УДК 519.7.007.005.1
DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123461

Дослідження процесу багаторівневого управління виробничою діяльністю підприємства з урахуванням ризиків

В. О. Бабенко, Н. В. Чебанова, Н. І. Рижикова, С. В. Руденко, Н. О. Бірченко

Вирішено задачу динамічної оптимізації багаторівневого управління з урахуванням ризиків шляхом зведення до реалізації розв'язків скінченного числа задач лінійного й опуклого математичного програмування, а також скінченного числа задач дискретної оптимізації. Запропоновано метод на основі побудови множин досяжності. Це дає можливість отримати гарантований результат управління при впливі будь-яких можливих ризиків із визначеної множини.

Ключові слова: динамічна оптимізація процесу управління, багаторівневе управління, множина досяжності, мінімаксний гарантований результат

1. Вступ

Часто процес прийняття рішень в умовах невизначеності та зумовленого цим ризику призводить до необхідності вирішення задачі про найкращий вибір в умовах неповної інформації про розглянуту систему. При цьому існуючі підходи до вирішення подібних завдань базуються, в основному, на статичних моделях і використовують апарат стохастичного моделювання. Для застосування такого математичного апарату потрібне знання імовірнісних характеристик основних параметрів моделі та спеціальних умов на реалізацію розглянутого процесу.

Крім того, для використання апарату стохастичного моделювання необхідне виконання спеціальних умов (приклад, масовість та однорідність вибірки значень), які на практиці, зазвичай складно виконати. Необхідно враховувати специфіку виробничої діяльності (ВД) підприємства, де зокрема, ризики не залежать від нас та є неконтрольованими параметрами.

Отже, для розв'язання задачі процесу управління (ПУ) ВД підприємства пропонуємо застосування мінімаксного підходу або знаходження гарантованого результату. Його суть полягає в тому, що на мінімальному гарантованому оптимальному управлінні значення найгіршого (максимального) вектора різнорідних ризиків є найменшим в порівнянні з аналогічними значеннями для інших. Таким чином, вплив ризиків в задачі ПУ, де ризики є неконтрольованими параметрами, мінімізуємо вибором такого оптимального управління, який би гарантував знайдений результат при впливі будь-яких максимальних з ризиків множини допустимих.

Відомо, що, сучасне підприємство є складним багатофакторним і багатостадійним об'єктом управління, що піддається впливу різного роду ризиків. Складається з великої кількості взаємозалежних підсистем, які мають відносини підпорядкованості у вигляді ієрархічної структури. Ієрархічна система управління виробничою діяльністю (ВД) підприємства приводить до необхідності додаткового уточнення поняття оптимізації процесами управління (ПУ). У складних системах управління з заданою ієрархічною структурою під час розв'язання оптимізаційних задач між підсистемами різних рівнів виникають конфліктні ситуації. Рішення приводить до необхідності вибору управління в межах узгодженої стратегії. Розв'язання цієї задачі тісно пов'язане з проблемою прийняття рішень з урахуванням багаторівневості управління, що повинно враховувати можливості його вибору на кожному рівні управління. Крім того, при рішенні подібних задач з'являється проблема обробки великих обсягів інформації. Це створює значні труднощі під час автоматизації ВД на підприємстві. Отже, оптимізація процесу багаторівневого управління ВД підприємства з урахуванням ризиків є складною актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Серед різних підходів щодо вирішення задачі управління можна виділити основні. Перший з них – метод динамічного програмування, що базується на принципі оптимальності Р. Беллмана, і приводить до необхідності розв'язувати функціональні рівняння спеціального виду, другий – варіаційний підхід.

Достоїнства і можливості динамічного програмування, розвиненого на основі цього підходу, добре відомі, і він досить повно відображений у літературі. В [1, 2] показано, як метод динамічного програмування дозволяє знаходити екстремум функціонала від багатьох невідомих функцій шляхом заміни вихідної задачі послідовністю більш простих задач. Таку заміну проводять на основі принципу оптимальності методу, що лежить в основі динамічного програмування. Його суть полягає у тому, що «незалежно від початкового стану системи та першого вибору управлінського впливу наступний вибір управлінських впливів має бути оптимальним щодо стану, у який перейшла система в результаті першого управлінського впливу» [1].

Зупинимося на методі динамічного програмування Беллмана. На рис. 1 технологічний процес поділено на N послідовних етапів. Кожний момент часу характеризується змінною x_k, управлінням u_k і деякою цільовою функцією $\varphi(u_k)$. Згідно із принципом оптимальності розгляд процесу починають з останнього етапу.

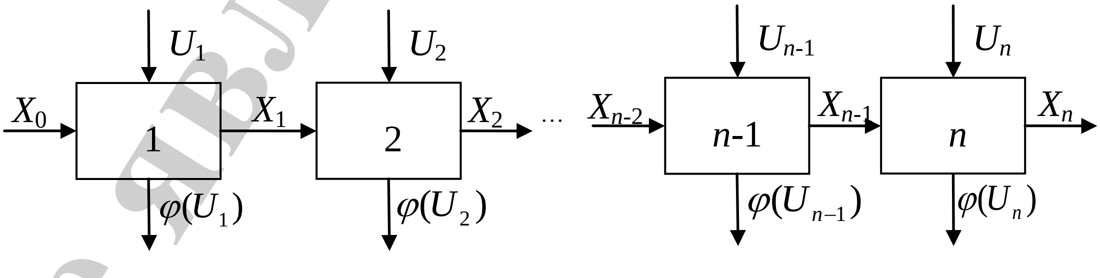

Рис. 1. Етапи технологічного процесу

Таким чином, метод динамічного програмування дозволяє звести у цілому N-мірну задачу пошуку всіх u_k до послідовності N одномірних задач, що істотно полегшує розв'язання задачі.

Однак завжди залишаються відкритими запитання: чи можна обмежитися даними числом ітерацій під час вирішення досліджуваної задачі. Тобто необхідний ретельний змістовний контроль результатів. Інакше легко дістати розв'язки, які далекі від оптимальних. Але до істотних вад методу слід віднести необхідність запам'ятовування на кожному етапі великого обсягу інформації. Це створює значні труднощі під час реалізації задач великої розмірності на обчислювальній техніці.

В цілому метод динамічного програмування рекомендується застосовувати в комбінації з іншими методами, наприклад, математичного програмування. Відомо, що математичне програмування пов'язане із завданнями ефективного використання та розподілу обмежених ресурсів, які зводяться до пошуку умовного екстремуму функцій багатьох змінних з обмеженнями у виді рівностей та нерівностей. В математичному програмуванні створені ефективні обчислювальні методи, що дозволяють розв'язувати екстремальні задачі з великим числом наявних змінних та відповідних обмежень. Особливо це відноситься до задач лінійного програмування, методи якого знайшли широке застосування в економіко-математичному моделюванні. Наприклад, в роботі [3] цей метод застосовано для оптимізації управління інноваційними процесами підприємств з переробки сільськогосподарської сировини. В [4] досліджено моделювання виробничих процесів в малому бізнесі в Україні. Автори роботи [5] знаходили гарантований результат управління виробничими технологіями на підприємстві на основі розв'язку екстремальної задачі з великою кількістю наявних змінних та впливом ризиків. Вплив своєчасності процесів відтворення на ефективність системи розвитку підприємства із застосуванням економіко-математичного моделювання досліджено в роботі [6]. Модель мінімаксного адаптивного управління інноваційними процесами на підприємстві з урахуванням ризиків розроблюно в [7].

Варіаційний підхід, представлений у [8], заснований на поширенні ідей і методів математичного програмування на багатокрокові задачі. Він змикається з апаратом принципу максимуму Л. С. Понтрягіна, розвиненого для розв'язання задач оптимального управління у диференціальних системах [9] (з неперервним часом). Цей підхід зазвичай називають «дискретний принцип максимуму». Принцип максимуму поширює варіаційні методи на оптимальні задачі для систем, що описують звичайними диференціальними рівняннями з довільними обмеженнями на управлінський вплив, а також з деякими видами обмежень на змінні процесу. Однак, оскільки принцип максимуму визначає лише необхідну умову оптимальності, з того факту, що певна траєкторія задовольняє їй, не випливає, що вона оптимальна. Тобто принцип максимуму дає траєкторії лише «підозру» на оптимальність – для визначення з числа оптимальної траєкторії необхідна додаткова перевірка.

Відомо багато застосувань принципу максимуму Л. С. Понтрягіна. Останнім часом принцип максимуму поширився на дискретні системи та системи з розподіленими параметрами. В [10] його розповсюджено на кластерні моделі розвитку аграрного виробництва домашніх господарств. Виконано спроби щодо застосування методу для контролінгу на підприємствах в міжнародному бізнесі [11]. Але принцип максимуму Понтрягіна ґрунтується на диференціальних моделях для неперервних процесів, а в задачах ПУ процеси по суті є дискретними. Таким чином, набагато краще використовувати відразу дискретні економіко-математичні моделі, тим більше, що під час реалізації за допомогою обчислювальних систем неперервні моделі необхідно все одно дискретизувати.

Таким чином, можливо зробити висновок, що при розв'язанні задачі управління ВД підприємства потрібно застосування спеціальних методів. Відповідний математичний апарат повинен враховувати динамічний характер досліджуваних задач і їх специфіку. А саме – вплив фактору ризику, варіантність технологій та ін., а також можливості ефективної комп'ютерної реалізації як процесів моделювання, так і реального управління. Таким чином, для задачі ПУ ВД запропоновано методи, засновані на побудові прогнозних множин (областей досяжності) розглянутої динамічної моделі. Представляють собою множини всіх допустимих станів фазового вектора системи на заданий момент часу, відповідних фіксованому управлінню і всім допустимим векторам ризиків. В [12] фазовий вектор розглядається з періодом в квартал та загальним річним терміном управління.

Необхідно відзначити, що застосування такого методу дозволить звести вихідну багатокрокову задачу до реалізації скінченної послідовності однокрокових задач дискретної оптимізації. Такі задачі при застосуванні сучасної обчислювальної техніки можна розв’язати методами лінійного або нелінійного (в залежності від виду цільових функцій) математичного програмування. Таким чином, основним результатом, застосування методу побудови областей досяжності є те, що задача ПУ ВД підприємства стає вирішуваною за певне число ітерацій.

Отже, процес оптимального функціонування економічних систем багатогранний. Включає в себе організацію самого процесу оптимального управління та планування, контроль і оперативне управління ходом виконання планів, економічні важелі оптимального розвитку господарської діяльності, методи здійснення вертикальних і горизонтальних зв'язків у системі і т. д. В [13] це продемонстровано на прикладі бізнес-моделей, в [14] − у розвинутій концепції оцінки виробничих активів. Авторами [15] досліджено організаційно-управлінські зв'язки на прикладі інноваційного фактору бізнес-моделі. В [16] − в управлінні програмами для покращення результатів бізнесу. Дослідники роботи [17] застосували сформовану концепцію інтелектуалізації інформаційного забезпечення для управління підприємством.

Проте відправним пунктом оптимального функціонування економічної системи, зокрема ВД підприємства, є науково організований процес розробки й реалізації ПУ. Основні риси цього процесу можуть бути виявлені на основі загальних принципів оптимальності. Також повинні враховувати ієрархічну структуру ВД підприємства, поняття критеріїв оптимальності, моделювання в умовах невизначеності зі складною структурою досліджуваного процесу.

Одним із прикладів економічної системи зі складною структурою є сфера виробництва підприємства. Характеризується залежністю від сировини, сезонністю виробництва, енергоємністю, відсутністю строгих математичних моделей, які описують фізичні процеси, наявністю факторів невизначеності, що впливають на динаміку виробництва. Таким чином, ця виробнича система являє собою сукупність взаємозалежних елементів, кожний з яких здійснює певну переробку деякої сировини або напівфабрикату в готовий продукт. Крім того, управління ВД підприємства відбувається в умовах невизначеності через вплив різного роду ризиків.

Процес прийняття рішень в умовах невизначеності економічного середовища, як правило, призводить до необхідності вирішувати деяку задачу про найкращий вибір в умовах неповної інформації про систему, що досліджується. Типовою ситуацією, пов'язаною з прийняттям рішення в динамічних системах, є необхідність організувати процедуру управління в умовах невизначеності, наприклад у процесі врахування ризиків виробництва та ризиків застосування виробничих технологій. Цю процедуру, спрямовану на досягнення тієї чи іншої мети управління, часто буває необхідно супроводити процесом оптимізації. Це дозволяє виділити гарантований, найкращий або прийнятний в деякому сенсі результат, тобто використати мінімаксний підхід.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є дослідження ПУ ВД підприємства при наявності ризиків і рішення задачі оптимізації багаторівневого управління ВД підприємства з урахуванням ризиків. Передбачає розробку методу, що дозволяє перейти від складної багатокрокової задачі динамічної оптимізації багаторівневого управління з урахуванням ризиків до реалізації скінченної послідовності однокрокових задач дискретної оптимізації

Для досягнення мети дослідження були поставлені такі завдання:

– сформувати змістовну постановку задачі багаторівневого управління ВД підприємства при наявності ризиків;

– розробити формальну постановку моделі багаторівневого управління на підприємстві при наявності ризиків;

– вирішити задачу оптимізації багаторівневого управління ВД підприємства з урахуванням ризиків.

4. Змістовна постановка задачі багаторівневого ПУ ВД підприємства з урахуванням ризиків

Реально в управлінні ВД підприємства багаторівневість управління, передбачена в моделі, відбивається в залежності від поповнення ресурсів (виробничих і інвестиційних) від вектора управління (обсягів продукції, що випускається в кожен період часу). Таким чином, для кожного фіксованого управління на вибраний період (тобто одного з допустимих сценаріїв ПУ ВД) існує декілька рівнів управління. З верхнього рівня (перший рівень) на підприємстві (наприклад, плановий відділ) передається на наступний рівень (другий рівень) управління. На цьому рівні обчислюються відповідні цьому управлінню обсяги виробничих ресурсів, а також інвестиційні ресурси, необхідні для реалізації цього фіксованого управління. Ці значення потім використовуються для виконання необхідних обчислень в моделі [3, 18]. Така процедура при моделюванні проробляється для кожного можливого управління (гіпотетично, при моделюванні). В цьому і полягає реальна суть процесу багаторівневого (в нашому випадку – дворівневого) управління.

З урахуванням викладеного та спираючись на засади і принципи математичного моделювання й теорії оптимального управління, перейдемо до моделювання задачі ПУ ВД.

Сформулюємо змістовну постановку. Підприємство планує свою ВД, тобто здійснює перехід на випуск продукції на основі шуканого ПУ. Цей процес враховує різні види виробничих факторів, сировини, варіанти використання і зберігання сировини, проміжних і кінцевих продуктів, вплив різних виробничих і зовнішніх факторів, у т.ч. ризиків, інші складники виробничого процесу. Може складатися з певних технологічних способів організації виробництва, які передбачають використання існуючого або заміну (часткову або повну) технологічного обладнання.

ПУ включає значення обсягів виробництва нової продукції, вектор поповнення матеріальних і трудових ресурсів для виробництва та вектор поточних інвестицій для реалізації ВД, які формують сценарій управління відповідного ПУ. Існує можливість використання різних сценаріїв ПУ в залежності від варіації значень відповідних складників виробничого процесу.

Необхідно здійснити оптимальне управління процесом з відповідним сценарієм на заданому часовому проміжку його життєвого циклу. Це необхідно виконати шляхом вибору з множини альтернатив можливих управлінських впливів, щоб загальний критерій ефективності ПУ був максимальним [19]. При чому, якщо розглядається декілька варіантів впровадження різних ПУ на основі відповідних технологій [20], то необхідно також здійснити вибір між ними та знайти оптимальне управління за вибраним критерієм.

Розробивши змістовну економіко-математичну модель ПУ ВД підприємства, перейдемо до формальної постановки та розбудуємо за декілька етапів.

5. Формальна постановка задачі багаторівневого ПУ ВД підприємства з урахуванням ризиків

На заданому цілочисельному проміжку часу $\overline{0,T} = \{0,1,\dots,T\}\ (T > 0)$ розглянемо багатокрокову динамічну систему ВД підприємства. До неї входить підприємство (об'єкт *I*), керованого гравцем *P* (суб'єктом управління). Стан ПУ описуємо лінійним дискретним рекурентним векторним рівнянням наступного вигляду (динамічна модель):

$$\begin{gathered} \bar{x}(t+1) = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{u}(t) + \\ +C(t)\bar{v}(t) + D(t)\bar{w}(t), \\ \bar{x}(0) = \{x_0, I_0\}, \end{gathered} \qquad (1)$$

де $t \in \overline{0,T-1} = \{0,1,\ldots,T-1\}$ $(T>0)$;

$\bar{x}(t) = (\bar{x}_1(t), \bar{x}_2(t), \ldots, \bar{x}_{\bar{n}}(t))' \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$ – вектор фазових змінних або фазовий вектор – набір основних параметрів, що описують стан ПУ у момент часу t; $\mathbf{R}^{\bar{n}}$ – $\bar{n}$-мірний евклідовий простір векторів-стовпців, $\bar{n} \in \mathbf{N}$ – множина натуральних чисел;

$\bar{u}(t) = (\bar{u}_1(t), \bar{u}_2(t), \ldots, \bar{u}_{\bar{p}}(t))' \in \mathbf{R}^{\bar{p}}$ – вектор управління ПУ (управлінський вплив) підприємства, що задовольняє заданому обмеженню:

$$\bar{u}(t) \in \boldsymbol{U}_1(t) \subset \mathbf{R}^{\bar{p}},$$

$$\mathbf{U}_1(t) = \{\bar{u}(t) : \bar{u}(t) \in \{\bar{u}^{(1)}(t), \bar{u}^{(2)}(t), \cdots, \bar{u}^{(N_t)}(t)\} \subset \mathbf{R}^{\bar{p}}\}, \qquad (2)$$

де $\mathbf{U}_1(t)$, для кожного $t \in \overline{0,T-1}$ є скінченна множина векторів, тобто скінченний набір, що складається з $\mathbf{N}_t$ ($\mathbf{N}_t \in \mathbf{N}$) векторів в $\mathbf{R}^{\bar{p}}$, які визначають усі можливі реалізації різних сценаріїв ПУ у момент часу t; $(\bar{p} \in \mathbf{N})$;

$\bar{w}(t) = (\bar{w}_1(t), \bar{w}_2(t), \ldots, \bar{w}_m(t))' \in \mathbf{R}^{\bar{m}}$ – вектор поповнення матеріальних та трудових ресурсів у період часу у період часу t $(t \in \overline{0,T-1})$, який залежить від припустимої реалізації управління $\bar{u}^{(i)}(t) \in U_1(t)$ $(i \in \overline{1,N_t})$ й повинен задовольняти такому заданому обмеженню:

$$\bar{w}(t) \in \mathbf{W}_1(\bar{u}^{(i)}(t)) \subset \mathbf{R}^{\bar{m}},$$

$$\mathbf{W}_1(\bar{u}^{(i)}(t))\{\bar{w}(t) : \bar{w}(t) \in \{\bar{w}^{(1)}(t), \bar{w}^{(2)}(t), \cdots, \bar{w}^{(M_t(i))}(t)\} \subset \mathbf{R}^{\bar{m}}\}, \qquad (3)$$

де $w_1(\bar{u}^{(i)}(t))$ для кожного моменту часу $t \in \overline{0,T-1}$ й управління $\bar{u}^{(i)}(t) \in \boldsymbol{U}_1(t)$ є скінченна множина векторів, тобто скінченний набір, що складається з $M_t(i)$, ($M_t(i) \in \mathbf{N}$, $i \in \overline{1,N_t}$) векторів в $\mathbf{R}^{\bar{m}}$, що визначають усі можливі реалізації різних сценаріїв поповнення матеріальних і трудових ресурсів та інвестиційних ресурсів у момент часу t у досліджуваному процесі; матриця $D(t)$ при векторі $\bar{w}(t)$ визначає інтенсивність його впливу на вектор $\bar{w}(t)$ в кожний момент часу.

Для всіх $t \in \overline{0,T-1}$ кожна припустима реалізація фазового вектора

$$\bar{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_{\bar{n}}(t)) \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$$

задовольняє такому заданому фазовому обмеженню:

$$\bar{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_{\bar{n}}(t)) \in \boldsymbol{X}_1(t) \subset \mathbf{R}^{\bar{n}}, \qquad (4)$$

де $\mathbf{X}_1(t)$ – опуклий, замкнений і обмежений багатогранник простору $\mathbf{R}^{\bar{n}}$, тобто множина, яка обмежує припустимі значення реалізації фазового вектора в момент часу t;

$\bar{v}(t)=(\bar{v}_1(t),\bar{v}_2(t),\ldots,\bar{v}_{\bar{q}}(t))'\in\mathbf{R}^{\bar{q}}$ – вектор ризиків, що впливають на реалізацію ПУ, який у кожний період часу t ($t\in\overline{0,T-1}$) залежить від припустимої реалізації управління $\bar{u}(t)\in\mathbf{U}_1(t)$, що задовольняє заданому обмеженню:

$$\bar{v}(t)\in\mathbf{V}_1(\bar{u}(t))\subset\mathbf{R}^{\bar{q}}, \qquad (5)$$

де $\mathbf{V}_1(\bar{u}(t))$ – опуклий, замкнений і обмежений багатогранник простору $\mathbf{R}^{\bar{q}}$, тобто множина, яка обмежує можливі значення реалізації вектора ризиків під час ПУ у момент часу t; $\bar{q}\in\mathbf{N}$.

Матриці $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ і $D(t)$ у векторному рекурентному рівнянні (1), що описує динаміку ПУ, є дійсні матриці порядків $(\bar{n}\times\bar{n})$, $(\bar{n}\times\bar{p})$, $(\bar{n}\times\bar{m})$ і $(\bar{n}\times\bar{q})$ відповідно й такі, що для всіх $t\in\overline{0,T-1}$ матриця $A(t)$ є невиродженою, тобто для відповідна їй зворотна матриця $A^{-1}(t)$, а ранг матриці $B(t)$ дорівнює $\bar{p}$ (розмірності вектора $\bar{u}(t)$).

Опишемо інформаційні можливості суб'єкта управління (гравця P) під час управління ПУ у дискретній динамічній системі (1)–(5).

Припустимо, що по ходу реалізації ПУ і фіксованого натурального числа $s>>T>0$ у кожний момент часу $t\in\overline{1,T}$ суб'єкт управління має визначені інформаційні можливості. Відповідають реалізаціям фазового вектора системи, управлінського впливу та вектора ризиків на цілочисельному проміжку часу $\overline{-s,t}$. Цей фазовий вектор передує розглянутому під час управління ПУ:

1) відома історія реалізації фазового вектора системи

$$\bar{x}_t(\cdot)=(\bar{x}_1(\cdot)_t,\bar{x}_2(\cdot)_t,\ldots,\bar{x}_{\bar{n}}(\cdot)_t)=$$
$$=\{(\bar{x}_1(\tau),\bar{x}_2(\tau),\ldots,\bar{x}_{\bar{n}}(\tau))\}_{\tau\in\overline{-s,t}}=\{\bar{x}(\tau)\}_{\tau\in\overline{-s,t}};$$

2) відома історія реалізації управлінського впливу системи

$$\bar{u}_t(\cdot)=(\bar{u}_1(\cdot)_t,\bar{u}_2(\cdot)_t,\ldots,\bar{u}_{\bar{p}}(\cdot)_t)=$$
$$=\{(\bar{u}_1(\tau),\bar{u}_2(\tau),\ldots,\bar{u}_{\bar{p}}(\tau))\}_{\tau\in\overline{-s,t-1}}=\{\bar{u}(\tau)\}_{\tau\in\overline{-s,t-1}};$$

3) відома історія реалізації вектора інтенсивностей поповнення виробничих та інвестиційних ресурсів

$$\bar{w}_t(\cdot)=(\bar{w}_1(\cdot)_t,\bar{w}_2(\cdot)_t,\ldots,\bar{w}_{\bar{m}}(\cdot)_t)=$$
$$=\{(\bar{w}_1(\tau),\bar{w}_2(\tau),\ldots,\bar{w}_{\bar{m}}(\tau))\}_{\tau\in\overline{-s,t-1}}=\{\bar{w}(\tau)\}_{\tau\in\overline{-s,t-1}};$$

4) відома історія реалізації вектора ризиків системи

$$\bar{v}_t(\cdot)=(\bar{v}_1(\cdot)_t,\bar{v}_2(\cdot)_t,\ldots,\bar{v}_{\bar{q}}(\cdot)_t)=$$
$$=\{(v_1(\tau),v_2(\tau),\ldots,v_q(\tau))\}_{\tau\in\overline{-s,t-1}}=\{\bar{v}(\tau)\}_{\tau\in\overline{-s,t-1}}.$$

Зазначимо, що на основі цих даних можна розв'язати задачу апостеріорної ідентифікації усіх основних елементів дискретної динамічної системи (1). Необхідно визначити елементи матриць $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ і $D(t)$ у векторному рекурентному рівнянні (3). Воно описує динаміку об'єкта I, тобто об'єкта ПУ [18].

Припустимо, що суб'єктові управління (особі, що приймає рішення при ПУ) – гравцеві P, також відомі рівняння (1) і обмеження (2)–(5).

Якість вибору оптимального управління ПУ з погляду гравця P оцінюється значенням опуклого функціоналу $\tilde{F}:\mathbf{R}^{\bar{n}} \to \mathbf{R}^{1},$ визначеного на можливих реалізаціях фазового вектора $\bar{x}(T) \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$ системи (1) у фінальний момент часу T.

Тоді для системи (1)–(5) ціль мінімаксного багаторівневого ПУ з погляду гравця P може бути сформульована в наступний спосіб. На заданому проміжку часу $\overline{0,T}$ потрібно, щоб гравець P сформував управління $\bar{u}_T^{(e)}(\cdot)=\{\bar{u}_T^{(e)}(t)\}_{t\in\overline{0,T-1}}$ (для всіх $t\in\overline{0,T-1}:\bar{u}_T^{(e)}(t)\in\mathbf{U}_1(t)$). Необхідно, щоб було мінімальним значення опуклого функціоналу $\tilde{F},$ визначеного на реалізаціях вектора $\bar{x}(t)\in\mathbf{R}^{\bar{n}}.$ Де $\bar{x}(T)$ є реалізація фазового вектора системи в момент часу T і вектора $\bar{w}_T(\cdot)$ при найгірших (тобто таких, що максимізують значення функціоналу $\tilde{F}$) допустимих реалізаціях вектора ризиків $\bar{v}_T(\cdot)=\{\bar{v}_T(t)\}_{t\in\overline{0,T-1}}$ (для всіх $t\in\overline{0,T-1}:\bar{v}_T(t)\in\boldsymbol{V}_1(\bar{u}_T^{(e)}(t))$). При цьому реалізації $\bar{w}_T(\cdot)=\{\bar{w}_T(t)\}_{t\in\overline{0,T-1}}$ (для всіх $t\in\overline{0,T-1}:\bar{w}_T(t)\in\boldsymbol{W}_1(\bar{u}_T^{(e)}(t))$) вектора інтенсивності поповнення виробничих та інвестиційних ресурсів сприяють досягненню цілей гравця P. Тобто вибір (за завданням гравця P) направлений на мінімізацію цього функціоналу відповідно до обраного ним управління.

6. Вирішення задачі багаторівневого ПУ ВД підприємства з урахуванням ризиків

Після того, як визначено всі параметри моделі, переходимо до вирішення задачі багаторівневого ПУ з урахуванням ризиків:

1. Формуємо множину альтернатив можливих управлінь ПУ $U(t)$. Компоненти першої групи векторів управління з цієї множини представляють собою обсяги випуску продукції в період часу (згідно відповідного ПУ) (перший рівень управління).
2. На підставі значень першої групи векторів управління ПУ будуємо множину поповнення матеріальних, трудових ресурсів та інвестиційних ресурсів $W(\bar{u}(t))$ (другий рівень управління).
3. Визначаємо множину допустимих ризиків $V(t)$ з відповідними обмеженнями.
4. Послідовно фіксуємо управління з відповідним вектором поповнення матеріальних і трудових ресурсів, інвестиційних ресурсів та «перебираємо» всі ризики з множини допустимих. Будуємо відповідні прогнозні множини областей досяжності G для фінальних векторів $x(T)$ стану системи в момент T.
5. На множинах областей досяжності вирішуємо задачу дискретної оптимізації за допомогою мінімаксу та знаходимо оптимальне управління, яке надає гарантований результат вирішення задачі ПУ ВД підприємства при впливі будь-яких ризиків з множини допустимих. Схема багаторівневого управління під час виробничо-комерційного циклу ПУ представлена на рис. 2.

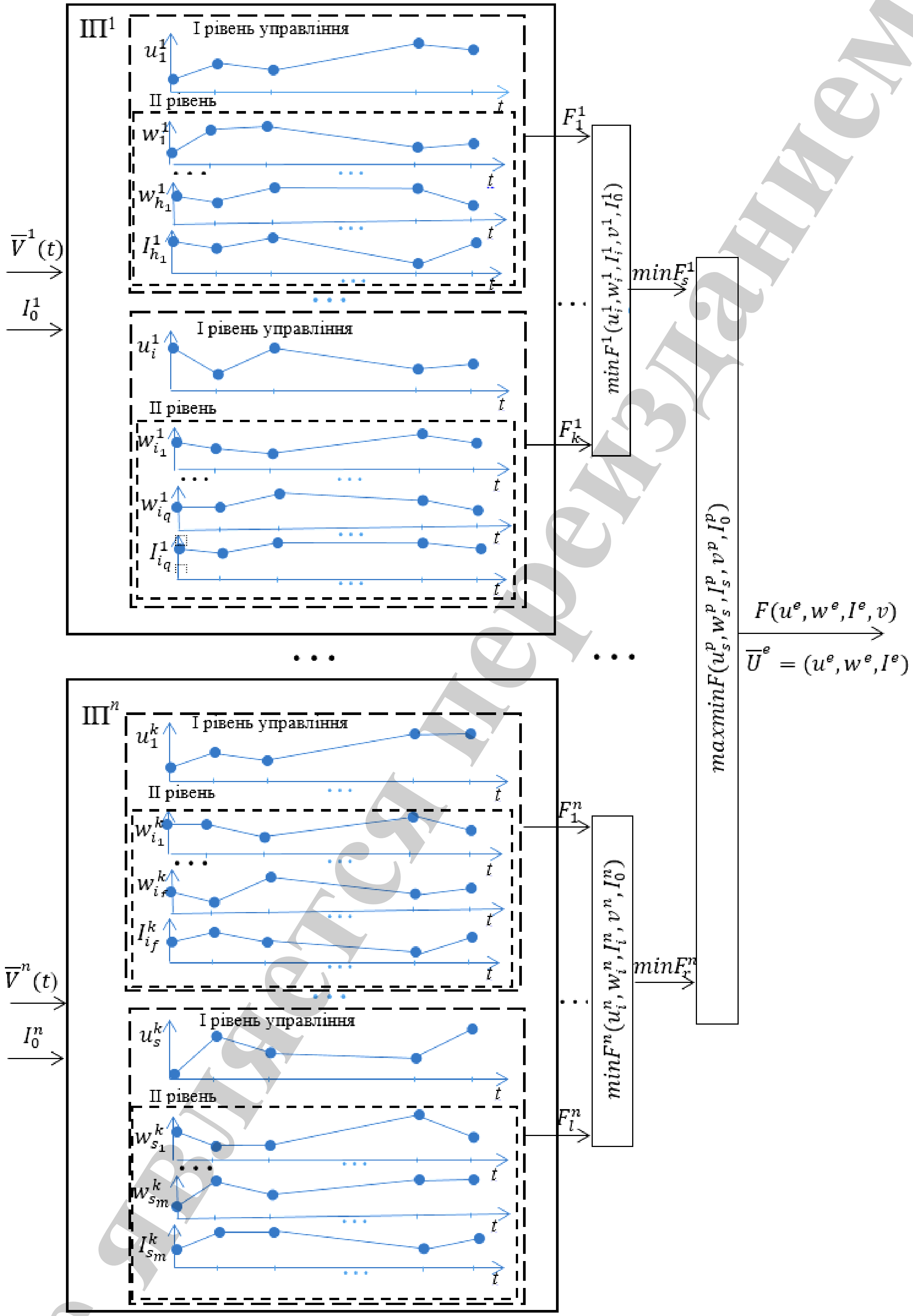

Рис. 2. Схема багаторівневого процесу управління

Уведемо ряд визначень, які необхідні для формалізації задачі мінімаксного багаторівневого ПУ для розглянутої дискретної динамічної системи (1)−(5).

Для $k\in\mathbf{N}$ й будь-якого цілочисельного проміжку $\overline{i,j}$ $(i\le j)$ символом $S_k(\overline{i,j})$ будемо позначати метричний простір функцій цілочисельного аргументу $\phi\colon \overline{i,j}\to R^k$, у якому метрику ρ_k задаємо співвідношенням:

$$\rho_k(\phi_1(\cdot),\phi_2(\cdot))=$$
$$=\max_{t\in\overline{i,j}}\|\phi_1(t)-\phi_2(t)\|_k\ \ ((\phi_1(\cdot),\phi_2(\cdot)\in_k S_k(\overline{i,j})\times S_k(\overline{i,j})),$$

а символом *comp* ($\boldsymbol{S}_k(\overline{i,j})$) – множину всіх непорожніх і компактних у змісті цієї метрики підмножин простору $\boldsymbol{S}_k(\overline{i,j})$.

Тут і далі для будь-яких множин *X* і *Y* множина *X*×*Y* є добуток *X* і *Y*, тобто множина всіх пар (*x*, *y*), таких що $x\in X$, $y\in Y$ (аналогічне позначення використовуємо й для більшого числа множин).

Використовуючи обмеження (2), визначимо множину $\boldsymbol{U}(\overline{\tau,\vartheta})\subset\mathbf{R}^{(\bar{p}\times(\vartheta-\tau))}$ управлінь $\bar{u}(\cdot)=\{\bar{u}(t)\}_{t\in\overline{\tau,\vartheta-1}}$ гравця *P* на проміжку часу $\overline{\tau,\vartheta}\subseteq\overline{0,T}$ $(\tau<\vartheta)$ співвідношенням

$$\mathbf{U}(\overline{\tau,\vartheta})=\{\bar{u}(\cdot)\colon\ \bar{u}(\cdot)\in\mathbf{R}^{(\bar{p}\times(\vartheta-\tau))},$$

$$\forall t\in\overline{\tau,\vartheta-1},\ \bar{u}(t)\in\bar{\mathbf{U}}_1(t)\},\tag{6}$$

яке є множиною всіх допустимих реалізацій управлінь $\bar{u}(\cdot)$ (всіх можливих сценаріїв реалізації багаторівневого ПУ) на цілочисельному проміжку часу $\overline{0,T}$ і, зважаючи на зроблене припущення, є скінченною множиною векторів простору $\mathbf{R}^{(\bar{p}\times(\vartheta-\tau))}$.

Для кожного фіксованого управління $\bar{u}(\cdot)\in\boldsymbol{U}(\overline{\tau,\vartheta})$, використовуючи обмеження (3), визначимо множину $\boldsymbol{W}(\overline{\tau,\vartheta};\bar{u}(\cdot))\subset\mathbf{R}^{(\bar{m}\times(\vartheta-\tau))}$ інтенсивностей $\bar{w}(\cdot)=\{\bar{w}(t)\}_{t\in\overline{\tau,\vartheta-1}}$ поповнення виробничих та інвестиційних ресурсів на проміжку часу $\overline{\tau,\vartheta}\subseteq\overline{0,T}$ $(\tau<\vartheta)$, що відповідають $\bar{u}(\cdot)$, таким співвідношенням:

$$\boldsymbol{W}(\overline{\tau,\vartheta};\bar{u}(\cdot))=\{\bar{w}(\cdot)\colon\bar{w}(\cdot)\in\mathbf{R}^{(\bar{m}\times(\vartheta-\tau))}(\overline{\tau,\vartheta-1}),$$
$$\forall t\in\overline{\tau,\vartheta-1},\ \bar{w}(t)\in\bar{\boldsymbol{W}}_1(\bar{u}(t))\},\tag{7}$$

яке є множиною всіх припустимих реалізацій інтенсивностей поповнення виробничих та інвестиційних ресурсів $\bar{w}(\cdot)$ (усіх можливих сценаріїв реалізації таких вектор-функцій) на цілочисельному проміжку часу $\overline{0,T}$ і з огляду на зроблене припущення є скінченною множиною векторів простору $\mathbf{R}^{(\bar{m}\times(\vartheta-\tau))}$.

Для кожного фіксованого управління $\bar{u}(\cdot)\in\mathbf{U}(\overline{\tau,\vartheta})$, використовуючи обмеження (3), визначимо множину $\boldsymbol{V}(\overline{\tau,\vartheta};\bar{u}(\cdot))$ ризиків $\bar{v}(\cdot)=\bar{v}(t)_{t\in(\overline{\tau,\vartheta-1})}$ на проміжку часу $\overline{\tau,\vartheta}\subseteq\overline{0,T}$ $(\tau<\vartheta)$ співвідношенням:

$$\begin{aligned}&\mathbf{V}(\overline{\tau,\vartheta};\bar{u}(\cdot))=\{\bar{v}(\cdot):\bar{v}\in\mathbf{S}_{\bar{q}}(\overline{\tau,\vartheta-1}),\\&\forall t\in\overline{\tau,\vartheta-1},\,\bar{v}(t)\in\bar{\mathbf{V}}_1(\bar{u}(t))\}\end{aligned}\tag{8}$$

яке є множиною всіх допустимих реалізацій вектора ризиків $\bar{v}(\cdot)$ (всіх допустимих сценаріїв реалізації вектора ризиків під час управління ПУ) на цілочисельному проміжку часу $\overline{0,T}$.

Назвемо набір $g(\tau)=\{\tau,\bar{x}(\tau)\}\in\overline{0,T}\times\boldsymbol{R}^{\bar{n}}$ $(g(0)=g_0=\{0,\bar{x}_0,I_0\})$ – *τ*-позицією (поточним станом на відповідному етапі досліджуваного проміжку часу з урахуванням початкових параметрів фазового вектора та початкових інвестицій) гравця *P* у дискретній динамічній системі (1)−(5) під час ПУ. Зазначимо, що під час формування *τ*-позиції використовують усю інформацію, яку має гравець *P* у процесі ПУ на проміжку часу $\overline{0,\tau}$.

Для всіх $\tau\in\overline{0,T}$ визначимо також множину

$$\hat{\boldsymbol{G}}(\tau)=\{\tau\}\times\mathbf{R}^{\bar{n}}\quad(\hat{\boldsymbol{G}}(0)=\hat{\boldsymbol{G}}_0=\{g(0)=g_0:\ g_0=\{0,\bar{x}_0,I_0\}\in\{0\}\times\mathbf{R}^{\bar{n}}\})$$

всіх припустимих *τ*-позицій гравця *P*.

Далі для фіксованого проміжку часу $\overline{\tau,\vartheta}\in\overline{0,T}$ $(\tau<\vartheta)$, *τ*-позиції $g(\tau)=\{\tau,\bar{x}(\tau)\}\in\hat{\boldsymbol{G}}(\tau)$ гравця *P*, його управління $\bar{u}(\cdot)\in\boldsymbol{U}(\overline{\tau,\vartheta})$ і припустимої реалізації вектора $\bar{w}(\cdot)\in\mathbf{W}(\overline{\tau,\vartheta};u(\cdot))$ визначимо таку множину:

$$\begin{aligned}&\mathbf{G}(\tau,g(\tau),\vartheta,\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot))=\{g(\vartheta);g(\vartheta)=\{\vartheta,\bar{x}(\vartheta)\}\in\hat{\mathbf{G}}(\vartheta),\\&\bar{x}(\vartheta)=\bar{x}_{\overline{\tau,\vartheta}}(\vartheta;\bar{x}(\tau),\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot)),\ \bar{v}(\cdot)\in\mathbf{V}(\overline{\tau,\vartheta};\bar{u}(\cdot))\},\end{aligned}\tag{9}$$

яку будемо називати множиною припустимих ϑ-позиції гравця *P*, що відповідає його *τ*-позиції $g(\tau)$ і парі $(\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot))$.

Тут вектор $\bar{x}(\vartheta)=\bar{x}_{\overline{\tau,\vartheta}}(\vartheta;\bar{x}(\tau),\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot))\in\mathbf{R}^{\bar{n}}$ визначає переріз руху об'єкта *I* на проміжку часу $\overline{\tau,\vartheta}$ в момент часу ϑ під час ПУ, породженого набором $(\bar{x}(\tau),\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot))$.

Для оцінювання якості розглянутого процесу мінімаксного ПУ введемо в розгляд скалярну цільову функцію $\mathrm{F}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau),\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot))$, значення якої для всіх припустимих на проміжку часу $\overline{\tau,T}$ реалізацій наборів

$$\begin{aligned}&(g(\tau),\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot))\in\hat{\mathbf{G}}(\tau)\times\mathbf{U}(\overline{\tau,T})\times\\&\times\mathbf{W}(\overline{\tau,T};\bar{u}(\cdot))\times\mathbf{V}(\overline{\tau,T};\bar{u}(\cdot)),\end{aligned}$$

де

$$g(\tau)=\{\tau,\bar{x}(\tau)\}\in\hat{\mathbf{G}}(\tau),$$

$$\bar{u}(\cdot)=\{\bar{u}(t)\}_{t\in\overline{\tau,T-1}}\in\mathbf{U}(\overline{0,T}),$$

$$\bar{w}(\cdot) = \{\bar{w}(t)\}_{t \in \overline{\tau, T}} \in \mathbf{W}(\overline{\tau, T}; \bar{u}(\cdot)),$$

$$\bar{v}(\cdot) = \{\bar{v}(t)\}_{t \in \overline{\tau, T-1}} \in \mathbf{V}(\overline{0, T}; \bar{u}(\cdot)),$$

визначають відповідно до такого співвідношення:

$$\begin{aligned}
&\mathbf{F}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau), \bar{u}(\cdot), \bar{w}(\cdot), \bar{v}(\cdot)) = \\
&= \sum_{k=1}^{r} \mu_k \cdot \mathbf{\Phi}^{(k)}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau), \bar{u}(\cdot), \bar{w}(\cdot), \bar{v}(\cdot)) = \\
&= \sum_{k=1}^{r} \mu_k \cdot F^{(k)}_{\overline{\tau,T}}(\bar{x}_{\overline{\tau,T}}(T; \bar{x}(\tau), \bar{u}(\cdot), \bar{w}(\cdot), \bar{v}(\cdot)) = \\
&= \sum_{k=1}^{r} \mu_k \cdot F^{(k)}_{\overline{\tau,T}}(\bar{x}(T)) = \tilde{\mathbf{F}}(\bar{x}(T)),
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\forall k \in \overline{1, r}: \mu_k \geq 0, \; \sum_{k=1}^{r} \mu_k = 1,$$

де

$$\bar{x}(T) = \bar{x}_{\overline{\tau,T}}(T; \bar{x}(\tau), \bar{u}(\cdot), \bar{w}(\cdot), \bar{v}(\cdot)),$$

а $\tilde{F}$ є опуклий функціонал.

Зазначимо, що цільова функція (функціонал) $\mathbf{F}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau), \bar{u}(\cdot), \bar{w}(\cdot), \bar{v}(\cdot))$ є опуклою скалярною згорткою векторного функціоналу

$$\mathbf{\Phi}_{\overline{\tau,T}} = (\mathbf{\Phi}^{(1)}_{\overline{\tau,T}}, \mathbf{\Phi}^{(2)}_{\overline{\tau,T}}, \ldots, \mathbf{\Phi}^{(r)}_{\overline{\tau,T}}).$$

Тобто функцію формують відповідно до методу скаляризації векторних цільових функцій з невід'ємними ваговими коефіцієнтами μ_k, $k \in \overline{1, r}$. Коефіцієнти можна визначати, наприклад, експертним шляхом або на підставі знання статистичної інформації про історію реалізації основних параметрів розглянутого ПУ.

Тоді на підставі викладеного вище можна сформулювати задачу мінімаксного багаторівневого ПУ для динамічної системи (1)−(5), (10) у такий спосіб.

Будемо вважати, що шляхом впливу на нього можливим вибором своїх припустимих управлінь $\bar{u}(\cdot) \in \boldsymbol{U}(\overline{\tau, T})$ гравець P на проміжку часу $\overline{\tau, T} \subseteq \overline{0, T}$ $(\tau < T)$ зацікавлений у такому результаті ПУ, $\bar{u}(\cdot) \in \boldsymbol{U}(\overline{\tau, T})$) коли функціонал $\mathbf{F}_{\overline{\tau,T}}$, визначений співвідношенням (10), приймає найменше можливе значення, враховуючи, що можуть реалізуватися найгірші для нього значення вектора ризиків $\bar{v}(\cdot) \in \mathbf{V}(\overline{\tau, T}; \bar{u}(\cdot))$. Тобто що максимізує цей функціонал, а реалізації $\bar{w}(\cdot) \in \mathbf{W}(\overline{\tau, T}; \bar{u}(\cdot))$ сприяють досягненню мети гравця P.

Досягнення цієї мети гравцем P реалізується в рамках розв'язання нелінійної багатокрокової задачі мінімаксного багаторівневого термінального управління для динамічної системи (1)−(5), (10), що описує ПУ за наявності ризиків [3, 5].

Для фіксованих проміжку часу $\overline{\tau,T} \subseteq \overline{0,T}$ $(\tau < T)$ і реалізації τ-позиції $g(\tau) = \{\tau, \bar{x}(\tau)\} \in \hat{\mathbf{G}}(\tau)$ ($g(0)=g_0$) гравця P у динамічній системі (1)–(5), (10), що описує ПУ, потрібно знайти множину

$$\mathbf{U}_{\mathbf{F}}^{(e)}(\overline{\tau,T}, g(\tau)) \subseteq \mathbf{U}(\overline{\tau,T})$$

мінімаксних управлінь $\bar{u}^{(e)}(\cdot) \in \mathbf{U}(\overline{\tau,T})$ гравця P, що визначаємо співвідношенням:

$$\mathbf{U}_{\boldsymbol{F}}^{(e)}(\overline{\tau,T}, g(\tau)) = \{\bar{u}^{(e)}(\cdot):\ \bar{u}^{(e)}(\cdot) \in \mathbf{U}(\overline{\tau,T}),$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{F}_{\overline{\tau,T}}^{(\boldsymbol{e})} &= \max_{\bar{v}(\cdot)\in\mathbf{V}(\overline{\tau,T};\bar{u}^{(e)}(\cdot))} \mathbf{F}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau),\bar{u}^{(e)}(\cdot),\bar{w}^{(e)}(\cdot),\bar{v}(\cdot)) = \\
&= \min_{\bar{w}(\cdot)\in\mathbf{W}(\overline{\tau,T};\bar{u}^{(e)}(\cdot))} \max_{\bar{v}(\cdot)\in\mathbf{V}(\overline{\tau,T};\bar{u}^{(e)}(\cdot))} \boldsymbol{F}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau),\bar{u}^{(e)}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot)) = \\
&= \min_{\bar{u}(\cdot)\in\mathbf{U}(\overline{\tau,T})} \min_{\bar{w}(\cdot)\in\mathbf{W}(\overline{\tau,T};\bar{u}(\cdot))} \max_{\bar{v}(\cdot)\in\mathbf{V}(\overline{\tau,T};u(\cdot))} \mathbf{F}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau),\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot)) = \\
&= \min_{\bar{u}(\cdot)\in\mathbf{U}(\overline{\tau,T})} \min_{\bar{w}(\cdot)\in\mathbf{W}(\overline{\tau,T};\bar{u}(\cdot))} \max_{\bar{v}(\cdot)\in\mathbf{V}(\overline{\tau,T};\bar{u}(\cdot))} \tilde{\mathbf{F}}(\bar{x}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau),\bar{u}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot))) = \\
&= \min_{\bar{w}(\cdot)\in\mathbf{W}(\overline{\tau,T};\bar{u}^{(e)}(\cdot))} \max_{\bar{v}(\cdot)\in\mathbf{V}(\overline{\tau,T};\bar{u}^{(e)}(\cdot))} \tilde{\mathbf{F}}(\bar{x}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau),\bar{u}^{(e)}(\cdot),\bar{w}(\cdot),\bar{v}(\cdot))) = \\
&= \max_{\bar{v}(\cdot)\in\mathbf{V}(\overline{\tau,T};\bar{u}^{(e)}(\cdot))} \tilde{\mathbf{F}}(\bar{x}_{\overline{\tau,T}}(g(\tau),\bar{u}^{(e)}(\cdot),\bar{w}^{(e)}(\cdot),\bar{v}(\cdot))) = c_{\boldsymbol{F}}^{(e)}(\overline{\tau,T}, g(\tau))
\end{aligned} \tag{11}$$

як реалізацію скінченної послідовності тільки однокрокових операцій.

Тут функціонал $\boldsymbol{F}_{\overline{\tau,T}}$ визначений співвідношенням (10).

Число $c_{\mathbf{F}}^{(e)}(\overline{\tau,T}, g(\tau)) = \boldsymbol{F}_{\overline{\tau,T}}^{(e)}$ будемо називати гарантованим (мінімаксним) результатом процесу мінімаксного багаторівневого ПУ для гравця P на проміжку часу $\overline{\tau,T}$ для дискретної динамічної системи (1)–(5), (10) щодо його τ-позиції $g(\tau)$ і функціоналу $\mathbf{F}_{\overline{\tau,T}}$.

Врахуємо скінченність множин припустимих управлінь $\mathbf{U}(\overline{\tau,T})$ і припустимих інтенсивностей поповнення виробничих та інвестиційних ресурсів $\mathbf{W}(\overline{\tau,T};\bar{u}(\cdot))$, що відповідають фіксованому управлінню $\bar{u}(\cdot) \in \mathbf{U}(\overline{\tau,T})$, і співвідношення (10), (11). Тоді можна показати, що розв'язок задачі ПУ ВД підприємства з урахуванням ризиків існує. Його зводять до розв'язання скінченного числа задач лінійного й опуклого математичного програмування, а також скінченного числа задач дискретної оптимізації.

7. Впровадження результатів дослідження

Результати дослідження впроваджено для ПУ виробництва біоетеанола. Біоетанол отримують зброджуванням цукру за технологією, яка використовується у виробництві пива та харчового спирту. Етанол відокремлюють від бражки в дистиляційних колонах і додатково очищають в ректифікаційних колонах, на виході яких отримують суміш етанолу з водою. На етапі зневоднення з цієї суміші видаляють залишки води, і отримують безводний біоетанол. Щоб отримати паливний етанол, спирту-сирцю потрібно видалити воду. Воду можна видаляти за допомогою альтернативних технологій: молекулярних сит або дифузійного випаровування через мембрану. Саме за допомогою запропонованого методу вдалося вибрати ефективний технологічний спосіб.

Розглянемо моделювання ПУ на прикладі державного підприємства (ДП) «Івашківський спиртзавод» (Україна). Раніше завод спеціалізувався на виробництві спирту з меляси, що поставляли на лікеро-горілчані заводи. Але ринок збуту цього спирту був обмежений, тому було прийнято рішення перепрофілювати завод на виробництво технічних продуктів, зокрема − біоетанолу. Сировиною для його виготовлення є меляса − відходи виробництва цукрових заводів. Було прийнято рішення доповнення технологічного ланцюжку заводу обладнанням для зневоднення спирту. Необхідно визначитися, який з альтернативних ПУ виробництва біоетанолу є більш ефективним – процес на основі застосування молекулярних сит або дифузійного випаровування через мембрану.

Розбудуємо модель ПУ ДП «Івашківський спиртзавод». Тому що підприємство працює лише один рік, для дослідження ПУ будемо розглядати інтервал управління, рівний одному року. Його було розбито поквартально на чотири періоди з проміжком у три місяці. У якості альтернативних ПУ досліджували виробництво біоетенолу з використанням технології молекулярних сит та технології дифузійного випаровування.

Таким чином, для модельного прикладу розглянемо окремі вектори ПУ з множини можливих альтернатив:

1) при застосуванні технології молекулярних сит (перший ПУ);

2) на основі технології дифузійного випаровування (другий ПУ).

Перша складова вектора управління − обсяги випуску продукції в кожний період часу на основі застосування технології дифузійного випаровування.

На основі нормативно-технологічної документації (ГОСТ 667-73, ГОСТ 2184-77, ГОСТ 857-95, ГОСТ 3118-77, ТУ 6-01-193-80 і т.п.) з'ясовано, що при виробництві біоетанолу використовують наступні матеріальні і трудові ресурси $w(t)$: меляса (т), бензин (т), МТБЄ (т), кислота сірчана (моногідрат) (кг), амофос (кг), карбамід (кг), олеїнова кислота (кг), НАБАК (кг), праця робітників, (тис.люд.год), газ (тис.м3), електроенергія (тис.кВт·год).

На підставі аналізу інформації з журналів порушення технологічних регламентів ПУ, інформації з сервісних центрів обслуговування застосовуваного технологічного обладнання, поточного фінансово-бухгалтерського обліку, виконання договорів на поставку сировини та матеріалів підприємства «Івашківський спиртзавод» з поставниками ресурсів з'ясовано, що найбільш істотними ризиками для досліджуваного підприємства та відповідних ПУ виявились поломка технологічного обладнання під час його налагодження для запуску ПУ, недостатність потрібних обсягів меляси та збільшення цін на неї, а також порушення норм технологічного процесу внаслідок нестабільності енергозабезпечення.

На підставі аналізу фінансово-бухгалтерського обліку підприємства «Івашківський спиртзавод» з'ясовано, що фінансово-економічні ризики, що впливають на фінансовий результат підприємства, під час упровадження розглянутих технологій протягом досліджуваного року не мали суттєвого значення для кожного ПУ, крім підвищення цін на сировину (мелясу), яке також є однаковим як для першого, так і для другого ПУ.

Розраховано комплексний функціонал F для кожної пари векторів $u(t)$ та

$v(t)$, використовуючи метод скалярної згортки зі знайденими ваговими коефіцієнтами на підставі розрахунку факторних навантажень частинних цільових критеріїв: $F(u_1(T), v_1(T))$=0,47, : $F(u_2(T), v_2(T))$=0,59.

Таким чином, результат ПУ буде гарантованим (мінімаксним) для вектору управління $u_2(T)$ при векторі ризиків $v_2(T)$. Комплексні результати моделювання представлено в табл. 1.

Таблиця 1
Результати моделювання управління ВД ДП «Івашківський спиртзавод»

Період	Значення вектора управління ВД: обсяги випуску продукції $u(t)$, вектори поповнення матеріальних і трудових ресурсів $w(t)$ та інвестицій $I(t)$
1	$u(1)$=3000; $w(1)$=(10000; 5; 0,5; 70; 5; 3; 3; 0,2; 71,52; 1367,07; 721,5)′; $I(1)$=2000
2	$u(2)$=3100; $w(2)$=(14350; 40; 5; 75; 4,1; 3,5; 3,5; 0; 73,904; 1412,64; 745,55)′; $I(2)$=1800
3	$u(3)$=3050; $w(3)$=(14500; 38,3; 4; 75,5; 6,5; 2,1; 3,4; 0; 72,712; 1344,29; 733,525)′; $I(3)$=500
4	$u(4)$=2950; $w(4)$=(14000; 35,7; 4; 71,5; 5; 2,7; 4; 0; 70,328; 1389,86; 709,475)′; $I(4)$=100

Таким чином, можливо зробити висновок, що з урахуванням допустимих ризиків, для зневоднення спирту при виробництві біоетанолу більш ефективним ПУ буде впровадження із застосуванням технології молекулярних сит, ніж дифузійного випаровування. Такий варіант роботи заводу дозволяє скоротити технологічну схему, зменшити витрати на забезпечення ПУ ВД та збільшити рентабельність виробництва.

8. Обговорення результатів дослідження

Достоїнство проведених досліджень міститься у тому, що вони дозволяють вирішити задачу динамічної оптимізації процесу багаторівневого управління ВД підприємства з урахуванням ризиків. При цьому застосовано інструментарій оптимізації, у якому, на відміну від методів динамічного програмування та принципу максимуму Понтрягіна, застосовано метод побудови прогнозних множин (областей досяжності) станів управління ВД в кінцевий момент інтервалу управління.

Запропонований метод дає змогу звести багатокрокову задачу управління ВД підприємства з урахуванням ризиків до реалізації скінченної послідовності однокрокових оптимізаційних задач. Таким чином, отримані результати дослідження дозволяють уникнути труднощів, пов'язаних з великою розмірністю вихідної задачі.

До недоліків дослідження можна віднести той факт, що ризики, враховувані в моделі, є лише детермінованими величинами. Це само по собі викликає труднощі визначення величин можливих збитків, пов'язаних з впливом ризиків. Більш того, у реальних умовах ВД підприємства можливо виникнення ситуацій, коли ризики є ймовірнісними величинами.

Таким чином, розвиток даного дослідження може полягати у врахуванні ризиків стохастичного характеру. У цьому випадку доречним буде уведення в модель багаторівневого управління ВД підприємства детермінованих та стохастичних ризиків.

В подальшому результати дослідження можуть стати основою для розробки системи програмного забезпечення управління ВД підприємства з урахуванням Це дасть змогу автоматизувати процес багаторівневого управління ВД та налаштувати на умови роботи конкретних підприємств.

9. Висновки

1. Досліджено проблеми ПУ ВД підприємства. Сформульовано змістовну постановку задачі багаторівневого управління ВД підприємства при наявності ризиків. Визначено, що модель ПУ ВД ускладнено особливостями, пов'язаними з неповнотою й браком інформації, неоднорідністю й нестаціонарністю значень параметрів моделі, варіативністю технологій виробництва тощо.

2. Формалізовано модель багаторівневого управління виробничим процесом підприємства для організації мінімаксного багаторівневого управління в обраному класі допустимих стратегій управління.

3. Знайдено рішення сформульованої задачі мінімаксного багаторівневого управління. Це дозволяє отримати оптимальний гарантований (мінімаксний) результат ПУ ВД підприємства з урахуванням ризиків. Запропоновано метод, заснований на побудові прогнозних множин (областей досяжності) розглянутої динамічної моделі. Застосування такого методу дозволить звести вихідну багатокрокову задачу динамічної оптимізації до реалізації скінченної послідовності однокрокових задач дискретної оптимізації. Апробацію моделі здійснено в умовах реального виробництва. Здобуті результати впроваджено в управління ВД концерну «Укрспирт» на прикладі державного підприємства «Івашківський спиртзавод». Застосування здобутих результатів дали змогу скоротити технологічну схему, зменшити витрати на забезпечення ВД та вплив ризиків. Найбільш істотними з яких виявились поломка технологічного обладнання під час його налагодження для запуску ПУ, недостатність потрібних обсягів сировини (меляси) та збільшення цін на неї, порушення норм технологічного процесу внаслідок нестабільності енергозабезпечення.

Література

1. Bellman R. Methods of Nonlinear Analysis. Vol. I. California Academic Press New York, 1970. 342 p.
2. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления / под ред. Б. С. Разумихина. Москва: Наука, 1969. 118 с.
3. Бабенко В. А. Формирование экономико-математической модели динамики процесса управления инновационными технологиями на предприятиях АПК // Актуальні проблеми економіки. 2013. № 1 (139). С. 182–186.

4. Komar M., Nehrey M. Innovative process modeling of small business in Ukraine // Evropský Časopis Ekonomiky a Managementu. 2016. Vol. 2, Issue 3. P. 19–24.

5. Шориков А. Ф., Бабенко В. А. Оптимизация гарантированного результата в динамической модели управления инновационным процессом на предприятии // Экономика региона. 2014. № 1 (37). С. 196–202.

6. Гонтарева І. В. Вплив своєчасності відтворювальних процесів на системну ефективність розвитку підприємства // Актуальні проблеми економіки. 2011. № 2 (116). С. 69–76.

7. Математическая теория оптимальных процессов / Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. М.: Наука, 1969. 392 с.

8. Development of the model of minimax adaptive management of innovative processes at an enterprise with consideration of risks / Babenko V., Romanenkov Y., Yakymova L., Nakisko A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 4 (89). P. 49–56. doi: 10.15587/1729-4061.2017.112076

9. Понтрягин Л. С. Принцип максимума в оптимальном управлении. 2-ое изд., стереот. М., 2004. 64 с.

10. Vasylieva N. Cluster models of households' agrarian production development // Economic Annals-XXI. 2016. Vol. 158, Issue 3-4 (2). P. 13–16. doi: 10.21003/ea.v158-03

11. Theory and practice of controlling at enterprises in international business / Malyarets L., Draskovic M., Babenko V., Kochuyeva Z., Dorokhov O. // Economic Annals-XXI. 2017. Vol. 165, Issue 5-6. P. 90–96. doi: 10.21003/ea.v165-19

12. Babenko V. O. Modeling of factors influencing innovation activities of agricultural enterprises of Ukraine // Scientific Bulletin of Polissia. 2017. Vol. 2, Issue 1 (9). P. 115–121. doi: 10.25140/2410-9576-2017-2-1(9)-115-121

13. Teece D. J. Business Models, Business Strategy and Innovation // Long Range Planning. 2010. Vol. 43, Issue 2-3. P. 172–194. doi: 10.1016/j.lrp.2009.07.003

14. Rafalski R. A New Concept of Evaluation of the Production Assets // Foundations of Management. 2012. Vol. 4, Issue 1. doi: 10.2478/fman-2013-0005

15. The Business Model Innovation Factory: How to Stay Relevant When The World is Changing / S. Kaplan (Ed.). Wiley, 2015. doi: 10.1002/9781119205234

16. Martinelli R. J., Waddell J. M., Rahschulte T. J. Program Management, in Program Management for Improved Business Results. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2014. P. 3–26. doi: 10.1002/9781118904367.ch1

17. Formation of the concept of intellectualization information provision for managing an enterprise / Grinko A., Bochulia T., Grynko P., Yasinetska I., Levchenko I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 3 (89). P. 4–14. doi: 10.15587/1729-4061.2017.111859

18. The place and perspectives of Ukraine in international integration space / Babenko V., Pasmor M., Pankova J., Sidorov M. // Problems and Perspectives in Management. 2017. Vol. 15, Issue 1. P. 80–92. doi: 10.21511/ppm.15(1).2017.08

19. Аналітичне моделювання в інформаційній системі підприємств ресторанного бізнесу за умов невизначеності / Бочуля Т. В., Чернікова І. Б., Кваша О. О., Коробкіна І. С. // ScienceRise. 2017. Т. 5, № 2. С. 6–11. doi: 10.15587/2313-8416.2017.102378

20. Шориков А. Ф. Алгоритм решения задачи оптимального терминального управления в линейных дискретных динамических системах // Информационные технологии в экономике. Теория, модели и методы. 2005. С. 119–138.