 року. – Одеса: ТЕС. – 2015. – С. 59–60. – ISBN 978-617-7337-05-7.

49. Боровська Т. М. Методологія оптимального агрегування для розподілених технологічних систем / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика/Automatics – 2012», м. Київ, 26-28 вересня 2012 року. – К: НУХТ, 2012. – С. 69.

50. Боровська Т. М. Аналіз альтернативних моделей розвитку в умовах невизначеностей / Т. М. Боровська, В. М. Дубовой // Тези доповідей XI міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2012)», м. Вінниця, 9-11 жовтня 2012 року. – Вінниця: ВНТУ. – 2012. – С. 230.

51. Боровська Т. М. Технологія аналізу ризиків розвитку виробничих систем на базі імітаційних моделей / Т. М. Боровська, Г. Ю. Дерман // Автоматика – 2010: 17 міжнародна конференція з автоматичного управління: тези допов. – Харків: ХНУРЕ. – 2010. – С. 100–101.

52. Боровская Т. Н. Декомпозиционные методы конструирования рабочих моделей процессов инновационного развития. / Т. Н. Боровская // Збірник матеріалів VI міжнародної конференції "Інтернет–Освіта–Наука–2008", ІОН–2008. Том 1. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – С. 227–232.

53. Боровська Т. М. Створення метамоделей складних систем на базі методу структурно–функціонально–редукційної декомпозиції [Електронний ресурс]: матеріали ІХ міжн. Конф. КУСС–2008 / Т. М. Боровська // . Вінниця. – 2008. – Режим доступу до журн.:

http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2008/ukr/abstracts_UA.html

АНОТАЦІЯ

Боровська Т. М. Методологічні основи створення математичних моделей розвитку розподілених виробничих систем. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи. — Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2016.

В дисертації вирішується науково-прикладна проблема підвищення ефективності функціонування і розвитку розподілених виробничих систем шляхом створення ефективних математичних моделей і моделювання процесів функціонування та розвитку виробничих систем. Сучасні виробничі системи характеризуються: великим числом нелінійних і нестационарних зв'язків, динамічністю технологій, продуктів виробництва і показників ефективності. У виробничих системах одночасно проходять процеси оптимізації міжнародного розподілу виробництва і локалізації виробництв, переходу до «регіонального самозабезпечення». В роботі запропоновані і теоретично обґрунтовані нові моделі і методи для однокрокових і багатокрокових задач оптимального управління функціонуванням і розвитком виробничих систем на базі методології оптимального агрегування. Сформована алгебра оптимального агрегування з операндами — функціями виробництва і розвитку, бінарними операторами оптимального агрегування паралельних, послідовних, кільцевих та ін. структур зв'язків між виробничими елементами. Обґрунтована можливість декомпозиції багатовимірних задач нелінійного програмування в систему одновимірних задач оптимізації. Використання методу прямого перебору для одновимірних задач знімає обмеження на вид функцій виробництва і усуває проблеми багатовимірної оптимізації. Доказана теорема про ізоморфне відображення структури ресурсних зв'язків виробничої системи в бінарне дерево оптимального агрегування, що дозволило алгебраїзувати рішення однокрокових задач оптимізації виробничих систем. Доказана теорема про еквівалентну заміну багатовимірної моделі виробничої системи оптимально агрегованою моделлю в варіаційній задачі оптимального розвитку, що дозволило алгебраїзувати рішення варіаційної задачі розвитку. Вперше отримані рішення для оптимального агрегування типових структур виробничих систем з параметричними зв'язками: «виробництво, розвиток», «виробництво, розвиток, інновації», «виробництво з переробкою відходів». Запропоновано, досліджено і реалізовано системою моделей «виробники, продукти, споживачі» рішення проблеми аналізу ризиків виробничих систем, згідно якому моделюються процеси функціонування і розвитку сегменту виробництва, в якому знаходиться виробнича система, що досліджується. Проаналізовані питання отримання даних для моделей і оцінки коректності даних. Вперше розроблена метамодель процесу сумісного розвитку системи: «модель розвитку виробництва, виробництво». Виконані дослідження перехідних процесів і частотних розподілів в метамоделі. Практичні результати роботи - комплекс програмного забезпечення для моделювання і оптимізації, використані в навчальному процесі та на підприємствах і організаціях — в рамках договорів.

Ключові слова: виробнича система, функція виробництва, оптимальне агрегування, алгебра, бінарний оператор, оптимізація, декомпозиція, ризики, моделювання.

АННОТАЦИЯ

Боровская Т. Н. Методологические основы создания математических моделей развития распределенных производственных систем. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 — математическое моделирование и вычислительные методы. — Винницкий национальный технический университет, Винница, 2016.

В диссертации решается научно-прикладная проблема повышения эффективности функционирования и развития распределённых производственных систем путём создания эффективных математических моделей и моделирования процессов функционирования и развития таких систем. Современные производственные системы характеризуются: большим числом нелинейных и нестационарных связей, динамичностью технологий, продуктов производства и показателей эффективности. В производственных системах одновременно проходят процессы оптимизации международного разделения производства и локализации производств, переходу к «региональному самообеспечению». В работе предложены и теоретически обоснованы новые модели и методы для одношаговых и многошаговых задач оптимального управления функционированием и развитием производственных систем на базе методологии оптимального агрегирования, суть которой – представление всех элементов и подсистем как технологических преобразователей ресурса в продукт и замена многомерной модели производственной системы оптимальной эквивалентной функцией производства системы в целом. Сформирована алгебра оптимального агрегирования с операндами – функциями производства и развития, и бинарными операторами оптимального агрегирования параллельных, последовательных, кольцевых и др. структур ресурсных связей между производственными элементами. Ассоциативность операторов оптимального агрегирования позволила выполнить декомпозицию многомерной оптимизационной задачи нелинейного программирования в систему одномерных задач оптимизации. Использование метода прямого перебора для одномерных задач снимает ограничения на вид функций производства, кроме нестрогой монотонности, и устраняет проблемы поисковой многомерной оптимизации. Доказана теорема об изоморфном отображении структуры ресурсных связей производственной системы в бинарное дерево оптимального агрегирования, что позволило алгебраизовать решение одношаговых задач оптимизации производственных систем. Вычислительные затраты с ростом размерности растут приблизительно линейно. На базе результатов в оптимальном агрегировании производственных систем предложен и обоснован эффективный метод решения вариационной задачи развития производственной системы. Доказана теорема об эквивалентной замене многомерной модели производственной системы оптимально агрегированной эквивалентной моделью в вариационной задаче оптимального развития, в результате чего выполнена декомпозиция многомерной вариационной задачи на задачу оптимального агрегирования производственной системы и вариационную задачу для одномерного объекта, представленного эквивалентной оптимальной функцией производства и развития. Впервые получены и исследованы решения задач оп-

тимального агрегирования типовых структур интегрированных производственных систем с параметрическими связями: «производство, развитие», «производство, развитие, инновации», «производство с переработкой отходов в ресурсы и продукты». Предложен и реализован подход «один на фоне всех» для анализа рисков производства некоторого производителя в активном окружении других производителей сегмента производства и потребителей. Для типичного случая существенных неопределённостей на основе обобщения эмпирических данных о реальных методах управления производством в активном окружении предложен метод локального управления, включающий «пропорциональную» детерминированную компоненту и «бонусную» - рисковую, где веса компонент зависят от уровня неопределённости. Разработана система имитационных моделей классов «производители – продукты производства», «производители, продукты производства, потребители», «производители, линейка продуктов, потребители». Разработана модель линейки продуктов одного назначения, но с различными ценами и ценностями, и модель многократного выбора с обучением для потребителя на множестве продуктов. Высокая вычислительная эффективность моделей позволила получить статистику «виртуальной реальности» – эмпирические частотные и ранговые распределения для производителей и продуктов производства на выборках до 3000 прогонов программы моделирования. Модели систем производителей воспроизводят наблюдаемые в реальных системах устойчивые ранговые распределения с наклонами асимптот -1 и -2. Моделирование показало, что полученные частотные распределения являются существенно негауссовскими – несимметричными, многомодовыми. Выполнено исследование процессов создания новых производств, когда вначале создаётся модель-эталон для будущего производства, а затем начинается создание этого производства. В этом процессе происходит взаимная коррекция объекта – нового производства, и его модели. Впервые разработана метамодель процесса совместного развития объектов: «модель развития производства» и «производство». Выполнены исследования переходных процессов и частотных распределений вероятностей. Практические результаты работы – комплекс программно-методического обеспечения для моделирования, оптимизации и анализа рисков, использован на предприятиях и организациях для оптимизации распределения ресурсов в многономенклатурном производстве, оптимизации процессов развития экологизированных производств с переработкой отходов – в рамках договоров. Также результаты работы систематически использовались в учебном процессе.

Ключевые слова: производственная система, функция производства, оптимальное агрегирования, алгебра, бинарный оператор, оптимизация, декомпозиция, риски, моделирование.

ANNOTATION

Borovska T. N. Methodological fundamentals of the creation of mathematical models of distributed production systems development. — Manuscript of the dissertation.

Dissertation for the Degree of Doctor of Science (Engineering) on speciality 01.05.02 — mathematical modeling and computational methods. — Vinnytsia Na-

tional Technical University, Vinnytsia, 2016.

Scientific and applied problem dealing with the enhancement of functioning efficiency and development of the distributed production systems by means of creation of effective mathematical models and simulation of functioning and development of such systems is solved in the dissertation. Modern production systems are characterized by: - a large number of nonlinear and nonstationary links, - dynamical technologies, production products and performance indicators. In production systems processes of optimizations of the international division of production and localization of production, transition to "regional self-support" take place simultaneously. New models and methods for one-step and multistep problems of optimal control of functioning and development of production systems based on optimal aggregation methodology are proposed and theoretically substantiated in the research.

Algebra of optimal aggregation with operands – functions of production and development and binary operators of the optimal aggregation of parallel, serial, ring, etc. structures of relationships between production elements is formed. The possibility of decomposition of multidimensional nonlinear programming tasks in the system of one-dimensional optimization tasks is substantiated. Application of the method of direct exhaustive search for one-dimensional iteration tasks removes the restrictions on the type of production functions and eliminates the problem of multidimensional optimization. The theorem of isomorph display of resource links structure of the production system in the binary tree of optimal aggregation is proved that allowed to algebraize the solution of one-step problems of production systems optimization. The theorem on equivalent substitution of multidimensional model of production system by optimally aggregated model in variational problem of optimal development is proved that allowed to algebraize the solution of variational problems of development.

For the first time the solutions for optimal aggregation of typical structures of production systems with parametric relationships are obtained: "production, development", "production, development, innovation", "production and waste recycling». The solution of the problem of production systems risk analysis is suggested, studied and realized by models system "manufacturers, products, consumers", according to which the processes of functioning and development of production segment, where the investigated production system-the company, corporation are located, are modeled. Problems of data obtaining for models and data correctness evaluation are analyzed.

For the first time the meta-model of the process of joint development of the objects: "model of production development" and "production" is developed. Studies of transient and frequency distribution of probabilities are carried out. Practical results of the research-software package for modeling and optimization are used in educational process and at enterprises and organizations within the framework of the contracts.

Key words: production system, production function, optimal aggregation, algebra, binary operator, decomposition, optimization, risk, modeling.

Підписано до друку 28.01.2016 р. Формат 29.7×42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2016-023.
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.