

Розглядається задача заміни моделей технологічного ланцюжка «інновації, розвиток, виробництво» оптимальним еквівалентним по входу-виходу елементом на базі методології оптимального агрегування. Вирішена нова задача оптимального агрегування структури «інновації, розвиток, виробництво» з параметричними зв'язками між підсистемами «інновації», «розвиток», «виробництво». Підсистеми представлені узагальненими, параметризованими, стохастичними функціями виробництва. Виконано дослідження на моделях

Ключові слова: моделювання, функція виробництва, розвиток, інновації, бінарний оператор, оптимальне агрегування

Рассматривается задача замены моделей технологической цепочки «инновации, развитие, производство» оптимальным эквивалентным по входу-выходу элементом на базе методологии оптимального агрегирования. Решена новая задача оптимального агрегирования структуры «инновации, развитие, производство» с параметрическими связями между подсистемами «инновации», «развитие», «производство». Подсистемы представлены обобщёнными, параметризованными, стохастическими функциями производства. Выполнены исследования на моделях

Ключевые слова: моделирование, функция производства, развитие, инновации, бинарный оператор, оптимальное агрегирование

УДК 517.977.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28030

МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Т. Н. Боровская

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: taisaborovska@gmail.com

И. С. Колесник

Кандидат технических наук, доцент**

E-mail: i_r_a.76@mail.ru

В. А. Северилов

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: severilovvictor0@gmail.com

П. В. Северилов

Соискатель*

E-mail: severilovvictor0@gmail.com

*Кафедра компьютерных систем управления***

Кафедра вычислительной техники*

***Винницкий национальный

технический университет

Хмельницкое шоссе, 95,

г. Винница, Украина, 21021

1. Введение

Инновационное развитие является необходимым фактором устойчивого функционирования и развития производственных систем. Инновационное развитие производственных систем существовало всегда. Отличие современных производств от производств прошлого века – в изменении на порядок темпов инноваций. Такое ускорение обусловлено совместным быстрым развитием материальных и информационных технологий проектирования, что позволило быстро реализовывать технические идеи, интенсивно их испытывать и быстро запускать производство.

Однако, с началом компьютеризации всех этапов разработки и производства инновационных продуктов на базе инновационных технологий и тщательной подготовки проектов выявилась устойчивая зависимость между расчётными и реальными затратами ресурсов и времени: превышение в 5–7 раз. Это документально подтверждено для больших проектов, которые «у всех на виду»: новых автомобилей, летательных аппаратов, программных продуктов.

Сегодня технологические инновации чаще возникают в высокотехнологических структурах, их про-

движение в производство почти всегда сопряжено с рисками. На этом этапе необходимо планирование в условиях дефицита опыта и статистики. Рациональная альтернатива – создание «виртуальной реальности» – новых рабочих моделей для новых объектов. Исследования на этой «виртуальной реальности» потенциально могут обеспечить удовлетворительное управление процессом инновационного развития производственной системы.

В этой статье предметно рассматривается одна из комплекса причин расхождения расчётных и действительных затрат в инновационных проектах – отсутствие эффективных моделей процессов инновационного развития. Термин «предметно» означает, что конструируется модель инновационной системы и проводятся исследования на модели.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В Google по тематике данной работы выдаётся 10–40 миллионов документов. Авторы нашли свой способ отбора релевантных документов: просмотр в

режиме «картинки», где выводятся схемы, формулы, примеры моделирования. Визуальная компонента результатов публикаций имеет устойчивые отличительные признаки. Сегодня в области моделирования окончательное решение при сравнении моделей – аналогов - моделирование альтернативных моделей в среде пакета моделирования.

Статья является продолжением авторских исследований, отражённых в монографиях и учебных пособиях по моделированию. В [1] приведены примеры решения одношаговых оптимизационных задач методами оптимального агрегирования. В [2] разработаны новые методы решения вариационных задач развития. В [3] разработаны и исследованы: модели класса «производители, продукты, пользователи»; отказоустойчивые информационно-управляющие системы; модели оптимального управления биореакторными и банковскими системами. В [4] предложена классификация моделей-предикторов, привязанная к системе задач оптимального оперативного и стратегического управления.

В классических примерах [5] метод динамического программирования представлен как распределение ресурса во времени, по шагам процесса. В данной работе решается задача оптимального распределения ресурса «в пространстве» – между элементами производственной системы. Первооснова данной статьи – работы Беллмана, конкретно: методология декомпозиционного подхода к оптимизации, принцип оптимальности, связь метода динамического программирования с вариационным исчислением.

Работа Дж Форрестера [6] была и остаётся для авторов данной статьи прототипом в области информационной технология конструирования рабочих математических моделей в программных средах математических пакетов, конструирования не «от статистики», а от «порождающих механизмов», отказ от линеаризации, аппроксимации. Монография И. Эккланда [7] является образцом математически строгого введения в мир невыпуклых систем, суть которого передадим цитатой: «Откажемся теперь от предположения относительно выпуклости функций предпочтения и производственных множеств... В этом случае можно получить некоторые результаты, но они имеют другую природу и требуют использования других методов, для которых нам нужно сначала подготовить почву». Монография М. Пешеля [8] – хорошо систематизированный обзор и анализ моделей из разных областей знаний. Интерес представляют обобщённые многоуровневые модели роста с ограничениями и параметрическими связями, названные «башнями моделей». Модель, рассматриваемая в данной статье – частный случай этого класса моделей.

Монография М. Месаровича [9] по сути является вариантом построения методов управления, реализующих «постулат совместности» целей трёх уровней: общества, организации, индивида. М. Месарович предложил принципы координации, корректные только для линейных динамических систем. В данной работе используется «естественная» координация на базе принципа оптимальности для монотонных систем: «сколько бы не выделено ресурса некоторой подсистеме, он должен быть распределён оптимально в этой подсистеме».

Работы Р. Феджина и его соавторов в области оптимального агрегирования – наиболее близкий аналог. Существенное отличие от аналога в предметной области: в аналоге рассматриваются базы данных, обработка запросов; в данной статье – системы материального производства. Статья Р. Феджина [10], в которой рассматривается задача оптимального агрегирования рангов элементов в базах данных, – пример широты области применения методологии оптимального агрегирования.

Книга «Новые правила для новой экономики» Кевина Келли [11], бестселлер 2000 года, содержит множество существенных фактов и гипотез относительно процессов инновационного развития. Например, рассматривается гипотеза о том, что в инновационной экономике дешевле произвести миллион некоторых инновационных продуктов, чем десять тысяч. В данной статье приведен пример моделирования с возникновением подобного эффекта.

Был выполнен анализ публикаций по математическим моделям инновационного развития за 2004–2014 гг. Близких аналогов не найдено. Отмечены частые ссылки на работы Н. Кондратьева [12] и С. Кузнецца [13]. Это индикатор отсутствия радикально новых фундаментальных научных результатов в области функционирования и развития производственных систем.

Общая проблема для производств всех видов и уровней – обеспечение устойчивого оптимального развития. Существующие математические модели управления процессами функционирования и развития отстают от потребностей практики. Индикатором этого может быть деиндустриализация в развитых странах (почти полное вытеснение лёгкой промышленности в Евросоюзе и Канаде, сложности с автопроизводством в США и Швеции, дефицит собственных инженеров и программистов). Развитые страны пока являются лидерами в образовании, науке, технологиях, но они пока не нашли средств сохранения сегментов материального производства. Деиндустриализация - первый этап деинтеллектуализации линейки рабочих мест.

В статье рассматривается конкретная часть общей проблемы инновационного развития – разработка целостной модели оптимального инновационного развития. Сложности на пути создания такой модели: стохастичность функций инноваций и развития, параметрические связи между подсистемами «инновации», «развитие», «производство», неструктурированность и междисциплинарность проблемы разработки целостной модели инновационного развития. В данной статье элементы модели рассматриваются как преобразователи «ресурс – продукт» с возможностью включения моделей «производитель – потребитель», «производитель – ритейлеры», моделей экологического замыкания цикла производства и сервиса.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка базовой рабочей математической модели производственных систем с учётом процессов развития производства, создания и введения инноваций. Все элементы базовой модели должны быть представлены функциями

«затраты – выпуск». Связи между элементами должны быть алгебраизованы. В оператор эквивалентного преобразования структур должна быть встроена оптимизация распределения ресурсов. Такая жесткая конкретизация базируется на наработках авторов в области методологии оптимального агрегирования и позволяет при конечных затратах времени получить рабочую модель для научных исследований и встраивания в системы поддержки принятия решений.

Для достижения данной цели предполагается решение следующих задач:

- разработка и исследование параметризованных моделей функций производства, развития, инноваций;
- разработка модели параметрических связей подсистем;
- разработка оператора оптимального агрегирования системы «инновации, развитие, производство»;
- выбор технологии программной реализации оператора оптимального агрегирования.

4. Оптимальное агрегирование структуры «инновации, развитие, производство»

Процесс получения оператора оптимального агрегирования состоит из последовательных этапов [1]:

- анализ структуры производственной системы;
- выбор и разработка моделей элементов структуры;
- разработка математической модели производственной системы;
- анализ и решение оптимизационной задачи оптимального агрегирования;
- разработка рабочей модели (программная реализация).

Далее приведено выполнение этих этапов.

4. 1. Анализ структуры системы «инновации, развитие, производство»

На рис. 1 представлена схема модели системы и задачи оптимального агрегирования – получение эквивалентной оптимальной производственной функции. Модель системы «инновации, развитие, производство» входит как элемент в системы следующих иерархических уровней и это отражено на схеме. Конкретизируем постановку задачи. В качестве переменных управления выбираем распределение ресурса между подсистемами. Рассматриваем такие параметрические связи: подсистема «инновации» изменяет параметры функции производства (ФП) подсистемы «развитие», а подсистема «развитие» изменяет параметры ФП подсистемы «производство». В расширенной модели учитывается ресурсная обратная связь через подсистему «пользователи». Цель разработки – замена системы оптимальным эквивалентным элементом.

На рис. 1 подсистемы рассматриваем как «технологические преобразователи ресурса в продукт», которые представлены обобщенными функциями производства – зависимостями выхода подсистемы от ресурса и вектора параметров. ФП полагаются нестрогими и положительными функциями ресурса.

Относительно функций параметрических связей полагаем, что между затратами ресурса в подсистеме «развитие» и изменением показателей эффективности функции производства имеет место нестрогая монотонная и положительная зависимость. В базовой модели не учитываем инерционность и запаздывание: строительство, монтаж оборудования, отладка, испытание, обучение персонала. Современные технологии строительно-монтажных работ, использование оборудования с автоматической настройкой, тестированием и адаптацией в процессе функционирования, существенно сокращают время реализации инноваций, при условии отсутствия неожиданных ошибок, которые и порождают эмпирический эффект «последние 5 % работ требуют 95 % затрат времени и ресурсов».

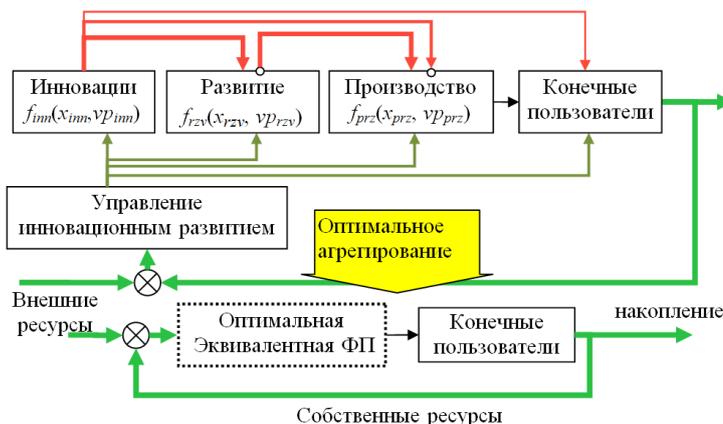


Рис. 1. Схема системы «инновации, развитие, производство»

4. 2. Обоснование выбора модели инновационного развития

Структура модели. Инновации могут быть классифицированы по содержанию: материал, конструкция, функции продукта; по этапам жизненного цикла. Обстоятельства возникновения и прохождения инноваций могут быть чрезвычайно разнообразными: инновации на рабочем месте; инновации от пользователя; инновации, созданные в специализированных организациях – инициативные, выполняемые по заказам предприятия; совершенно случайные инновации; «ноу хау» инновации. Поэтому создание математической модели инновационного развития на базе накопления статистики и создания моделей–аппроксимаций непродуктивно. Построение модели начинаем с формализации достоверно выявленных «порождающих механизмов» [6]. Выделяем классы функций производства, развития, инноваций, соответствующие определенным сегментам производства и параметризуем их. Вектор параметров должен позволять настройку модели при минимальной размерности и быть измеримым.

Элементы модели. Модель состоит из трех элементов: «инновации», «развитие», «производство». В больших производственных системах этим элементам модели действительно соответствуют подразделения, занимающиеся развитием производственных мощностей, исследованиями, созданием. Существуют также «виртуальные предприятия», которые не имеют собственных производственных мощностей, но находят

заказчиков на определённое количество определённой продукции. Выполнение заказа сводится к поиску и оптимизации исполнителей и поставщиков, и эффективному управлению функционированием такой распределённой системы. Поэтому предлагаемая модель будет адекватной для различных структур при условии эффективного управления. Ещё один аргумент в пользу предлагаемой модели инновационного развития – создание «мегазаводов», где на малой территории, буквально «под одной крышей» собираются все подсистемы гигантской производственной системы.

Модели параметрических связей. Выделим в производственной системе две подсистемы: «инновации, развитие» и «развитие, производство», которые обеспечивают относительно стабильную генерацию инноваций и воплощение их в конечной продукции. Существует множество вариантов преобразования затрат в этих подсистемах в повышение эффективности производства средств производства и производства конечной продукции. Возникает задача формализации этих разнообразных стохастических процессов в эффективную модель синтеза оптимального управления. Формально затраты в некоторой подсистеме приводят к изменению функции производства в следующей подсистеме. Однако для определённых технологий и продуктов производства зависимости «затраты–выпуск» достаточно устойчивы для приближения их функциями с небольшим числом параметров. Выбираем такую схему отображения: затраты отображаются в скалярный параметр, а этот параметр отображается в вектор параметров для функции определённого класса. В итоге получаем уравнения параметрических связей между подсистемами «инновации, развитие» и «развитие, производство». Обоснование выбора: производственные функции – невыпуклые, в интервале определения они имеют точку максимальной производительности. Эту точку выбираем в качестве скалярного параметра. Это минимальная информация для приближенного решения задачи оптимизации распределения ресурсов. Выполнение следующего шага: отображения этой точки в параметры ФП имеет смысл при наличии достаточных знаний о «порождающих механизмах» и статистических данных для данного производства.

Ресурсное управление. Выбираем подход на базе ресурсного управления, когда элемент верхнего уровня делит ресурс между элементами нижнего уровня на основе данных об их функциях производства. Критерии оптимальности для всех уровней: суммарный выпуск, суммарные затраты, эффективность (отношение выпуска к затратам). Ресурсное управление является управлением среднего уровня – между регулированием параметров техпроцессов и стратегическим управлением – на период 2–5 лет. Преимущества оптимального управления распределением ресурсов на основе метода оптимального агрегирования: – возможность получить решение в виде функции от любых параметров любой подсистемы; и – обеспечение согласования локальных критериев оптимизации подсистем с глобальным.

4. 3. Базовая модель инновационного развития

В базовой модели инновационного развития используем допущение о дифференцируемости функций производства и параметрических связей. Это идеализация

реальной производственной системы. Запишем выражения для функций инноваций, развития, производства и уравнения соответствующих параметрических связей:

$$y_{\text{inn}}(t) = f_{\text{inn}}(x_{\text{inn}}(t), vp_{\text{inn}}(t)), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} vp_{\text{rzv}}(t) = \Phi_{12}(y_{\text{inn}}(t)) \cdot \rho_{12}, \quad (2)$$

$$y_{\text{rzv}}(t) = f_{\text{rzv}}(x_{\text{rzv}}(t), vp_{\text{rzv}}(t)), \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} vp_{\text{prz}}(t) = \Phi_{23}(y_{\text{rzv}}(t)) \cdot \rho_{23}, \quad (4)$$

$$y_{\text{prz}}(t) = f_{\text{prz}}(x_{\text{prz}}(t), vp_{\text{prz}}(t)), \quad (5)$$

$$x_{\text{inn}}(t) + x_{\text{rzv}}(t) + x_{\text{prz}}(t) \leq Xs, \quad (6)$$

$$Yop(Xs) = \max_{x_1, x_2, x_3} (y_{\text{prz}}(t)), \quad (7)$$

где $x_{\text{inn}}(t), x_{\text{rzv}}(t), x_{\text{prz}}(t)$ – темпы ресурсов для подсистем «инновации», «развитие», «производство», т. е. «входы»; $y_{\text{inn}}(t), y_{\text{rzv}}(t), y_{\text{prz}}(t)$ – темпы «выходов» этих подсистем соответственно; $vp_{\text{inn}}(t), vp_{\text{rzv}}(t), vp_{\text{prz}}(t)$ – векторы параметров функций инноваций, развития, производства; $f_{\text{inn}}, f_{\text{rzv}}, f_{\text{prz}}$ – функции инноваций, развития, производства – «обобщённые функции производства»; Φ_{12}, Φ_{23} – функции отображения выхода предыдущей подсистемы в эффективность следующей подсистемы; ρ_{12}, ρ_{23} – отображения приращения эффективности в приращения параметров ФП следующего элемента.

Уравнения (1), (3), (5) – модели соответствующих подсистем, как технологических преобразователей ресурсов, уравнения (2), (4) – модели параметрических связей, уравнение (6) – текущее ограничение суммарных затрат ресурса, уравнение (7) – критерий и цель оптимизации: максимум конечного выхода системы.

4. 4. Постановка и анализ оптимизационной задачи

На основе базовой модели выполним постановку задачи оптимизации, проведем её анализ и разработку рабочей модели. В данной работе аналитическое исследование и создание рабочей модели выполнялись параллельно, в одном документе математического пакета. Рассмотрим возможные пути решения задачи оптимизации (6), (7). Записываем выражение для критерия как явной функции от управления и связей между элементами. Используя (1) записываем выражение для критерия – темпа производства при заданном ограничении Xs :

$$J_{\text{ind}}(Xs) = y_{\text{prz}}(Xs) = f_{\text{prz}}(x_{\text{prz}}(t), vp_{\text{prz}}(t)). \quad (8)$$

Интегрируем (2), (4):

$$vp_{\text{rzv}}(t) = vp_{\text{rzv}0} + \int_0^t \Phi_{12}(y_{\text{inn}}(t)) \cdot \rho_{12} \cdot dt, \quad (9)$$

$$v_{prz}(t) = v_{prz0} + \int_0^t \Phi_{23}(y_{rzv}(t)) \cdot \rho_{23} \cdot dt. \tag{10}$$

Подставим (9) в (3) и (10) в (5)

$$y_{rzv}(t) = f_{rzv}(x_{rzv}(t), v_{prz0} + \int_0^t \Phi_{12}(y_{inn}(t)) \cdot \rho_{12} \cdot dt), \tag{11}$$

$$y_{prz}(t) = f_{prz}(x_{prz}(t), v_{prz0} + \int_0^t \Phi_{23}(y_{rzv}(t)) \cdot \rho_{23} \cdot dt). \tag{12}$$

Подставим (1) в (11)

$$y_{rzv}(t) = f_{rzv}(x_{rzv}(t), v_{prz0} + \int_0^t \Phi_{12}(f_{inn}(x_{inn}(t), v_{inn}(t))) \cdot \rho_{12} \cdot dt). \tag{13}$$

В статистических исследованиях влияния научно-технического прогресса [14] доказано существование устойчивой статистической зависимости между затратами на инновации и приращением эффективности производственных систем и продуктов производства. В конкретных реализациях процессов функционирования развития могут наблюдаться убывающие зависимости. Это инновационные риски, обусловленные как явными ошибками проектирования, производства, эксплуатации так. В рабочей модели стохастичность реализована использованием встроенных и разработанных функций – генераторов случайных чисел с заданными распределениями.

Полагаем функции параметрических связей нестрого монотонно возрастающими. Определим функции влияния переменных управления $x_{inn}, x_{rzv}, x_{prz}$ на выпуск конечного продукта (8). Запишем выражения (12), (13) в компактной форме, как функции пользователя.

$$Y_{prz}(x_{prz}, y_{rzv}) = f_{prz}(x_{prz}(t), (v_{prz0} + \int_0^t \Phi_{23}(y_{rzv}(t)) \cdot \rho_{23} \cdot dt)), \tag{14}$$

$$Y_{rzv}(x_{rzv}, x_{inn}) = f_{rzv}(x_{rzv}(t), (v_{prz0} + \int_0^t \Phi_{12}(f_{inn}(x_{inn}(t), v_{inn}(t))) \cdot \rho_{12} \cdot dt)). \tag{15}$$

Для доказательства монотонности функции конечного производства $Y_{prz}(x_{prz}, x_{rzv}, x_{inn})$ по всем переменным управления $x_{inn}, x_{rzv}, x_{prz}$ введем следующие функции – частные производные от $Y_{prz}(x_{prz}, x_{rzv}, x_{inn})$ по всем переменным управления:

$$\eta(x_{inn}) = \frac{\partial}{\partial x_{inn}} Y_{prz}(x_{prz}, x_{rzv}, x_{inn});$$

$$\eta(x_{inn}) \geq 0; 0 \leq x_{inn} \leq x_{inmax}; \tag{16}$$

$$\eta(x_{rzv}) = \frac{\partial}{\partial x_{rzv}} Y_{prz}(x_{prz}, x_{rzv}, x_{inn});$$

$$\eta(x_{rzv}) \geq 0; 0 \leq x_{rzv} \leq x_{rzvmax}; \tag{17}$$

$$\eta(x_{prz}) = \frac{\partial}{\partial x_{prz}} Y_{prz}(x_{prz}, x_{rzv}, x_{inn});$$

$$\eta(x_{prz}) \geq 0; 0 \leq x_{prz} \leq x_{przmax}. \tag{18}$$

Проанализируем $\eta(x_{prz})$ – производную от $f_{prz}(\cdot)$ – нестрого монотонной функции от x_{prz} .

Лемма 1. Функция влияния управления x_{prz} на критерий (14) нестрого монотонная возрастающая функция.

Доказательство. Имеем суперпозицию трёх функций. Для нахождения производной применяем "цепное правило". Вводим для удобства короткие имена переменных и функций:

$$\frac{\partial}{\partial x_{prz}} f_{prz}(v_{prz}(f_{rzv}(x_{rzv}))) \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x_p} f_p(v_p(f_r(x_r))). \tag{19}$$

Введём обозначения $u = v_p(f_r(x_r))$, $v = f_r(x_r)$, и запишем выражение для производной

$$\frac{\partial}{\partial x_p} f_p(v_p(f_r(x_r))) = \left(\frac{\partial}{\partial u} f_p(u) \right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial v} v_p(v) \right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x_r} f_r(x_r) \right). \tag{20}$$

Производные в правой части выражения – нестрого положительные, поэтому их произведение также будет нестрого положительной функцией.

Лемма 2. Функция влияния управления x_{rzv} на критерий (14) – суперпозиция нестрого монотонных функций, поэтому она будет нестрого монотонно возрастающей функцией.

Лемма 3. Функция влияния управления x_{inn} на критерий (14) – суперпозиция нестрого монотонных функций, поэтому она будет нестрого монотонно возрастающей функцией.

Доказательство лемм 2 и 3 аналогично доказательству леммы 1.

Задача оптимального агрегирования системы с параметрическими связями существенно отличается от задачи агрегирования параллельной структуры: вследствие динамических связей между элементами (1), (3), (5) ОЭФП системы будет функцией трёх переменных – величины ресурса и начальных состояний параметров ФП и ФР. Параметры функции инноваций полагаем постоянными. Вместо единственной зависимости «затраты – выпуск» имеем множество таких функций для возможных наборов начальных значений параметров ФП и ФР.

Сформулируем теоремы о свойствах ОЭФП.

Теорема 1. Зависимость максимального темпа выпуска конечного продукта $Yop(Xs)$ от суммарных затрат Xs , $0 \leq Xs \leq Xsmax$ при заданных начальных значениях параметров ФП и ФР является нестрого монотонно возрастающей: $Yop(Xs + \delta Xs) \geq Yop(Xs)$.

Доказательство теоремы 1 базируется на леммах 1–3. Теорема 1 даёт возможность доказать следующую теорему о свойстве оптимальных распределений ресурсов.

Теорема 2. Для любой точки интервала $0 \leq X_s \leq X_{smax}$ оптимальное распределение ресурса $(x_{0prz}, x_{0rvz}, x_{0inn})$ для гладких выпуклых монотонных функций $f_{inn}, f_{rvz}, f_{prz}$ удовлетворяет условиям:

$$\frac{\partial}{\partial x_{prz}} f_{prz}(\cdot) = \frac{\partial}{\partial x_{rvz}} f_{rvz}(\cdot) = \frac{\partial}{\partial x_{inn}} f_{inn}(\cdot). \quad (21)$$

Назначение этой теоремы – установить связь метода оптимального агрегирования с методом неопределённых множителей Лагранжа, который используется как эталонный при контроле корректности программы оптимального агрегирования. Большинство известных методов оптимизации разработаны только для гладких монотонных, выпуклых функций. Для ФП реальных производственных систем такие условия выполняются в окрестностях точки максимальной эффективности.

Для реальных производственных систем ФП вогнуто-выпуклые [6]. Оптимальные распределения ресурсов для систем с такими ФП могут иметь нулевые компоненты. Интерпретации нулевых компонент: остановить, закрыть, ликвидировать данное производство. Сформулируем утверждение, которое используется далее при разработке модуля оптимизации.

Утверждение. Наличие в производственной системе хотя бы одного элемента с невыпуклой ФП является необходимым условием существования распределений ресурса с нулевыми компонентами. В [11] собраны термины которыми практики называют эффекты в системах с растущей производительностью, в данном случае это: «победитель получает всё».

4.5. Разработка рабочей модели оптимального агрегирования

На базе теоретического анализа разработана рабочая модель, элемент подсистемы поддержки принятия решений. Новизна задачи и стандарты прикладного системного анализа обуславливают декомпозицию задачи в эффективную систему программных модулей. В данном случае эффективность определяется такими решениями:

- каждый модуль является имитацией соответствующего аспекта поведения реальной системы;
- выход модуля имеет содержательную интерпретацию;
- каждый модуль может автономно тестироваться и исследоваться;
- каждый модуль используется в последующем модуле;
- в модулях реализован принцип «утаивания информации», что позволяет независимо модифицировать модули.

На рис. 2. представлена схема рабочей модели.

Сценарий алгоритма оптимизации:

- для заданного значения ресурса формируем начальное его распределение между подсистемами «инновации», «развитие», «производство»;
- вычисляем значение критерия (темп выпуска конечного продукта);
- задаёмся величиной перераспределяемого ресурса и вычисляем по определённой схеме небольшое число вариантов перераспределения;

- вычисляем прирост критерия для каждого варианта и выбираем лучший;
- повторяем цикл перераспределения фиксированное число раз или до заданного порога сходимости. Этот цикл повторяется для всех точек сетки.

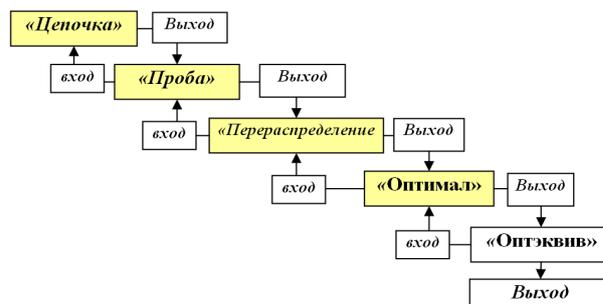


Рис. 2. Декомпозиционная структура рабочей модели

Краткое описание модулей.

Модуль «цепочка» $OsRzPr(vRs, Mpse)$ – оператор, который берёт структуру данных «объём и распределение ресурса» vRs и матрицу параметров системы $Mpse$, а возвращает новую матрицу параметров системы и приращение выхода системы $dx1$. Данный оператор использует функции пользователя: производство, развитие, инновации и функции параметрических связей.

Суть модуля: имитация реакции системы на заданные величины и распределение ресурса.

Модуль «проба» $Prob(vRs, Mpse, dlt)$ – оператор, который берёт структуру данных vRs , структуру $Mpse$ и шаг процесса dlt , а возвращает нормированные и ненормированные результаты «проб». Используется как подпрограмма модуль «Цепочка». Особенность модуля – использование технологического массива $plek$, что упрощает алгоритм обработки данных. Суть модуля: заданы система и начальное распределение ресурсов, определяются результаты заданного набора перераспределений ресурса.

Модуль «перedel». Выбор алгоритма поиска оптимального распределения ресурса базируется на теоремах 1, 2 и утверждении. Модуль берёт структуры данных vRs , $Mpse$ и шаг процесса dlt , а возвращает нормированный вектор оптимального распределения ресурса. Используется подпрограмма «проба». Особенность модуля большая часть операций – манипулирование структурами данных: выделение, склеивание, сортировки матриц по элементам заданных строк и столбцов.

Сценарий работы модуля: для заданной величины перераспределяемого ресурса определяется выход системы для ряда «шаблонов»:

- распределить в предыдущей пропорции;
- отдать, по очереди, всё каждой из подсистем.

По результатам такого «теста» выполняется перераспределение: лидеру тестирования - квант ресурса, забранный у двух остальных подсистем пропорционально предыдущему распределению.

Модуль «оптималь» берёт структуры данных vRs , $Mpse$ и шаг процесса dlt , а возвращает величину ресурса и нормированный вектор оптимального распределения ресурса. Используется подпрограмма «перedel». Сценарий работы модуля: для заданного приращения ресурса системы выполняется модуль «перedel». Таким образом, модуль является тернар-

ным оператором, который заменяет систему из трёх элементов с параметрическими связями оптимальным, эквивалентным элементом, ОЭФП которого зависит от значения входного ресурса, и начальных значений параметров функций производства и развития.

5. Примеры результатов тестирования рабочих моделей

Полученная рабочая модель имеет два предназначения:

- отладка новой программы оптимизации нелинейного объекта;
- исследование свойств нового нелинейного и нестационарного объекта.

Рассмотрим два примера результатов моделирования.

На модуле «оптималь» выполнены исследования процесса оптимизации по направлениям:

- выбор шага и количества итераций;
- тестирование и сравнение альтернативных алгоритмов оптимизации;
- исследование свойств объекта оптимизации в пространстве параметров и начальных состояний;

– верификация модели на базе доступных статистических данных.

На рис. 3 представлены два примера результатов моделирования процессов поиска оптимального распределения ресурса. Это часть интерфейса для исследования модуля.

Первая часть интерфейса «параметры и начальное состояние системы» не приведена. Выбраны два качественно различных процесса. Можем видеть монотонность зависимости критерия от номера итерации.

Модуль «оптималь» – конечная цель разработки. Он берёт начальное состояние и матрицу параметров системы «инновации, развитие, производство» и возвращает ОЭФП – зависимость выпуска конечной продукции от суммарных затрат системы. Используются как подпрограммы модули «оптималь» и «цепочка». Полученные результаты моделирования не противоречат эмпирическим данным. В частности, модель воспроизводит такую реальную

ситуацию: до определённого уровня затрат оптимальны малые изменения распределения затрат с доминированием затрат производства, при достижении некоторого критического значения суммарных затрат оптимальное распределение ресурсов скачкообразно меняется: затраты развития существенно возрастают при таком же существенном уменьшении затрат производства. Именно такой результат представлен на рис. 4. Это часть интерфейса для анализа оптимальной эквивалентной функции производства.

На верхних графиках рис. 4 представлены «причины» наблюдаемых результатов оптимизации – функции развития и производства для двух моментов времени: реакция на определённый «квант ресурса», который при заданном состоянии распределяется оптимально и вызывает изменения этих функций. На левом графике представлены: зависимость среднего инновационного эффекта от темпа затрат на исследования и реализация соответствующей стохастической зависимости. Содержательно инновационный эффект может повысить эффективность средств производства и продукта производства, точность и качество обработки детали, уменьшение затрат на обработку, сборку ...

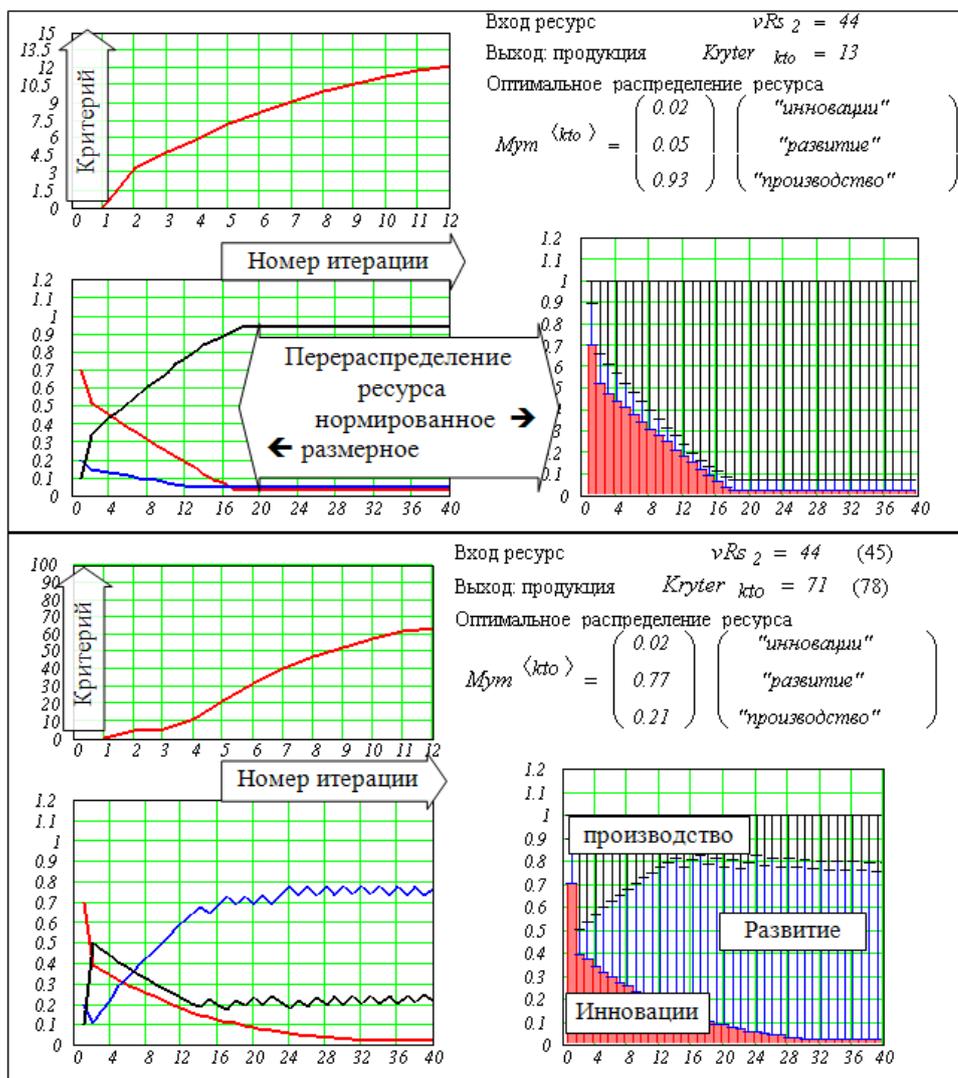


Рис. 3. Анализ сходимости процессов оптимизации распределения ресурсов в системе «инновации, развитие, производство»

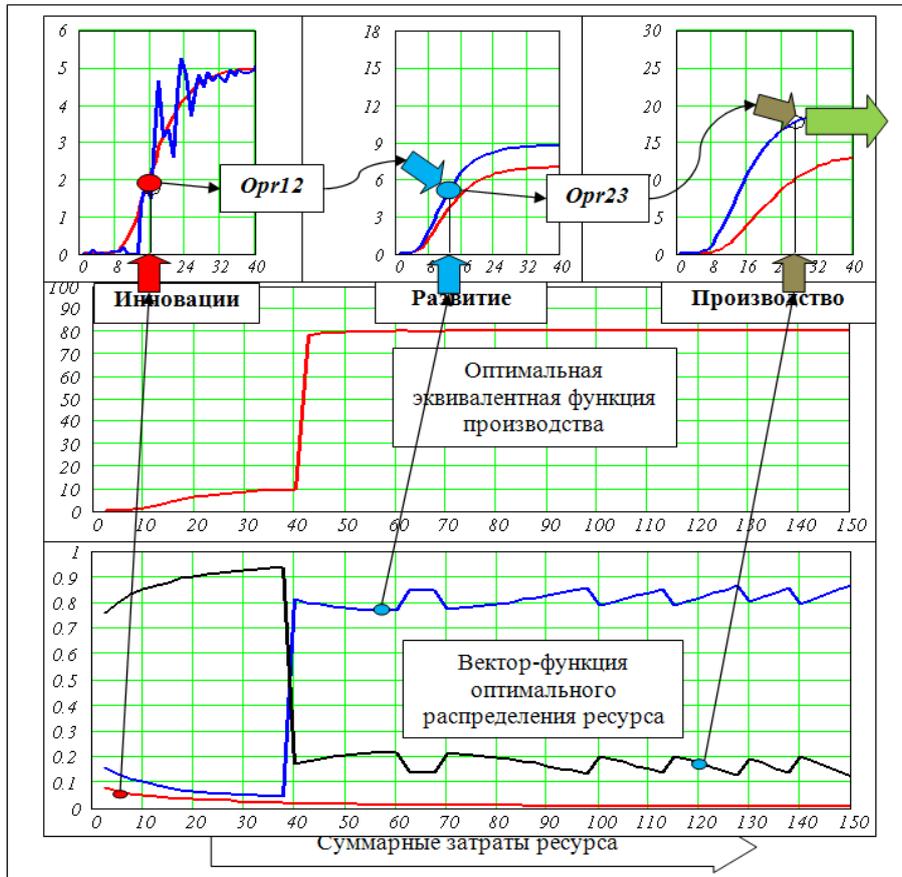


Рис. 4. Пример оптимальной эквивалентной функции производства для системы «инновации, развитие, производство»

В нижней части рис. 4 представлены оптимальная эквивалентная функция производства и вектор – функция оптимального распределения ресурса при определённом темпе затрат ресурса, оказывается выгодным установить дорогое, но эффективное оборудование, изменить материал, конструкцию продукта производства, что в итоге существенно уменьшит затраты производства и (или) повысит выход продукции. Это отображается скачком функции производства. Далее следуют малые скачки перераспределения ресурса между затратами производства и развития.

Математически модель корректна: оптимальная эквивалентная функция производства монотонна, на интервале, где имеют место малые скачки распределения ресурса, она гладкая, монотонно возрастающая. При других наборах параметров функция производства не имеет разрыва.

Возможно ли такое поведение у реальных производственных систем. Типовой пример: автозавод много лет выпускал ресурсозатратные, мало эффективные автомобили. Параллельно со старым конвейером быстро собрали новый для новых марок автомобилей, демонтировали старую линию.

Другой реальный пример: критическая деталь технической системы делалась две недели на нескольких станках, с большой долей ручных операций. Установлен «станок» за 4 миллиона у.е. (разработали сами или купили) – время обработки – несколько часов, эксплуатационные затраты существенно снизились, брак практически исчез.

являющаяся новым элементом в авторских исследованиях методологии оптимального агрегирования.

По результатам анализа структуры производственной системы предложена модель, отличающаяся от аналогов тем, что за основу взяты преобразования ресурсов и параметров преобразователей ресурсов, а не информационные и финансовые потоки, которые сами по себе не создают инновационные производства.

Выполнен выбор и разработка моделей элементов структуры параметризованных функций производства, развития производства и функций параметрических связей между элементами. Выбранные параметры позволяют отобразить реальные связи и свойства, и могут идентифицироваться и измеряться за счёт конкретных конструкторско-технологических разработок.

На базе моделей элементов и параметрических связей разработана математическая модель системы «инновации, производство, развитие», которая позволила выполнить постановку и решение задачи оптимального агрегирования, и создать рабочую модель функционирования и развития производственной системы.

Выполнено аналитическое исследование свойств системы с параметрическими связями. Сформулированы теоремы относительно эквивалентности оптимально агрегированной системы с параметрическими связями. Доказательства базируются на монотонности и ограниченности функций производства и параметрических связей. Для решения оптимизационной задачи оптимального агрегирования,

Можно найти множественные примеры из других областей производства, когда вместо наращивания объёмов производства и повышения эффективности за счёт введения малых инноваций, ресурсы выгоднее вложить в новые средства и продукты производства. Для развития такого типа необходимо наличие определённого уровня затрат ресурсов.

В примере на рис. 4 – затраты в подсистеме «инновации» составляют меньше 10 % суммарных затрат – согласно известной статистике. Какими будут процессы развития, если эффективность инноваций увеличится? Это более сложная для исследования стохастическая задача с негауссовской статистикой, и многими неопределённостями – тема отдельной статьи.

6. Выводы

Поставлена и решена задача оптимального агрегирования структуры «инновации, развитие, производство», яв-

выбрана інформаційна технологія програмної реалізації оператора оптимального агрегування системи в формі ланцюжка програмних модулів, що забезпечує можливість автономного тестування, налагодки і модифікації функціональних модулів.

Розроблена робоча модель функціонування і розвитку виробничої системи, головний елемент якої – оператор оптимального агрегування. Результати тестування моделі, показали, що

она воспроизводит наблюдаемые в реальных процессах инновационного развития ситуации радикальной инновации, когда выгодно закрыть прежнее производство, создать и запустить новое – высокоэффективное. Таким образом, выделены два типа инноваций – непрерывной модификации и полной замены старого производства. Модель позволяет найти условия перехода к радикальной инновации и может использоваться в системе поддержки принятия решений для оптимизации и анализа рисков.

Литература

1. Боровська, Т. М. Метод оптимального агрегування в оптимізаційних задачах: монографія [Текст] / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2009. – 229 с.
2. Боровська, Т. М. Моделювання і оптимізація процесів розвитку виробничих систем з урахуванням використання зовнішніх ресурсів та ефектів освоєння: монографія [Текст] / Т. М. Боровська, С. П. Бадьора, В. А. Северілов, П. В. Северілов; за заг. ред. Т. М. Боровської. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 255 с.
3. Боровська, Т. М. Моделювання задач управління інвестиціями: навч. посіб. для студ. ВНЗ [Текст] / Т. М. Боровська, В. А. Северілов, С. П. Бадьора, І. С. Колесник. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 178 с.
4. Васильська, М. В. Моделі-предиктори: проблеми розробки і адекватності [Текст] / М. В. Васильська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 114–121.
5. Беллман, Р. Динамическое программирование и современная теория управления [Текст] / Р. Беллман, Р. Калаба; пер. с англ. – М.: Наука, 1969. – 131 с.
6. Форрестер, Дж. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика) [Текст] : пер. с англ. / Дж. Форрестер. – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.
7. Экланд, И. Элементы математической экономики [Текст] / И. Экланд; пер. с франц. – М.: Мир, 1983. – 248 с.
8. Пешель, М. Моделирование сигналов и систем [Текст] / М. Пешель; пер. с нем. – М.: Мир, 1981. – 302 с.
9. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем [Текст] / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара; пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
10. Fagin, R. Efficient similarity search and classification via rank aggregation [Text] / R. Fagin, R. Kumar, D. Sivakumar // In Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD international Conference on Management of Data (San Diego, California). SIGMOD '03. ACM Press, New York, NY, 2003. – P. 301–312. doi:10.1145/872794.872795.
11. Kelly, K. New Rules for the New Economy. 10 radical strategies for a connected world [Text] / K. Kelly. – Viking Penguin, 1998. – 179 p.
12. Kondratiev, N. D. The Long Waves in Economic Life [Text] / N. D. Kondratiev, W. F. Stolper // Review of Economic Statistics. – 1935. – № 17(6). – P. 105-115. doi:10.2307/1928486.
13. Kuznets, S. Secular movements in production and prices. Their nature and their Bearing upon Cyclical Fluctuations [Text] / S. Kuznets. – Boston: Houghton Mifflin, 1930. – 536 p.
14. Янч, Э. Прогнозирование научно-технического прогресса [Текст] : пер. с англ. / Э. Янч. – М.: Прогресс, 1970. – 569 с.