КІБЕРНЕТИКА
та КОМП'ЮТЕРНІ
ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 338.5 DOI:10.34229/2707-451X.22.3.6

П.І. СТЕЦЮК, М.Ю. ГРИГОРАК, О.А. БЕРЕЗОВСЬКИЙ,
О.П. ЛИХОВИД

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ М.В. МИХАЛЕВИЧА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗМІН

Розглядаються можливості використання розроблених М.В. Михалевичем оптимізаційних моделей на базі таблиць «витрати-випуск» Леонтьєва для прогнозування структурно-технологічних змін в національній економіці у повоєнний період. Запропоновано методи негладкої оптимізації для розв'язання задач максимізації загальних доходів споживачів та мультиплікатора «приріст доходів – приріст виробництва», наведено відповідні алгоритми та програмне забезпечення.

Ключові слова: *структурно-технологічні зміни, міжгалузевий баланс, модель Леонтьєва, матриця «витрати-випуск», обернені моделі леонтьєвського типу, алгоритми негладкої оптимізації, програмне забезпечення.*

Вступ. План структурної перебудови економіки України, представлений Національною радою з відновлення України від наслідків війни, передбачає прискорений розвиток переробних галузей промисловості, залучення інвестицій, нарощування експорту та імпортозаміщення, що у цілому обумовлює необхідність глобальних технологічних трансформацій як окремих галузей, так і міжгалузевих взаємодій. Еволюційний шлях розвитку національної економіки призвів до значних структурно-технологічних диспропорцій, зокрема, деформована структура національного господарства наближається до структурних характеристик менш розвинених країн світу з яскраво вираженим сировинним спрямуванням, структурні деформації істотно стримують економічну модернізацію та розвиток, консервують економічну відсталість та зумовлюють низький рівень міжнародної конкурентоспроможності. Значне відставання за рівнем продуктивності праці та енерго- і ресурсоефективності зумовлює низьку конкуренто-спроможність вітчизняної продукції на міжнародних ринках. Вищеописане обумовлює актуальність та необхідність створення ефективних механізмів впливу та моделей прискореного економічного розвитку, які б не консервували наявну структуру економіки, а змінювали її принципово з урахуванням сучасних трендів технологічного розвитку.

Світовий досвід свідчить, що впровадження структурно-технологічних змін можливе різними шляхами:

- зменшенням витрат ресурсів (сировини, матеріалів, енергії тощо) на виробництво продукції за рахунок застосування менш ресурсоємних технологій або повної відмови від застарілих енергоємних технологій;
- зростанням продуктивності праці за рахунок підвищення якості трудових ресурсів та збільшення обсягів виробництва продукції з високою доданою вартістю;

- залученням інвестиційного капіталу країни, міжнародних інвестиційних фондів та нагромаджень населення для стимулювання впровадження інновацій для структурно-технологічних змін відповідно до цілей сталого розвитку;

- освоєнням нових технологій і підтримки інноваційно орієнтованих видів економічної діяльності, орієнтованих на зменшення шкідливого впливу на довкілля.

Отже, нова модель економічного розвитку України має враховувати конкурентні переваги національної економіки щодо можливостей структурної диверсифікації і освоєння нових технологій з урахуванням різних чинників попиту, пропозиції і розподілу створених благ, що в цілому призведе до зростання якості і продуктивності праці, підвищенню частки високотехнологічних виробництв в структурі ВВП, якості життя населення і в кінцевому підсумку конкурентоздатності країни в глобальній економіці. Досягнення поставлених цілей та завдань обумовлює необхідність прогнозування структурно-технологічних змін у різних галузях економіки, що й обумовлює вибір міжгалузевих агрегованих балансових моделей як інструментарію для аналізу та планування цільових трансформацій.

Зауважимо, що моделі міжгалузевого балансу типу «витрати-випуск» Леонтьєва є досить зручним інструментом аналізу економічних систем. Традиційно, у моделях леонтьєвського типу використовують матрицю технічних коефіцієнтів (прямих витрат), яка розраховується на основі статистичної інформації, що дозволяє визначати обсяги кінцевої продукції при відомих обсягах ВВП або навпаки – визначати необхідний обсяг ВВП, знаючи обсяги кінцевого споживання. М.В. Михалевич сформулював «обернену» постановку задачі: визначити ті структурно-технологічні зміни у галузях економіки, які здатні знизити собівартість продукції (витрати ресурсів на виробництво продукції) і тим самим підвищити доходи кінцевих споживачів, які можна було б використати для інвестицій у економічний розвиток. Іншими словами, як підібрати або налаштувати технічні коефіцієнти, що залежать від технології виробництва, для покращення властивостей економічного процесу, враховуючи мультиплікативний ефект впливу доходів населення та їх витрачання на придбання товарів вітчизняного виробництва. Ці моделі М.В. Михалевича ([1–4]) можна назвати оберненими моделями леонтьєвського типу. Перша із запропонованих моделей передбачає максимізацію сукупних доходів споживачів шляхом зміни структури витрат та доданої вартості за умови не інфляційного зростання доходів, а друга – відповідно, визначає максимальний мультиплікатор типу «витрати-випуск» за аналогічних обмежень. Нова постановка задач, коли коефіцієнти прямих витрат є невідомими величинами, призводить до більш складних багатоекстремальних задач оптимізації, які утворюють нові можливості для використання методів оптимізації негладких функцій.

Мета даної статті – розгляд двох оптимізаційних задач, побудованих на основі моделей типу «витрати-випуск» з невідомими коефіцієнтами прямих витрат та обґрунтування методу їх розв’язання, що базується на використанні методів негладкої оптимізації.

Опис моделей структурно-технологічних змін. Нехай економіка країни сформована n агрегованими галузями і $A=\{a_{ij}\}$ – матриця коефіцієнтів прямих витрат для цих галузей. Позначимо y_i і x_i – кінцевий і валовий продукт i-ї галузі у фіксованих цінах; ці величини пов'язані співвідношенням

$$x_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j + y_i, \quad i=\overline{1,n}. \qquad (1)$$

Нехай $x=(x_1,\ldots,x_n)$ і $y=(y_1,\ldots,y_n)$, E – одинична матриця розміру $n\times n$. Співвідношення (1) означає, що вектори x (валовий продукт) і y (кінцевий продукт) пов'язані такими співвідношеннями у матричній формі:

$$y=(E-A)x \quad \text{або} \quad x=(E-A)^{-1}y. \tag{2}$$

Припустимо лінійну залежність оплати праці від обсягів виробництва в галузях. Врахування фактору оплати праці важливе з точки зору впливу структурно-технологічних змін на продуктивність праці і доходи домогосподарств, оскільки чим більшу частку свого доходу населення витрачає на придбавання товарів вітчизняного виробництва, тим більші будуть інвестиції в економіку і технологічний розвиток. І навпаки, зменшення доходів населення чи їх витрачання на імпортні товари призводить до зменшення обсягів накопичень і тим самим інвестиційної складової ВВП. Нехай q_i – частка заробітної платні та інших виплат за працю у ціні продукції i галузі. Нехай $q=(q_1,\ldots,q_n)$. Загальні доходи споживачів D дорівнюють

$$D=\sum_{i=1}^{n} q_i x_i=(q,x). \tag{3}$$

Будемо вважати, що кінцевий продукт галузей складається з двох частин, одна з яких залежить, а інша – не залежить від D. Припустивши лінійну залежність першої з них від величини доходів споживачів, отримуємо

$$y_i=\alpha_i D+h_i, \quad i=\overline{1,n}, \tag{4}$$

де коефіцієнти α_i відображають, в основному, структуру індивідуального споживання та внутрішніх інвестицій, а h_i визначаються експортно-імпортним сальдо галузей та потребами колективного (у тому числі суспільного) споживання.

Виразимо D через A і q. Використовуючи (2) маємо $D=(q,x)=(q,(E-A)^{-1}y)$, звідки з урахуванням (4) отримуємо

$$D=\frac{q^T(E-A)^{-1}h}{1-q^T(E-A)^{-1}\alpha}, \tag{5}$$

де $h=(h_1,\ldots,h_n)$, $\alpha=(\alpha_1,\ldots,\alpha_n)$.

Визначимо ще одну функцію від A і q – мультиплікатор "приріст доходів – приріст виробництва"

$$k=q^T(E-A)^{-1}\alpha\ . \tag{6}$$

Завдання полягає у визначенні таких змін елементів матриці A і вектора $q=\{q_1,\ldots,q_n\}$, які максимізували б величину D кінцевих доходів споживачів (або ж мультиплікатор "приріст доходів – приріст виробництва" k) без додаткових інфляційних впливів.

Згідно [5] умови, що виключають розвиток інфляції витрат під впливом внутрішніх факторів, мають вигляд:

$$\sum_{i=1,i\neq j}^{n} \frac{a_{ij}}{1-a_{jj}-\bar{q}_j}<1, \quad j=\overline{1,n}, \tag{7}$$

де $\bar{q}_j$ – частка доданої вартості в ціні продукції j-ої галузі.

Зазначимо також, що величину $\bar{q}_j$ можна представити таким чином:

$$\bar{q}_j=l_j q_j+d_j,$$

де l_j – мультиплікатор витрат на оплату праці в j-ій галузі, а d_j – частка інших складових доданої вартості в ціні продукції j-ої галузі. Взагалі, вплив ринку праці на ринок товарів відображено в моделі Кейнса. У доведеннях М.В. Михалевича сукупний дохід споживачів D та мультиплікатор k ("приріст виробництва – приріст доходів" споживачів) фактично використовують той факт, що економіку країни збалансовано в моделі «витрати-випуск» (1).

З огляду на деяку неточність вхідних даних і необхідність наявності резерву для безінфляційного збільшення компонентів доданої вартості, що не залежать від q, доцільно замість (7) розглядати умови

$$\sum_{i=1, i\neq j}^{n} \frac{a_{ij}}{1-a_{jj}-(l_j q_j + d_j)} \leq \beta, \quad i=\overline{1,n}, \tag{8}$$

де $\beta < 1$ – заздалегідь задана гранична величина.

Співвідношення (5), (6) і (8) нам знадобляться при описанні оптимізаційних задач, які розглядаються далі.

Введемо основні позначення.

Нехай задані технологічна матриця A, вектор q і відповідні вектори α, h, l і q. Нехай Δa_{ij} і Δq_j ($i=\overline{1,n}, j=\overline{1,n}$) – зміни існуючих значень компонент матриці A і вектора q; $\Delta q = (\Delta q_1, \ldots, \Delta q_n)$ і $\Delta A = \{\Delta a_{ij}\}_{ij}^{nn}$.

Опишемо змістовну постановку задачі визначення таких значень: Δq і ΔA, що максимізували б величину D (або мультиплікатор "приріст доходів – приріст виробництва" k) без додаткових інфляційних впливів, що задається за допомогою співвідношень (8).

Цільовими функціями задачі будуть такі:

$$f_1(\Delta A, \Delta q) = \frac{(q+\Delta q)^T (E-(A+\Delta A))^{-1} h}{1-(q+\Delta q)^T (E-(A+\Delta A))^{-1} \alpha} \tag{9}$$

відповідає величині D згідно (5), а

$$f_2(\Delta A, \Delta q) = (q+\Delta q)^T (E-(A+\Delta A))^{-1} \alpha \tag{10}$$

відповідає мультиплікаторові "приріст доходів – приріст виробництва" k згідно (6).

Основні обмеження для Δq і ΔA, що дозволяють виключити додаткові інфляційні впливи, описуються за допомогою співвідношення (8). Вони мають таку форму:

$$\sum_{i=1, i\neq j}^{n} \frac{a_{ij}+\Delta a_{ij}}{1-(a_{jj}+\Delta a_{jj})-(l_j(q_j+\Delta q_j)+d_j)} \leq \beta, \quad j=\overline{1,n}. \tag{11}$$

Щоб дотримувався фізичний зміст коефіцієнтів нової матриці й нового вектора, розглянемо групу обмежень:

$$0 \leq q_j + \Delta q_j \leq 1, \quad 0 \leq a_{ij} + \Delta a_{ij} \leq 1, \quad i, j = \overline{1,n}, \tag{12}$$

а щоб дотримувався фізичний зміст обмежень (11) розглянемо групу обмежень:

$$a_{jj} + \Delta a_{jj} + l_j (q_j + \Delta q_j) + d_j \leq 1, \quad j=\overline{1,n}. \tag{13}$$

Група обмежень (13) відповідає додатності знаменників у обмеженнях (11).

До останніх можуть бути додані обмеження на можливі границі змін коефіцієнтів прямих витрат, обумовлені особливостями існуючих технологій:

$$\underline{\gamma_{ij}} \le \Delta a_{ij} \le \overline{\gamma_{ij}}, \quad i, j = \overline{1, n}, \tag{14}$$

$$\underline{\gamma_i} \le \Delta q_i \le \overline{\gamma_i}, \quad i = \overline{1, n}\,. \tag{15}$$

За допомогою обмежень (14) та (15) можна керувати при прийнятті рішень як змінити усього кілька коефіцієнтів у технологічній матриці або векторі часток заробітної платні. Для цього досить зафіксувати інші компоненти на конкретних значеннях, встановивши для них нижні і верхні границі рівними цим значенням.

Частина обмежень обумовлена ресурсами, що виділяються для структурно-технологічних змін:

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} b_{kij} \max(0, -\Delta a_{ij}) \le B_k, \quad k = \overline{1, K}, \tag{16}$$

де K – кількість ресурсів, B_k – обсяг k-го ресурсу, який виділяється з метою зниження витрат виробництва, b_{kij} – витрата цього ресурсу при реалізації заходів, що забезпечують одиничне зменшення питомих витрат продукції i-ої галузі на виробництво одиниці продукції j-ої галузі.

Будемо розглядати дві постановки задач:

1. Задача максимізації величини D, тобто знайти такі значення Δq і ΔA, які б максимізували значення функції (9) при обмеженнях (11)–(16).

2. Задача максимізації величини k (мультиплікатора "приріст доходів – приріст виробництва"), тобто знайти такі значення Δq і ΔA, які б максимізували значення функції (10) при обмеженнях (11)–(16).

Оптимізаційні задачі. Приведемо до більш зручного вигляду систему обмежень (11)–(16). По-перше, позбудемося дробово-лінійних нерівностей (11). Враховуючи, що в j-ому обмеженні типу (11) знаменник доданка не залежить від i, і, крім того, з (13) випливає його додатність, групу обмежень (11) можна записати у формі лінійних нерівностей:

$$\beta(a_{jj} + \Delta a_{jj}) + \beta(l_j(q_j + \Delta q_j) + d_j) + \sum_{i=1, i\ne j}^{n} (a_{ij} + \Delta a_{ij}) \le \beta, \quad j = \overline{1, n}. \tag{17}$$

Тоді разом з обмеженнями

$$a_{jj} + \Delta a_{jj} + l_j(q_j + \Delta q_j) + d_j \le 1, \quad j = \overline{1, n}\,, \tag{18}$$

вони будуть повністю задавати вимоги, які виключають розвиток інфляції витрат під впливом внутрішніх факторів, з деяким запасом, заданим коефіцієнтом β. Однак, на відміну від обмежень (11) вони вже будуть лінійними нерівностями.

Другими розглянемо обмеження, пов'язані з ресурсами, які виділяються для структурно-технологічних змін, замінивши їхню форму на

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} b_{kij}^{-} \max(0, -\Delta a_{ij}) + \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} b_{kij}^{+} \max(0, \Delta a_{ij}) \le B_k, \quad k = \overline{1, K}, \tag{19}$$

де K – кількість ресурсів, B_k – обсяг k-го ресурсу, необхідного для зниження витрат виробництва, b_{kij}^{-} – витрати k-го ресурсу при реалізації заходів, що забезпечують одиничне зменшення питомих витрат продукції i-ої галузі на виробництво одиниці продукції j-ої галузі, b^{+}_{kij} – витрати k-го ресурсу при реалізації заходів, що забезпечують одиничне збільшення питомих витрат продукції i-ої галузі на виробництво одиниці продукції j-ої галузі.

Зазначимо, що з обмежень (19) випливають обмеження (16), якщо встановити коефіцієнти b^{-}_{kij} рівними коефіцієнтам b_{kij}, а коефіцієнти b^{+}_{kij} рівними нулеві. Ці обмеження в цьому розділі будемо використовувати як опуклі нерівності, що вимагає виконання умови, щоб усі коефіцієнти b^{-}_{kij} і b^{+}_{kij} були невід'ємними.

Третя група обмежень пов'язана з встановленням нижніх і верхніх границь на змінні задачі:

$$\underline{\Delta q_i} \le \Delta q_i \le \overline{\Delta q_i}, \quad \underline{\Delta a_{ij}} \le \Delta a_{ij} \le \overline{\Delta a_{ij}}, \quad i, j = \overline{1,n}, \tag{20}$$

де $\underline{\Delta a_{ij}} = \max\{\underline{\gamma_{ij}}, -a_{ij}\}$, $\overline{\Delta a_{ij}} = \min\{\overline{\gamma_{ij}}, 1-a_{ij}\}$, $\underline{\Delta q_i} = \max\{\underline{\gamma_i}, -q_i\}$, $\overline{q_i} = \min\{\overline{\gamma_i}, 1-q_i\}$. Обмеження (20) – об'єднання обмежень (12), (14) і (15), пов'язаних з нижніми і верхніми границями на компоненти вектора Δq і матриці ΔA.

Наостанок, введемо додаткові змінні

$$z = (E - (A + \Delta A)^T)^{-1}(q + \Delta q),$$

що в постановці задачі буде враховано завдяки матричному обмеженню

$$z - (A + \Delta A)^T z = q + \Delta q. \tag{21}$$

Задачі максимізації величини D відповідає оптимізаційна задача

$$F_1(z) = \frac{z^T h}{1 - z^T \alpha} \to \max, \text{ де } (z, \Delta A, \Delta q) \text{ задовольняють умовам (17)–(21).} \tag{22}$$

Задачі максимізації величини k (мультиплікатора "приріст доходів – приріст виробництва") відповідає оптимізаційна задача

$$F_2(z) = z^T \alpha \to \max, \text{ де } (z, \Delta A, \Delta q) \text{ задовольняють умовам (17)–(21).} \tag{23}$$

Обидві оптимізаційні задачі – складні багатоекстремальні задачі математичного програмування. Справедливе твердження.

Теорема 1. Нехай $x^{(1)} = (\Delta A^{(1)}, \Delta q^{(1)}, z^*)$ і $x^{(2)} = (\Delta A^{(2)}, \Delta q^{(2)}, z^*)$ – довільні допустимі розв'язки задач (22) і (23) з однаковими значеннями змінних $z = z^*$. Нехай також $x(\lambda) = \lambda x^{(1)} + (1-\lambda) x^{(2)}$, де $0 < \lambda < 1$ – довільне число. Тоді значення функцій $F_i(z)$, $i = \overline{1,2}$, будуть співпадати для розв'язків $x^{(1)}$, $x^{(2)}$ і $x(\lambda)$, а $x(\lambda)$ буде допустимим розв'язком для довільного $0 < \lambda < 1$.

Доведення теореми викладено у роботі [3].

Зазначимо, що компоненти вектора z відображають структуру кінцевих доходів, отриманих від різних видів економічної діяльності. Дана структура визначає паритет інтересів (існуючий або бажаний) між різними суб'єктами господарювання. Моделі (22) і (23), розглянуті при заданих z, – моделі з фіксованими цілями, в яких результати визначені, але потрібно побудувати множину інструментів, тобто дій, що дозволяють досягти ці результати. Застосування таких моделей відіграє важливу роль як для попереднього аналізу ситуації, так і для остаточного відбору раніше отриманих рішень. З цього погляду генерація множини допустимих розв’язків задач (22) і (23) зі значеннями цільових функцій, досить близькими до глобального максимуму, і проведення розрахунків у діалоговому режимі відіграє важливу роль.

Алгоритм розв’язання та його програмна реалізація. Для знаходження локальних екстремумів у задачах (22) і (23) реалізована програма MULSTR1 на мові програмування RATFOR (препроцесор Фортрану). Ці задачі зводилися до задач безумовної максимізації, використовуючи метод негладких штрафних функцій у вигляді функцій максимуму. Для розв’язування останніх застосовувався $r(\alpha)$-алгоритм [6–8], що зарекомендував себе практично ефективним методом при мінімізації опуклих недиференційовних функцій.

У програмі MULSTR1 передбачене керування трьома штрафними множниками (використовуються при зведенні задач (22) і (23) до задач безумовної оптимізації). Кожний зі штрафних множників пов'язаний відповідно зі своєю групою обмежень. Так, перший штрафний множник відповідає групі обмежень (21), другий – групам обмежень (17) і (18), пов'язаних з коефіцієнтом β, третій – для групи ресурсних обмежень (19). Обмеження (20) у вигляді двосторонніх обмежень на ΔA і Δq не включаються у негладку штрафну функцію, а враховуються за допомогою заміни змінних ΔA і Δq на нові змінні, які визначені на всьому евклідовому просторі. Цей прийом часто застосовується при використанні *r*-алгоритмів й інтерпретується як "парне" періодичне продовження функції, заданої на відрізку [7]. До керуючих параметрів $r(\alpha)$-алгоритму віднесені: h_0 – початковий кроковий множник, $maxitn$ – максимальне число ітерацій; ε_x – точність для критерію зупинки за аргументом, ε_g – точність для критерію зупинки за нормою субградієнта, α – коефіцієнт розтягу простору; q_1, q_2, n_h – параметри адаптивного регулювання крокового множника. Багатоекстремальність задач (22) і (23) враховується за допомогою проведення розрахунків з 10 різних початкових точок.

Програма MULSTR1 була включена як складова до діалогової системи MiSTC (Mikhalevich Structural and Technological Changes), розробленої для аналізу та прогнозування структурно-технологічних змін в економіці на основі моделей М.В. Михалевича. Віконний інтерфейс цієї системи реалізовано за допомогою кросплатформеної бібліотеки Qt розширення мови C++, яка підтримується компанією Nokia. Він слугує для зручного введення початкових даних для задач із контролем даних і аналізу результатів обчислень. Для виконання обчислень задіяно інтерпретатор, який використовує сумісну з MATLAB мову високого рівня Octave (розповсюджується за ліцензією GNU GPL). Інтерпретатор викликається безпосередньо через функцію feval без завантаження командного рядка.

Результати обчислень подаються у вигляді таблиці, що містить матрицю $A+\Delta A$, вектори $q+\Delta q$ і z (рис. 1). Системою також надається можливість виводити безпосередньо ΔA і Δq, а також виділяти кольором в обох випадках елементи, які змінилися у більший чи менший бік порівняно з початковими. Вибір локального екстремуму (номер варіанта розрахунку в залежності від початкової точки) здійснюється у полі праворуч. У полі «Видалити однакові» можна задати критерій (дійсне невід’ємне число) для фільтрації рекордних точок розрахунків за умовою: дві рекордні точки вважаються тотожними, якщо найбільший за модулем елемент матриці їх різниці, не перевищує заданого критерію. У двох таблицях нижньої частини вікна відображаються рекордні та кінцеві значення цільової функції, нев’язки та інформація про роботу алгоритму.

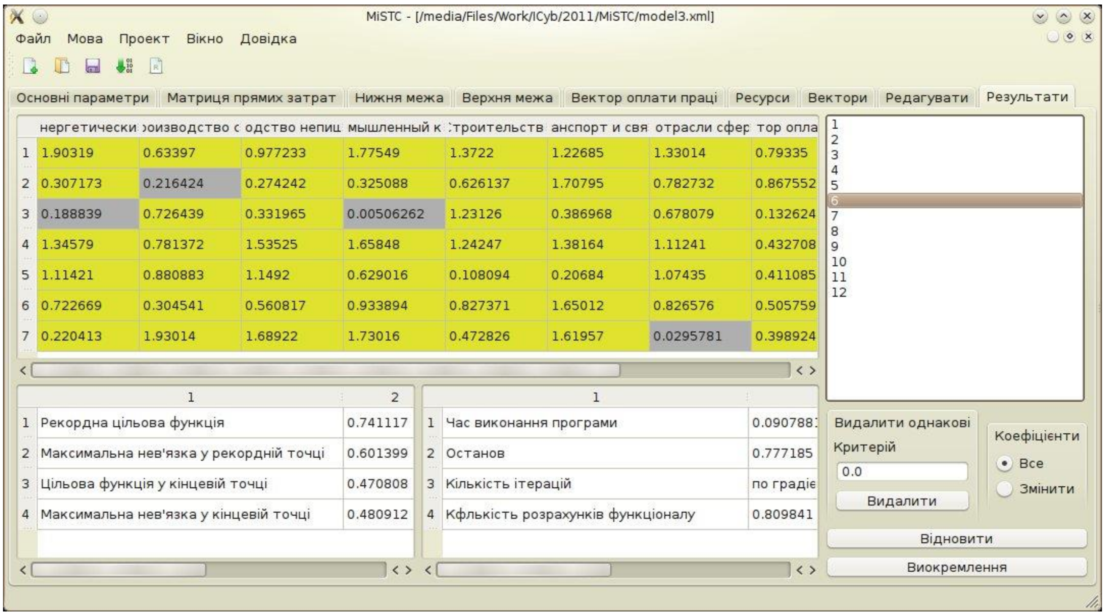

РИС. 1. Перегляд результатів роботи оптимізаційних модулів

Програма генерує звіт у форматі HTML, який відображається в окремому вікні (рис. 2). MiSTC забезпечує можливість перегляду, збереження звіту у файл та відкриття попередньо згенерованих html-сторінок. Для підтримки кросплатформеності забезпечено можливість зміни поточного кодування тексту.

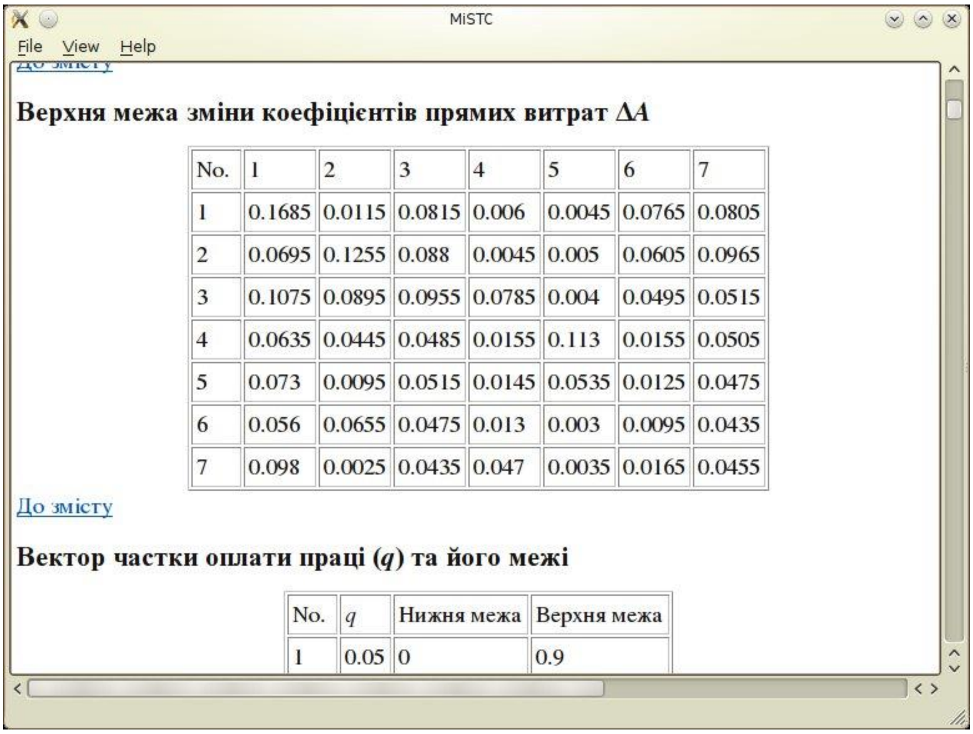

РИС. 2. Вікно звіту за результатами обчислень

Використовуючи вищезазначену систему, було проведено верифікацію моделей на реальних даних щодо економіки України двохтисячних років. Більш детальний опис системи MiSTC та питань, пов'язаних з її використанням наведено в [9].

Висновки. Запропоновані М.В. Михалевичем балансові моделі на основі використання таблиць міжгалузевого балансу типу «витрати-випуск» можуть бути використані для макроекономічного прогнозування структурно-технологічних змін в економіці України у повоєнний період. На відміну від існуючих підходів, нові постановки задач моделювання структурно-технологічних змін з використанням таблиць «витрати-випуск» мають обмеження у вигляді негладких функцій і визначають необхідні умови продуктивності технологічної матриці.

Подальші дослідження можуть бути пов'язані із різними сферами фактичного використання запропонованих математичних моделей у класико-кейнсіанській політичній економії [10].

1. Одна із найскладніших проблем розвитку економіки України – проблема задоволення потреб країни паливно-енергетичними ресурсами і зменшення енергоємності виробленого валового продукту [11]. В Україні рівень співвідношення проміжного споживання енергії до загального випуску продукції – значно вищий порівняно з розвинутими країнами. Успішне вирішення цієї проблеми потребує побудови такої макроекономічної моделі, яка б дозволила врахувати міжгалузеві зв'язки та необхідні структурно-технологічні зміни у паливно-енергетичному комплексі з урахуванням цілей сталого розвитку. Запропоновані оптимізаційні задачі М.В. Михалевича визначення коефіцієнтів прямих витрат та питомих обсягів споживання продукції у поєднанні з розробленими під керівництвом академіка Н.З. Шора алгоритмами негладкої оптимізації дозволяють оцінити потребу в паливно-енергетичних ресурсах галузей-споживачів та кінцевого споживання (попит домогосподарств), а також можливі напрями технологічної трансформації енергетичної галузі з урахуванням екологічних обмежень.

2. План повоєнного відновлення економіки передбачає залучення міжнародної фінансової допомоги через надання пільгових кредитів або грантів для реконструкції, модернізації або побудови нових об'єктів інфраструктури, виробничих потужностей різних галузей замість старих, пошкоджених або знищених війною активів. Базовим принципом такої відбудови визначено принцип «зеленості», тобто «зелена» відбудова має передбачати активне впровадження «зелених» технологій у різних секторах одночасно з метою зменшення викидів вуглецевих сполук та ефективного використання наявних природних ресурсів відповідно до інтересів усього суспільства. Обрана стратегія потребує координації зусиль різних зацікавлених сторін та макроекономічного прогнозування розвитку як економіки країни, так і її регіонів. Представлені в даній статті математичні моделі можуть бути розширені за рахунок включення до них показників забруднення довкілля та встановлення більш обґрунтованих оцінок сукупного доходу населення, недоотриманого внаслідок забруднення навколишнього середовища [12, 13].

Список літератури

1. Сергиенко И.В., Михалевич М.В., Стецюк П.И., Кошлай Л.Б. Межотраслевая модель планирования структурно-технологических изменений. *Кибернетика и системный анализ*. 1998. № 3. С. 3–17.
2. Михалевич М.В., Сергиенко И.В. Моделирование переходной экономики: модели, методы, информационные технологии. К.: Наук. думка, 2005. 670 с.
3. Сергиенко И.В., Михалевич М.В., Стецюк П.И., Кошлай Л.Б. Модели и информационные технологии для поддержки принятия решений при проведении структурно-технологических преобразований. *Кибернетика и системный анализ*. 2009. № 2. С. 26–49.
4. Sergienko I.V., Mikhalevich M.V., Koshlai L.B. Optimization Models in a Transitional Economy. Springer: Optimization and its Application, 2014. 334 p.
5. Михалевич В.С., Михалевич М.В. Динамические макромодели процессов ценообразования в переходной экономике. *Кибернетика и системний анализ.* 1995. № 3. С. 28–49.

6. Шор Н.З. Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. Киев: Наук. думка, 1979. 199 с.
7. Шор Н.З., Стеценко С.И. Квадратичные экстремальные задачи и недифференцируемая оптимизация. Киев: Наукова думка, 1989. 208 с.
8. Shor N.Z. Nondifferentiable Optimization and Polynomial Problems Amsterdam: Kluwer Acad. Publ., 1998. 394 p.
9. Стецюк П.И., Бортис Г., Эмменеггер Ж.Ф. и др. Институциональные и технологические изменения в странах с рыночной и переходной экономикой. К.: Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2015. 336 с.
10. Бортис Г. Институции, поведение и экономическая теория: вклад в классико-кейнсианскую политическую экономию. К.: ВД "Києво-Могилянська академія", 2009. 598 с.
11. Інтерв'ю члена-кореспондента НАН України Віталія Бабака. https://www.youtube.com/watch?v=3RgkH11pW-E (дата звернення: 16.09.2022)
12. Ляшенко І.М., Онищенко А.М. Прямі та двоїсті балансові моделі «витрати-випуск». *Економічна кібернетика*. 2009. № 1–2. С. 14–18.
13. Ляшенко І.М., Коробова М.В., Горіцина І.А. Моделювання економічних, екологічних і соціальних процесів. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2010. 320 с.

Одержано 16.09.2022

Стецюк Петро Іванович,
доктор фізико-математичних наук,
завідувач відділу методів негладкої оптимізації
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
stetsyukp@gmail.com
orcid.org/0000-0003-4036-2543

Григорак Марія Юріївна,
доктор економічних наук, старший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
m_grigorak@ukr.net
orcid.org/0000-0002-5023-8602

Березовський Олег Анатолійович,
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
mailto:o.a.berezovskyi@gmail.com
orcid.org/0000-0003-0932-0265

Лиховид Олексій Петрович,
науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.
o.lykhovyd@gmail.com

UDC 338.5

Petro Stetsyuk [*], Maria Grygorak, Oleg Berezovskyi, Oleksii Lykhovyd

Mathematical Models of M.V. Mykhalevych for Forecasting Structural and Technological Changes

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv
[*] *Correspondence: stetsyukp@gmail.com*

Introduction. The identification of structural and technological disproportions that affect crisis phenomena in the economy and the analysis of ways to eliminate them require a wide application of quantitative research methods, in particular, mathematical modeling. "Input-Output" tables of Leontief turned out to be quite a convenient tool for analyzing these economic issues. In Leontief-type models, the matrix of technical coefficients (matrix of direct costs) is assumed to be known and calculated on the basis of statistical information from the “input-output” tables. M.V. Mykhalevych formulated the “inverse” problem: how to determine those structural and technological changes that would reduce the cost of production and thereby increase the incomes of end consumers and make the economy more dynamic. Or, in other words, how to choose or adjust technical coefficients to improve the properties of the economic process. This work is devoted to two optimization problems built on the basis of models of this type.

The purpose of the article is to optimize the interdisciplinary planning of structural and technological changes.

Results. Inverse models of the Leontief type for optimization of structural and technological transformations in economic systems are considered. These models are formulated in terms of nonlinear programming problems and include two objective functions for maximization: total consumer incomes and the “income growth–production growth” multiplier. Algorithms and software for solving these problems are presented. Numerical optimization procedures are based on Shor's r-algorithm.

Conclusions. The use of inverse models of the Leontief type will allow choosing promising directions of structural and technological transformations in both the macro- and microeconomy. The proposed mathematical apparatus based on non-smooth optimization algorithms proved to be a sufficiently effective tool for solving appropriate optimization problems in practice.

Keywords: structural and technological changes, inter-industry balance, Leontief model, “input-output” matrix, inverse Leontief-type models, non-smooth optimization algorithms, software.