Національна академія наук України
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова

На правах рукопису

ВЕРХОТУРОВА Світлана Дмитрівна

УДК 517.968

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АГРЕГОВАНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗВИТКУ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи в наукових дослідженнях

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Київ — 1995

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00754962 (X)
Ав 33.611

Робота виконана в Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор ЯЦЕНКО Юрій Петрович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук ОСТАПЕНКО Валентин Володимирович,
кандидат фізико-математичних наук БІЛЕНКО Валентин Іванович

Провідна організація: Інститут математики НАН України.

Захист відбудеться «——» ———— 199 р. о——год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.39.02 при Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України за адресою:
252022 Київ 22, проспект Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічному архіві інституту.

Автореферат розісланий «——» ———— 199 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради СИНЯВСЬКИЙ В. Ф.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

АВ-33.677

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Бурхливий розвиток сучасного виробництва поставив перед людством гостру проблему охорони навколишнього середовища (НС). Тому важливим завданням науки в даний час є прогноз розвитку еколого-економічних систем (ЕЕС) з урахуванням природоохоронної діяльності. В умовах боротьби за чистоту НС ефективним засобом керування є процеси технологічного оновлення виробництва, які полягають у ліквідації на підприємствах застарілих виробничих потужностей з низькими екологічними показниками та заміні їх більш досконалим обладнанням. В зв'язку з цим актуальною задачею теорії керування при моделюванні розвитку ЕЕС є задача оцінки оптимальних строків служби обладнання з урахуванням його шкідливого впливу на НС.

Зручним математичним апаратом для розв'язування зазначених задач є динамічні інтегральні моделі (ІМ) з керованою пам'яттю, які вперше були запропоновані В.М.Глушковим та досліджувалися протягом 1977-1995 рр. в Інституті кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України. У дисертації розглядаються еколого-економічні застосування цих ІМ.

Метою дисертації є побудова модифікацій агрегованих ІМ технологічного оновлення виробництва з урахуванням технічного прогресу та негативного впливу виробництва на НС, теоретичне дослідження математичних задач оптимального керування, які виникають у зазначених моделях, і розробка на цій основі алгоритмів та програмних засобів для чисельного дослідження багаторівневої ЕЕС регіону.

Для досягнення цих цілей в дисертаційній роботі розглянуті і вирішені наступні завдання:

- вивчення та оцінка існуючих підходів до побудови агрего-

ваних моделей економічних систем (ЕС) і математичних постановок задач керування у цих моделях;

- постановка задачі оптимізації строків служби виробничого обладнання в односекторних агрегованих ІМ з урахуванням екологічного фактору, задач багаторівневого керування в ЕЕС регіонального типу та задачі багатокритеріальної оптимізації;

- якісний аналіз поведінки розв'язків поставлених задач, який грунтується на магістральному підході: виведення градієнта ОЗ, вивчення асимптотики поведінки оптимальних траєкторій, доведення магістральних теорем;

- розробка методик інформаційного забезпечення моделей та розрахунку оптимальних темпів оновлення елементів ЕЕС;

- створення програмних засобів на основі розроблених алгоритмів та їхня апробація на реальній інформації.

Наукова новизна дисертації. Вперше сформульовані та якісно досліджені нові оптимізаційні задачі (ОЗ) у запропонованих ІМ: задача максимізації випуску агрегованого продукту, задача дворівневого оптимального керування системою "Центр"-"Підприємства". Вперше для подібних ОЗ використаний магістральний підхід до визначення оптимальних строків служби виробничих потужностей.

У процесі цих теоретичних досліджень були отримані нові вирази для градієнта в зазначених ОЗ. Доказана магістральна теорема в нормальній формі для ІМ технологічного оновлення у випадку розривної функції продуктивності. Вивчена структура та поведінка оптимальних розв'язків у задачі дворівневого керування ЕЕС "Центр"-"Підприємства". Розроблені алгоритми і діалогові програмні засоби для розв'язування задачі ідентифікації та розрахунку оптимальних траєкторій технологічного розвитку дворівневої ЕЕС регіонального типу.

Методика досліджень заснована на застосуванні теорії економічного та екологічного моделювання, динамічних ІМ математичної економіки, математичного апарату теорії оптимального керування, багатокритеріальної оптимізації, теорії інтегральних рівнянь. Моделювання конкретної ЕЕС здійснювалося з застосуванням обчислювальних методів і засобів обчислювальної техніки.

Практична цінність роботи. Результати роботи можуть бути використані при створенні математичного та програмного забезпечення для задач прогнозування та керування конкретними регіональними ЕЕС.

Розроблені алгоритми та програмні засоби реалізовані у програмному комплексі, який призначений для розв'язування задач прогнозу та керування розвитком ЕЕС різних масштабів.

Реалізація. Робота виконана в рамках бюджетної теми ВГЕ.340. 04., проекту Держкомітету України з питань науки та технологій 6.05.04\032-92 ДНТП 6.5.4, бюджетної теми І.п.340.І4. Інституту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України.

Апробація роботи. Головні положення та результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на 2-му та 3-му Міжнародних семінарах "Прикладные проблемы моделирования и оптимизации" (1992, 1993 рр., м.Славське Львівської обл.), а також на наукових семінарах лабораторії 339 відділення Систем керування Інституту кібернетики ім .В.М.Глушкова НАН України.

Публікації. Основні результати виконаних досліджень викладені в публікаціях [1-6].

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку літератури та додатку. Обсяг роботи складає 136 сторінок, включає 4 рисунки і 111 бібліографічних найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дисертації, формулювання мети дослідження, стислу характеристику роботи.

Перший розділ присвячений огляду деяких агрегованих моделей та математичних постановок задач керування економікою, зокрема, з урахуванням її негативного впливу на НС.

У розділі I.I проведений аналіз основних підходів до моделювання задач керування ЕС. Обґрунтована доцільність застосування ІМ для задач керування розвитком ЕС за рахунок оновлення основних фондів.

Розділ I.2 присвячений опису деяких моделей, що виникають в економіці у зв'язку з необхідністю охорони НС.

У розділі I.3 наведені постановки нових ОЗ, що виникають у динамічній ІМ технологічного оновлення виробництва в умовах боротьби з забрудненням НС.

Постановка задачі багатокритеріальної оптимізації наведена у розділі I.4.

Базова інтегральна агрегована односекторна модель, яка запропонована в роботі, має вигляд

$$Q(t)=\int_{a(t)}^{t}\beta(\tau,t)m(\tau)d\tau, \qquad (I)$$

$$R(t)=\int_{a(t)}^{t}r(\tau,t)m(\tau)d\tau, \qquad (2)$$

$$P(t)=\int_{a(t)}^{t}m(\tau)d\tau\ ,\ t\in[t_0,T], \qquad (3)$$

обмеження $$0\leqslant m(t)\leqslant M(t), \qquad (4)$$

$$a'(t)>0,\ 0<a(t)<t,\qquad t\in[t_0,T], \qquad (5)$$

та початкові умови

$$a_0(t_0)=a_0\geqslant 0,\ m(\tau)=m_0(\tau),\quad \tau\in[0,t_0], \qquad (6)$$

де $Q(t)$- обсяг випуску агрегованого однорідного продукту у році t; $\beta(\tau,t)$ - продуктивність у році t одного робочого місця (РМ), створеного у році τ; $R(t)$ - загальна кількість забруднюючих речовин у році t; $r(\tau,t)$- кількість шкідливих речовин, що викидаються протягом року t одним РМ, створеним у році τ; $P(t)$ - чисельність РМ у році t; $m(t)$- кількість нових РМ, що уводяться в експлуатацію у році t; $a(t)$ - часова границя згортання застарілих РМ.

Другий розділ присвячений якісному аналізу поставлених задач оптимального керування.

У розділі 2.1 досліджується ОЗ, що виникає в односекторній ІМ з урахуванням впливу виробництва на екологію.

Задача максимізації випуску $Q(t)$ дисконтованого агрегованого однорідного продукту ЕС з урахуванням витрат на уведення в дію нових елементів системи і негативного впливу ЕС на стан НС полягає у визначенні функцій $m(t)$, $Q(t)$, $R(t)$, $a(t)$, $t\in[t_0,\infty)$, що надають максимум функціоналу

$$I=\int_{t_0}^{T} e^{-\delta t}\left\{Q(t)-\gamma(t)m(t)-\rho(t)[R(t)-R_{max}(t)]_+\right\}dt \longrightarrow \max_{a,m} \qquad (7)$$

при заданих $r(\tau,t)$, $\beta(\tau,t)$, $\rho(t)$, $\gamma(t)$, обмеженнях-рівностях (1)-(3), обмежень-нерівностях (4),(5) та початкових умовах (6) (ОЗ1). Тут δ - коефіцієнт дисконтування, що описує зниження продуктивності РМ із-за зношення; $\gamma(t)$ - ціна одного РМ у році t; $\rho(t)$- штраф за одиницю надмірного викиду забруднюючих речовин у році t; $R_{max}(t)$ - гранично допустимий рівень обсягу викидів протягом року t. Вираз $[R(t)-R_{max}(t)]_+$ має наступний зміст:

$$[R(t)-R_{max}(t)]_+ = \begin{cases} R(t)-R_{max}(t) & \text{при } R(t)>R_{max}(t), \\ 0 & \text{при } R(t)\leqslant R_{max}(t), \end{cases}$$

тобто з перевищенням граничного рівня викидів забруднюючих ре-

човин накладається штраф за негативний вплив на НС.

Керування системою здійснюється за допомогою зміни інтенсивності оновлення технологічної структури системи за рахунок вибору шуканих строку $t-a(t$ служби РМ та кількості $m(t)$ нових РМ, що вводяться в систему. Припускається, що функції $\beta(\tau,t)$, $r(\tau,t)$, $\rho(t)$, $\gamma(t)$ є неперервними; $R_{max}(t)$, $P(t)$ задовольняють умові Ліпшиця, $m_0(\tau)$ є кусково неперервною.

Згідно з методикою дослідження подібних ОЗ (Ю.П.Яценко, 1988, 1991) задача оптимального керування ОЗІ з фазовими обмеженнями (5) на шукану функцію $a(t)$ замінюється задачею з більш вузькою областю допустимих керувань $m(t)$:

$$\max(0,\dot{P}(t))\leqslant m(t)\leqslant M, \qquad (8)$$

для якої фазові обмеження (5) апріорі виконуються. Це дозволяє вивести градієнт функціоналу (7) за керуванням m та знайти вираз для другої варіації функціоналу, який істотно використовується у подальшому при доведенні магістральних властивостей оптимальних траєкторій.

Лема 1. При $m(t)>0$, $t\in[t_0,T)$ абстрактна функція $I(m)$ в ОЗІ є диференційованою, а градієнт функціоналу (7) має вигляд

$$I'_m(t)=\begin{cases}\int_t^{\underline{a}^{-1}(t)} e^{-\delta\tau}[\beta(t,\tau)-\beta(a(\tau),\tau)-\rho(\tau)(r(t,\tau)-r(a(\tau),\tau)]d\tau- \\ \qquad -e^{-\delta t}\gamma(t) \text{ при } R(t)>R_{max}(t), \\ \int_t^{\underline{a}^{-1}(t)} e^{-\delta\tau}(\beta(t,\tau)-\beta(a(\tau),\tau))d\tau-e^{-\delta t}\gamma(t) \\ \qquad \text{при } R(t)\leqslant R_{max}(t),\end{cases} \qquad (9)$$

$$\underline{a}^{-1}(t)=\begin{cases}a^{-1}(t), & t_0\leqslant t\leqslant a(T),\\ T, & a(T)\leqslant t\leqslant T,\end{cases}$$

де функція $a^{-1}(t)$ є зворотною до $a(t)$.

На основі одержаних виразів для градієнта функціоналу (7) досліджена якісна поведінка та структура оптимальних керувань.

При аналізі якісної поведінки розв'язків ОЗІ важливу роль відіграє рівняння $I'_m(a,t)=0$, тому що у ряді випадків оптимальні траєкторії подібних ОЗ прямують до деяких траєкторій більш простої структури (магістралей), що описуються цим рівнянням. На базі аналітичного дослідження рівняння $I'_m(\tilde{a},t)=0$ зроблений висновок про відсутність в ОЗІ неперервних магістральних траєкторій $\tilde{a}(t)$ у випадку, коли включається механізм штрафування, що істотно ускладнює дослідження ОЗ, зокрема, доведення магістральних теорем. Однак у дисертації показано, що для ОЗІ має місце наступна теорема про магістраль у нормальній формі.

Запровадимо єдину функцію продуктивності $\tilde{\beta}$ на усьому інтервалі $[t_0,T]$, яка є розривною в точці t_1:

$$\tilde{\beta}(\tau,t) = \begin{cases} \beta_1(\tau,t)=\beta(\tau,t)-\rho r(\tau,t), & \tau<t_1, \\ \beta_2(\tau,t)=\beta(\tau,t), & \tau\geqslant t_1. \end{cases}$$

Теорема І. Якщо

І) $\beta(\tau,t)>\rho r(\tau,t)$, $\beta'_\tau(\tau,t)>0$, $r'_\tau(\tau,t)\leqslant 0$, $\partial\beta(\tau,t)/\partial\tau\asymp o(e^{\delta t})$, при $t\longrightarrow\infty$, $\tau,t\in[t_0,T]$; 2) у випадку неперервної функції $\beta=\beta_1$ або $\beta=\beta_2$ відповідні розв'язки $\tilde{a}^T_t$, $t\in[t_0,T]$, рівняння $I'_m(\tilde{a}_t(t),t)=0$ прямують при $T\longrightarrow\infty$ до єдиних траєкторій $\tilde{a}_t(t)$, $t\in[t_0,\infty)$, $t=1,2$, таких, що $\tilde{a}'_t(t)>0$ та $(t-\tilde{a}_t(t))/\tilde{a}_t(t)\longrightarrow 0$ при $t\longrightarrow\infty$; 3) функції $\tilde{m}_t(t)$, які відповідають $\tilde{a}_t(t)$ у силу (3), задовольняють обмеженню (8), $t\in[t_0,T]$, $t=1,2$; 4) функція $M(t)$ є обмеженою при $t\longrightarrow\infty$; 5) $r'(t)\geqslant d_m>0$, $t\in[t_0,T]$.

Тоді оптимальний розв'язок вихідної задачі $a^*(t)$, $t\in[t_0,T]$, прямує при $T-t_0\longrightarrow\infty$ до $\tilde{a}_1(t)$ на асимптотично більшій частині інтервалу $[t_0,t_1)$ і до $\tilde{a}_2(t)$ – на асимптотично більшій частині інтервалу $[t_1,T]$, тобто $\forall\,\varepsilon>0\ \exists\,\bar{t}_1,\bar{T}$, $\bar{t}_1\in[t_0,t_1)$, $\bar{T}\in[t_1,T]$ такі, що $\forall\,T\geqslant\bar{T}$, $\forall\,t_1\geqslant\bar{t}_1$: $|a^*(\tau)-\tilde{a}_1(t)|<\varepsilon$, $t\in\Delta_1\subset[t_0,t_1)$,

$$|a^*(t)-\tilde{a}_2(t)|<\varepsilon,\quad t\in\Delta_2\subset[t_1,T],$$

де Δ_1, Δ_2 – деякі підмножини такі, що

$\frac{mes(\Delta_2)}{T-t_1} \longrightarrow 1$ при $T-t_1 \longrightarrow \infty$, а $\frac{mes(\Delta_1)}{t_1-t_0} \longrightarrow 1$ при $t_1 \longrightarrow \infty$.

Розділ 2.2 присвячений якісному аналізу дворівневої задачі оптимального керування ЕЕС "Центр"-"Підприємства".

У запропонованій задачі оптимізація керування технологічним розвитком ЕЕС "Центр"-"Підприємства" здійснюється за рахунок економічного управління "Підприємствами" з метою зниження їх шкідливого впливу на НС на основі односекторної моделі (I)-(6) оновлення виробництва. Критерієм оптимізації функціонування "Центру" є максимізація деякої агрегованої функції корисності $U(Q,R)$, яка залежить від випуску корисної продукції Q_i та обсягу R_i забруднення НС кожним "Підприємством", $i=\overline{1,N}$. "Центр" керує "Підприємствами", встановлюючи розміри штрафів ρ за одиницю перевищення норми забруднення R_{max}. Мету функціонування "Центру" можна представити у вигляді

$$I_0=\int_{t_0}^{T} U(Q_1,\dots,Q_N,R_1,\dots,R_N)dt \longrightarrow \max_{\rho_i(t),\, t\in[t_0,T],\ i=\overline{1,N}}, \qquad (10)$$

$U'_Q>0,\ U'_R<0,\ U''_Q<0,\ U''_R<0$

Критерієм оптимізації функціонування "Підприємств" є максимізація прибутку - випуску продукції Q з урахуванням капітальних витрат K на оновлення виробництва та видатків на штрафи за забруднення НС. На рівні "Підприємств" керування здійснюється зміною інтенсивності оновлення його елементів - РМ, що полягає у запровадженні в дію нових, більш ефективних РМ і згортанні найстаріших. Мету функціонування "Підприємства" можна описати в такому формалізованому вигляді:

$$I_i=\int_{t_0}^{T} e^{-\delta t}\left\{Q_i(t)-K_i(t)-\rho_i(t)[R_i(t)-R^{t}_{max}(t)]_+\right\}dt \longrightarrow \max_{i=\overline{1,N}}. \qquad (11)$$

Для опису функціонування кожного із "Підприємств" використовується ІМ (I)-(6) з керуванням технологічною структурою

"Підприємства", яка включає нове обмеження

$$K(t)=\gamma(t)m(t). \qquad (12)$$

Обмежимося аналізом ЕЕС "Центр"-одне "Підприємство" (випадок N=1). Одержані результати будуть вірними для взаємодії "Центру" з кількома "Підприємствами".

Математична постановка дворівневої задачі керування ЕЕС, що складається з "Центру" і одного "Підприємства", полягає у наступному: визначить функцію $\rho(t)$, $t\in[t_0,T]$, $T\leqslant\infty$, що надає максимум функціоналу

$$I_0=\int_{t_0}^{T} U(Q(t),R(t))dt \longrightarrow \max_{\rho(t),\,t\in[t_0,T]}, \qquad (13)$$

та функції $m(t)$, $a(t)$, $t\in[t_0,T]$, що доставляють максимум функціоналу (11) при обмеженнях (1)-(5),(12) і початкових умовах (6) (032).

Цю задачу назвемо базовою на відміну від задачі з модифікованим цільовим критерієм "Центру" (033), особливістю якої є те, що функція корисності "Центру" залежить не від обсягу продукції Q "Підприємства", а від його прибутку $V=Q-K$. Іншими словами, в 033 "Центр" враховує капітальні витрати "Підприємства" на запровадження в дію нових РМ, що відбивається на цільовому функціоналі зовнішньої задачі наступним чином:

$$I_0=\int_{t_0}^{T} U(Q(t)-\gamma(t)m(t),R(t))dt \longrightarrow \max_{\rho(t),\,t\in[t_0,T]}. \qquad (14)$$

У поставленій дворівневій задачі оптимального керування 032 виділимо зовнішню та внутрішню задачі. Зовнішній рівень 03 описує систему контролю (єдиний "Центр"). Внутрішня задача максимізує випуск агрегованого продукту "Підприємства" з урахуванням витрат на оновлення виробництва та штрафів за забруднення НС. Внутрішня та зовнішня 03 у 032 пов'язані шляхом шуканого керування ρ, що визначається на зовнішньому рівні.

Магістральний підхід дозволяє встановити різноманітні

якісні властивості оптимальних термінів оновлення технологічної структури виробництва в ЕВС.

Властивість I (магістральна). При достатньо широких припущеннях, якщо рівняння $I'_u(\tilde{a},t)=0$, $t\in[t_0,\infty)$ має єдиний розв'язок $\tilde{a}(t)$, $\tilde{a}'(t)>0$, $t\in[t_0,\infty)$ ("магістраль" ОЗ), розв'язок $a^*(t)$, $t\in[t_0,T]$ внутрішньої задачі в ОЗ2 прямує до магістралі $\tilde{a}(t)$ при $T\gg1$. А саме, для $\forall\,\varepsilon>0\ \exists\,\bar{T}$, таке, що $\forall\,T\geq\bar{T}$ виконується $|a^*(t)-\tilde{a}(t)|<\varepsilon$, $t\in\Delta\subset[t_0,T]$, причому $mes(\Delta)\longrightarrow T-t_0$ при $T\to\infty$.

Розглянемо випадок, коли в деякий момент часу t_1, $t_1\geq t_0$, вмикається механізм штрафування "Підприємства": $R(t)>R_{max}(t)$ при $t<t_1$, $R(t)\leq R_{max}(t)$ при $t\geq t_1$. У цьому випадку внутрішня задача в ОЗ2 ускладнюється у порівнянні з випадком $R_{max}=\infty$, але магістральна властивість I зберігається (див. теорему I).

Оскільки дослідження дворівневої задачі стикається з істотними труднощами, обмежимося при її якісному аналізі випадком $\beta_1(\tau,t)=c_1\tau+c_2$, $r_1(\tau,t)=c_4-c_3\tau$. Також припустимо, що шуканий штраф $\rho=\text{const}$ (або $\rho=0$). Тоді зовнішня ОЗ зводиться до задачі скалярної оптимізації по змінній $\rho\in R^1$ при обмеженнях

$$0\leq\rho\leq\rho_{max},\quad \rho=0 \text{ при } R(t)\leq R_{max}(t), \tag{I5}$$

а магістральний режим оновлення РМ у внутрішній ОЗ має вигляд $\tilde{a}=t-d$. Можна побудувати наступний допустимий розв'язок $a_q(t)$, який є близьким до розв'язування внутрішньої ОЗ:

$$a_q(t)=\begin{cases} a_0(t) \text{ або } a_{max}(t), & t\in[t_0,\mu),\\ t-d_1, & t\in[\mu,t_1),\\ a(t_1), & t\in[t_1,\eta),\\ t-d_2, & t\in[\eta,\theta),\\ a(\theta), & t\in[\theta,T], \end{cases} \tag{I6}$$

де μ визначається із умови $\tilde{a}(\mu)=a_{max}(\mu)$ або $\tilde{a}(\mu)=a_0$, t_1 - із умови $R(t_1)=R_{max}$, η - із умови $t-d_1=t-d_2$, а θ - із умови $I'_u(a(\theta),\theta)=0$.

Внутрішня ОЗ може бути розв'язана при будь-якому заданому ρ=const, а шукані ρ та d пов'язані монотонною залежністю

$$d = \begin{cases} \sqrt{2\gamma/(c_1+\rho c_3)}, & \text{якщо } R(t)>R_{max}(t), \\ \sqrt{2\gamma/c_1}, & \text{якщо } R(t)\leqslant R_{max}(t) \end{cases} \qquad (17)$$

В силу (17) максимізація функціоналу (13) по ρ еквівалентна його мінімізації по d.

Спочатку розглянемо окремий випадок задачі $R_{max}\equiv 0$ (тобто, коли механізм штрафування функціонує при будь-якому рівні забруднень ($R(t)>0$). Тоді має місце наступний результат.

Властивість 4. При $R_{max}\equiv 0$ оптимальним розв'язком задачі ОЗ2 є максимально можливе ρ_{max} та мінімально можливе d_{min}, що визначаються максимальними темпами оновлення $m^*(t)=M$, $t\in[t_0,T]$: $d^*=d_{min}$, $\rho^*=\rho_{max}$.

Нехай тепер $0<R_{max}<\infty$. Для врахування реальної структури штрафу треба відмовитися від припущення ρ=const та покласти, що $\rho=\rho(t)$, $t\in[t_0,T]$.

Властивість 5. При $R_{max}(t)$=const та достатньо великих значеннях ρ_{max}, r і $T-t_0$ розв'язок ρ^* задачі ОЗ2 має структуру:

$$\rho^*(t)=\begin{cases} \rho_{max} & \text{при } t\in[t_0,t_1): R^*(t)>R_{max}(t), \\ 0 & \text{при } t\in[t_1,T]: R^*(t)\leqslant R_{max}(t), \end{cases} \qquad (18)$$

а відповідний розв'язок (d^*,m^*) внутрішньої задачі є граничним: $m^*(t)=M$, $d^*(t)\longrightarrow t-d_{min}$ при $t\in[t_0,t_1)$, та внутрішнім: $d^*(t)\longrightarrow t-d^*$, $d^*=\sqrt{2\gamma/c_1}$ при $t\in[t_1,T]$.

Таким чином, можна вважати встановленими наступні оптимальні стратегії керування системою, що розглядається. Оптимальна стратегія "Центру": накладення максимально можливого штрафу ρ_{max} на "Підприємство" на тих часових інтервалах, де рівень $R(t)$ забруднення НС "Підприємством" перевищує максимально допустимий R_{max}. Оптимальна стратегія "Підприємства": 1) макси-

мально можливий темп оновлення виробництва і мінімальний строк служби РМ на інтервалах, де $R(t)>R_{max}$; 2) перехід до оптимальних темпів оновлення виробництва і строків служби РМ, що визначаються темпами ТП у виробництві РМ при $R(t)\leqslant R_{max}$.

Побудоване оптимальне керування $\rho(t)$, $t\in[t_0,T]$ є граничними в області (I5). Для одержання внутрішніх режимів треба дещо змінити критерій оптимальності "Центру".

Розглянемо задачу з модифікованим цільовим функціоналом "Центру" (I4). Для неї є характерними такі властивості.

Властивість 6. При $R_{max}=0$ і достатньо великих ρ_{max} оптимальним розв'язком задачі ОЗЗ є деяке внутрішнє значення ρ^* в області $[0,\rho_{max}]$ та $d^*=\sqrt{2\gamma/(c_1+\rho^* c_3)}>d_{min}$, за яких $I'_{1_{d^*}}(d^*,t)=0$.

Нехай тепер $R_{max}>0$. Якщо $R\leqslant R_{max}$, то оптимальний розв'язок внутрішньої задачі визначається властивістю I, при цьому $\rho^*=0$, $d^*=\sqrt{2\gamma/c_1}$. При $R>R_{max}$ розв'язок $0<\rho^*<\rho_{max}$ в силу властивості 6.

Властивість 7. При $R_{max}=\text{const}$ розв'язок задачі ОЗЗ має наступну структуру: $0<\rho^*(t)<\rho_{max}$ при $t\in[t_0,t_1)$, $\rho^*(t)=0$ при $t\in[t_1,T]$.

Відповідно, оптимальні стратегії у даному випадку мають наступний вигляд. **Оптимальна стратегія "Центру":** значення штрафу ρ_{opt} на тих інтервалах, де $R>R_{max}$, є меншою за ρ_{max} та визначається оптимальним чином з урахуванням функції корисності витрат "Підприємства". **Оптимальна стратегія "Підприємства":** 1) прискорене оновлення виробництва з урахуванням штрафу ρ_{opt} за забруднення НС на тих інтервалах, де $R>R_{max}$; 2) перехід до оптимальних темпів оновлення виробництва та строків служби РМ, що визначаються темпами ТП в виробництві РМ при $R\leqslant R_{max}$.

У третьому розділі описуються розроблені автором алгоритми та програмні засоби для розв'язування задач оптимізації темпів

технологічного оновлення дворівневої ЕЕС та їх застосування для моделювання реальних систем.

У розділі 3.1 наведені вимоги до інформаційного забезпечення моделі. Обґрунтована методика ідентифікації моделі розвитку ЕЕС. Наведений ефективний алгоритм розв'язування задачі ідентифікації для ІМ дворівневого керування.

У розділі 3.2 пропонується алгоритм для розв'язування задачі оптимізації термінів служби виробничих фондів у дворівневій ЕЕС "Центр"-"Підприємства" на базі оптимальних стратегій оновлення системи.

Розділ 3.3 присвячено опису структури та функцій діалогової системи MODECS, яка розроблена у рамках НДР Інституту кібернетики та призначена для моделювання процесів ліквідації РМ, що застаріли, в умовах боротьби за чистоту НС. MODECS забезпечує розв'язування задачі ідентифікації моделі на передісторії та наближеної оцінки темпів технологічного розвитку системи на наступний період на основі визначення магістральних режимів оновлення.

У розділі 3.4 наведені результати апробації моделі на реальних економічних даних про розвиток конкретного об'єкта: функціонування автобусного парку (великої місткості) по перевезенню пасажирів на міських маршрутах України. Розглянуті чотири варіанти розрахунку оптимальних темпів розвитку парку при різних припущеннях про динаміку заданих показників.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Агреговані ІМ розвитку ЕС з керуванням ліквідацією застарілих елементів розвинуті на випадок урахування екологічного впливу, проаналізовані особливості моделювання та запропоновані нові постановки задач керування (в тому числі, багато-

рівневого) регіональними ЕЕС.

2. Проведене аналітичне дослідження задачі максимізації випуску продукції з урахуванням витрат на штрафи за забруднення НС у агрегованій односекторні й ІМ. Виведений градієнт функціоналу сформульованої ОЗ, встановлені магістральні властивості задачі та вивчена якісна поведінка магістральних траєкторій. При цьому вперше доведена теорема про магістраль у нормальній формі для односекторної ІМ при розривній функції продуктивності.

3. Проведений якісний аналіз задачі дворівневого оптимального керування системою "Центр"-"Підприємства" з урахуванням екологічних критеріїв. Доведено ряд властивостей про структуру та поведінку оптимальних керувань. Встановлені оптимальні стратегії "Центру" (динаміка штрафів за забруднення) та "Підприємств" (інтенсивність технологічного оновлення). Вивчена модифікація даної задачі, що допускає більш тонкі (внутрішні) режими оптимальних керувань штрафами.

4. На основі аналізу існуючої екологічної та економічної інформації запропоновані методика інформаційного забезпечення та алгоритм ідентифікації ІМ, а також алгоритм наближеного визначення магістральних траєкторій в дворівневій ОЗ.

5. Створений діалоговий програмний комплекс, який реалізований на базі мови програмування СІ та універсального пакету графічних функцій Toolkit. Програмний комплекс забезпечує розв'язування задачі ідентифікації моделі по неповній еколого-економічній інформації на предісторії та задачі оцінки оптимальних строків служби обладнання в ЕЕС "Центр"-"Підприємства" на наступний період з урахуванням процесів технологічного оновлення "Підприємств" та штрафів за перевищення гранично допустимих викидів шкідливих забруднень. Розроблені алгоритми та програмні засоби апробовані на реальній інформації.

Основні положення дисертації опубліковані в таких працях:

I. Волкович В.Л., Яценко Ю.П., Верхотурова С.Д. Качественный анализ двухуровневой задачи оптимального управления эколого-экономической системой региона // Автоматика. -1993. -N3. -С. 38-45.

2. Верхотурова С.Д. О многокритериальной оптимизации управления двухуровневой эколого-экономической системой региона // Модели и алгоритмы согласованного управления производством и экологией региона. -Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН Украины, 1993. -С. 22-27.

3. Верхотурова С.Д. Исследование оптимальных управлений в односекторной интегральной модели для класса негладких функций // Прикладные проблемы моделирования эколого-экономических систем. -Киев: Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, 1994. -С. 20-25.

4. Верхотурова С.Д. Об алгоритмах идентификации и приближенного расчета оптимальных траекторий в двухуровневой задаче оптимального управления ЭЭС "Центр"-"Предприятия" // Модели и алгоритмы многоуровневого управления эколого-экономическими системами региона. -Киев: Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, 1994. -С. 25-31.

5. Верхотурова С.Д. Агрегированная интегральная модель развития экономической системы с учетом штрафов за загрязнение окружающей среды // Прикладные проблемы моделирования и оптимизации: Материалами 2-го Междунар. семинара, Славское, 1-6 марта, 1992. / Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН Украины. -Киев, 1992. -С. 54-60. -Деп. 12.08.92, N 2628 В-92.

6. Верхотурова С.Д. Теорема о магистрали в односекторной агрегированной интегральной модели для класса негладких функций // Прикладные проблемы моделирования и оптимизации: Материалами 3-го Междунар. семинара, Славское, 1-6 марта, 1993. / Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН Украины. -Киев, 1993. -С. 41-45. -Деп. 8.02.94, N 345 В-94.

Верхотурова С.Д. Разработка и исследование агрегированных моделей развития эколого-экономических систем.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.05.02 - математическое моделирование и вычислительные методы в научных исследованиях, Институт кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины, Киев, 1995.

Предложены новые оптимизационные задачи для агрегированных интегральных моделей технологического обновления производства с учетом природоохранной деятельности. Качественный анализ структуры и поведения оптимальных траекторий позволил обнаружить магистральные свойства оптимальных режимов обновления. В процессе этих исследований выведены новые выражения для градиента функционала, доказаны магистральные теоремы, установлены различные свойства оптимальных сроков обновления технологической структуры эколого-экономической системы "Центр"-"Предприятия". Разработаны алгоритмы решения задачи идентификации системы и приближенного определения магистральных темпов обновления производства. Создано соответствующее программное обеспечение.

Verhoturova S.D. Investigation and development of aggregated models of evolving ecological-economic systems.
Dissertation for candidate of science degree by speciality 01.05.02 "Mathematical simulation and numerical methods in scientific research". The Cybernetics Institute of NAS of Ukraine, Kiev, 1995. The statements of new optimization problem statements are proposed for the aggregated integral models describing technological renewal of production. Theoretical study is conducted for the problems concerned with optimal control of multilevel regional ecological-economic systems with taking into account a production impact on environment. On the basis of investigation of the stated problems, new expressions for gradient are obtained in considered models. Asymptotical behavior of optimal trajectories is analyzed and turnpike theorems are proved. The algorithms are proposed for the approximate solution of such problems as the identification of model and the determination of turnpike rates for production renewal. Dialog software tools are elaborated.

Ключові слова: еколого-економічна система, агрегована інтегральна модель, технологічне оновлення, магістральна теорема, оптимальна траєкторія.

Підп. до друку 16.11.95. Формат 60×84/16. Папір для розмнож. апар. Офс. друк. Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,05. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим. Зам. 842.

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України
252022 Київ 22, проспект Академіка Глушкова, 40

65548

Ав 33.611