

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Розробки Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України відкрили можливість для використання оптимізаційних методів для розв'язання задач, котрі традиційно вирішуються прямим розрахунком. Це стосується застосування динамічного мізгалузового балансу до інноваційного розвитку економіки, включно з «зеленим» аспектом, котрі актуальні і для світу, і для України. Продемонстровано базову модель і метод її вирішення.

Ключові слова: динамічні моделі витрат-випуску, оптимізація, інновації, тестові розрахунки.

© В.В. Рябошлик, О.І. Воловик,
О.П. Лиховид, 2025

УДК 519.8

DOI:10.34229/2707-451X.25.1.5

В.В. РЯБОШЛИК, О.І. ВОЛОВИК, О.П. ЛИХОВИД

ІДЕЇ В.С. І М.В. МИХАЛЕВИЧІВ – ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ ТА СПРИЯННЯ РОЗВИТКУ НА МІЖНАРОДНОМУ РІВНІ

Вступ. Досягнення Школи сучасного мізгалузового балансу Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України¹ заснованої В.С. і М.В. Михалевичами представляють інтерес як на національному, так і на міжнародному рівнях. Див. Михалевич В.С. та ін. [1–5], Михалевич М.В. та ін. [6], Сергієнко та ін. [7], Стецюк та ін. [8], Рябошлик [9], Ryaboshlyk [10, 11], Kulyk [12]. У даній статті наводиться порівняльний огляд різних напрямків діяльності Школи, і зроблено висновки щодо їх значення для підвищення ефективності планування і прогнозування інноваційного відновлення України.

У контексті мейнстріму світової науки, розробки Інституту кібернетики можна інтерпретувати як вдосконалення методології двох головних підходів до інноваційного розвитку, а саме: «зверху вниз» і «знизу вверх».

Підхід «зверху-вниз» дає економетричний прогноз характеристик нових технологій (продуктивності, енергомісткості, викидам CO₂ тощо) на основі кореляцій між обсягами видатків на наукові дослідження і розробки, кількості зайнятих у цьому вчених тощо, з одного боку; і покращенням звичайних і «зелених» параметрів нових технологій, з іншого боку. Дивись розробки групи Cambridge Econometrics: Lewney et al [13], E3ME [14], MDM-E3 [15]).

Підхід «знизу-вверх» – більш точний і розвинений та базується на кінцевих результатах конкретних розробок, для котрих вирішується динамічна задача планування і прогнозування їх практичного запровадження, як збалансованого перехідного процесу заміщення старих технологій новими. Окрім вже згаданих робіт Cambridge Econometrics, дивись також Černý et al [16, 17], Harris et al [18], Court et al [19].

¹ Далі: Інститут кібернетики

Внесок Інституту кібернетики у підхід «зверху-вниз» полягає у тому, що В.С. і М.В. Михалевичами була запропонована *обернена задача* міжгалузевого балансу, де замість прогнозу характеристик технологій на основі видатків на розробки, прогнозуються самі обсяги цих видатків необхідні для створення тих технологій, котрі є нагально-потрібними економіці. Це означає, що при цьому також вирішена і задача генерації характеристик згаданих технологій, зокрема, потреби у нових технологіях у енергетиці.

Внесок у підхід «знизу-вверх» пояснюється наступним чином. Традиційно, планування і прогнозування динаміки переходу до нових технологій виконується у залежності від кейнсіанського сукупного попиту (на споживання, інвестиції тощо) котрі визначаються економетрично на основі статистичних рядків (наприклад, особисте споживання, розраховується складною формулою у залежності від особистих доходів, заощаджень, накопиченого багатства, очікувань, відсоткових ставок, цін тощо). Далі, через матрицю повних затрат Леонтьєва визначаються обсяги виробництва по галузях, необхідні для задоволення попередньо-оціненого кінцевого попиту. Для них, у свою чергу, визначаються потреби у робочій силі та у виробничих потужностях. І нарешті, потреби порівнюються з фактичною наявністю цих ресурсів, виявляються розбіжності, і після декількох ітерацій формуються збалансовані сценарії.

Це складні прямі розрахунки які важко піддаються формалізації у єдиній моделі. Інститут кібернетики не пішов шляхом вдосконалення цього на-попит-орієнтованого підходу, а запропонував іншу постановку задачі, орієнтовану на пропозицію, яка представляє самостійний економічний інтерес, і при цьому розв'язується всеохоплюючою оптимізаційною моделлю. А саме, ставиться суттєво інша і простіша задача пошуку найвищого технологічно-допустимого споживання, тобто пошуку такого збалансованого перехідного процесу до нових технологій, котрий забезпечує найвищий можливий добробут.

Перш за все, це дає верхню оцінку максимально-можливого попиту, як технологічно обумовлену рамку, в межах якої традиційна задача може подальше уточнювати обсяг попиту. Крім того, це можна також інтерпретувати як оцінку макроекономічної потужності інноваційних технологій.

Підхід з боку попиту відноситься до чистих динамічних задач витрат-випуску без зайвих економетричних ускладнень. Завдяки чому технологічно-можливий максимальний попит і відповідна технічна потреба в інвестиціях і у робочій силі визначаються ендегенно. Це може розглядатися як альтернатива, наприклад підходу Lewney et al [17].

Розгляд не тільки деяких допустимих, а й оптимальних сценаріїв, дозволив суттєво підвищити точність економічного прогнозування кількісно й якісно. Зокрема, метод витрат-випуску нині здатен охоплювати економічні коливання і бізнес-цикли, рушієм яких є технологічні зміни. Див. Ryaboshlyk [10, 11].

Для України це відкриває перспективи кількісно конкретизувати вже задекларовані гасла відновлення «краще ніж було» і «зеленого відновлення». Зокрема, вирішувати задачі ефективного використання зовнішніх і внутрішніх ресурсів для досягнення амбітних цілей подвоєння ВВП з наступним наближенням до рівня розвинених країн.

У міжнародному аспекті, це також відповідає запиту на більш прості, і водночас більш адекватні моделі. На стільки прості, щоб їх можна було викладати студентам. Така потреба виникла у зв'язку з кризою економічної науки яку виявила економічна криза 2008 року. Див. Stiglitz [20].

Базова модель технологічного переходу. Економічна постановка задачі. Припустимо, що економіка складається з десяти робітників чия кількість залишається незмінною. Вони голими руками виробляють та споживають десять одиниць хліба за рік. Потім відбувся винахід інструменту, за допомогою якого робітник може виробляти в три рази більше хліба, але виготовлення одного інструменту потребує трьох років праці одного робітника. Термін служби інструменту складає п'ять років.

Новий збалансований стан за повного переходу на нову технологію є наступним: кількість робітників зайнятих на виробництві інструментів становить 3,75 осіб, котрі виготовляють 1,25 інструментів; кількість робітників, зайнятих виробництвом хліба за допомогою інструментів становить 6,25 осіб, котрі виробляють 18,75 (6,25х3) одиниць хліба; кількість всіх інструментів у економіці, котрими озброєні робітники на виробництві хліба, відповідно складає 6,25 штук, з яких щорічно вибуває 1,25 інструментів і які замінюються такою ж кількістю вироблених інструментів.

Як видно, нова технологія дозволяє майже подвоїти споживання, проте миттєвий перехід є неможливим через те що неможливо миттєво нагромадити необхідний обсяг фіксованого капіталу. Так, навіть у крайньому випадку, якщо тимчасово повністю відмовитися від споживання і одразу перекинути усіх робітників на інвестування (на виробництво інструментів), то за рік буде виготовлено лише 3,33 одиниці (10:3), чого всеодно буде недостатньо. Тому економіка потребує перехідного періоду збалансованого співіснування нового і старого поки останнє не буде остаточно витіснене.

Математична модель. Для знаходження оптимальної траєкторії переходу пропонується математична модель.

Цільова функція

$$\max \sum_t x_{brd}^{tot}(t) * (1 + d)^{1-t}. \quad (1)$$

Обмеження

$$x_{brd}^{tot}(t) = x_{brd}^{old}(t) + x_{brd}^{new}(t), \quad (2)$$

$$x_{brd}^{tot}(t) \geq \lim, \quad (3)$$

$$l_{brd}^{old}(t) = x_{brd}^{old}(t)/p_{brd}^{old}, \quad (4)$$

$$l_{brd}^{new}(t) = x_{brd}^{new}(t)/p_{brd}^{new}, \quad (5)$$

$$l_{cap}(t) = x_{cap}(t)/p_{cap}, \quad (6)$$

$$l_{brd}^{old}(t) + l_{brd}^{new}(t) + l_{cap}(t) \leq l^{tot}, \quad (7)$$

$$ksnd_{brd}^{new}(t) = l_{brd}^{new}(t) * k_{brd}^{new}, \quad (8)$$

$$ksnd_{brd}^{new}(t) \leq ksav_{brd}^{new}(t), \quad (9)$$

$$ksav_{brd}^{new}(t + 1) = ksav_{brd}^{new}(t) + x_{cap}(t) - x_{cap}(t - \tau), \quad (10)$$

$$\text{if } (t - \tau) \leq 0 \text{ then } x_{cap}(t - \tau) = 0,$$

$$ksav_{brd}^{new}(1) = 0, \quad (11)$$

$$x_{brd}^{old}(t) \geq 0, \quad (12)$$

$$x_{brd}^{new}(t) \geq 0, \quad (13)$$

$$x_{cap}(t) \geq 0. \quad (14)$$

Економіка складається з трьох секторів: виробництво хліба за старою технологією позначене індексами ‘ old_{brd} ’; виробництво хліба за новою технологією позначене ‘ new_{brd} ’; виробництво інструменту (фіксованого капіталу) позначене ‘ cap ’.

Задані величини: l^{tot} – загальна кількість робітників дорівнює 10; p_{brd}^{old} , p_{brd}^{new} , p_{cap} – продуктивність праці у кожному секторі, яка дорівнює відповідно 1, 3, та 0,333; $\lim$ – найнижча дозволена

межа споживання дорівнює 5; k_{brd}^{new} – фондоозброєність (капіталоозброєність) дорівнює 1 інструменту на одного робітника; τ – термін служби інструменту (капіталу) і дорівнює 5 рокам; d – ставка дисконту в десять відсотків; t – інтервал планування від одного до тридцяти років.

Змінні величини: $x_{brd}^{tot}(t)$, $x_{brd}^{old}(t)$, $x_{brd}^{new}(t)$ – загальне виробництво хліба та виробництво за старою та новою технологією; $x_{cap}(t)$ – випуск інвестиційних засобів виробництва (капіталу); $l_{brd}^{old}(t)$, $l_{brd}^{new}(t)$, $l_{cap}(t)$ – розподіл робочої сили за секторами; $ksnd_{brd}^{new}(t)$ – потрібна кількість інструментів для озброєння виробників хліба за новою технологією; $ksav_{brd}^{new}(t)$ – наявна кількість інструментів. Очевидно, що на початок першого року перехідного періоду ця кількість дорівнює нулю ($ksav_{brd}^{new}(1) = 0$).

Цільова функція вимагає максимізації дисконтованої суми загального виробництва хліба, як показано у співвідношенні (1), де загальне виробництво хліба дорівнює сумі обсягів виробництва за старою та новою технологіями згідно формули (2). Обмеження (3) задає найнижчу допустиму межу споживання хліба, яку встановлено у 5 одиниць.

Формули (4)–(6) визначають потреби виробництва у робочій силі за секторами шляхом ділення обсягів виробництва на продуктивність праці. При цьому, як вимагає обмеження (7), сума цих потреб не повинна перевищувати всієї чисельності робочої сили. Формула (8) визначає потребу в інструментах для озброєння виробників хліба за новою технологією, і ця потреба не повинна перевищувати наявної кількості інструментів згідно обмеження (9).

Динаміка наявної кількості інструментів (капітальних фондів) розраховується за формулою (10). Тут звернемо увагу, що хоча загальний вигляд цієї формули є типовим – фонди на кінець року дорівнюють фондам на початок плюс інвестиції мінус вибуття – одна з оригінальних рис цієї моделі полягає у тому, що у нас фізичне вибуття не ототожнюється з фінансовою амортизацією і не визначається стандартною формулою $ksav_{brd}^{new}(t)/\tau$. Натомість, більш адекватно вважати, що фізичне вибуття відбувається не частками а цілком після спливання терміну служби. Цьому вибуттю відповідає формула $x_{cap}(t - \tau)$, тобто, вибуття інструментів дорівнює обсягу інструментів котрі були вироблені 5 років тому. Як буде показано, ця начебто дрібна технічна поправка має великі наслідки для схоплення коливаний.

Формули (11)–(14) задають очевидні вимоги до невідомості показників і, що з самого початку інструментів ще немає.

Стратегія розв’язання задачі (1)–(14) полягає у розрахунку потрібного обсягу інвестицій у нову технологію у кожному році. Результати обчислень також дають значення необхідної щорічної кількості робочої сили задіяної у виробництві продукції споживання (у нашому випадку хліба) та у виробництві засобів виробництва (у нашому випадку інструментів) (див. таблицю).

Чисельні експерименти. Задача (1)–(14) була реалізована за допомогою системи алгебраїчного моделювання AMPL. AMPL-реалізацію для тестового прикладу наведено далі.

```
#reset;
# parameters
param ltot default 10;
param poldbrd default 1;
param pnewbrd default 3;
param pcap default 0.333;
param lim default 5;
param knewbrd default 1;
param tau default 5;
param d default 0;
param T default 30;
```

```

#variables
var xtotbrd{t in 1..T} >=0 ;
var xoldbrd {t in 1..T} >=0 ;
var xnewbrd {t in 1..T} >=0 ;
var xcap {t in 1..T} >=0 ;
var loldbrd{t in 1..T} >=0 ;
var lnewbrd{t in 1..T} >=0 ;
var lcap{t in 1..T} >=0 ;
var ksndnewbrd{t in 1..T} >=0 ;
var ksavnewbrd{t in 1..T} >=0 ;
# objective
maximize obj: sum {t in 1..T} (xtotbrd[t]*(1+d)**(1-t));
# constraints
subject to con1 {t in 1..T}: xtotbrd[t] = xoldbrd[t]+xnewbrd[t];
subject to con2 {t in 1..T}: xtotbrd[t] >= lim;
subject to con3 {t in 1..T}: loldbrd[t] = xoldbrd[t]/poldbrd;
subject to con4 {t in 1..T}: lnewbrd[t] = xnewbrd[t]/pnewbrd;
subject to con5 {t in 1..T}: lcap[t]= xcap[t]/pcap;
subject to con6 {t in 1..T}: loldbrd[t]+lnewbrd[t]+lcap[t] <= ltot;
subject to con7 {t in 1..T}: ksndnewbrd[t] = lnewbrd[t]*knewbrd;
subject to con8a: ksavnewbrd[1] = 0;
subject to con8b {t in 1..tau}: ksavnewbrd[t+1] = ksavnewbrd[t] + xcap[t];
subject to con8c {t in tau+1..T-1}: ksavnewbrd[t+1] = ksavnewbrd[t] + xcap[t] -
xcap[t-tau];
subject to con9 {t in 1..T}: ksndnewbrd[t] <= ksavnewbrd[t];
##### Solving Test 1 #####
#option solver gurobi;
solve ;
display xtotbrd;
display xoldbrd ;
display xnewbrd ;
display xcap ;
display loldbrd;
display lnewbrd;
display lcap;
display ksndnewbrd;
display ksavnewbrd;
printf "t,xtotbrd,xoldbrd,xnewbrd,xcap,loldbrd,lnewbrd,lcap,ksndnewbrd,ksavnewbrd\n"
;
for{i in 1..T}{
printf
"%d,%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f,%f\n",i,xtotbrd[i],xoldbrd[i],xnewbrd[i],xcap[i],loldbrd[
i],lnewbrd[i],lcap[i],ksndnewbrd[i],ksavnewbrd[i];
}

```

З математичної точки зору, задача (1)–(14) – це задача лінійного програмування. Для її розв’язання використовувався солвер Gurobi з сервера NEOS, див. Gropp and Moré [21], Czyzyk et al [22], Dolan [23]. Далі в таблиці наведено та на рисунку показано результати обчислень програмою Gurobi з сервера NEOS для тестового прикладу $lim = 5$ (програма Gurobi 7.5.0, оптимальне значення цільової функції 500.8795203).

ТАБЛИЦЯ. Результати обчислень для тестового прикладу $lim = 5$

t (рік)	x_{brd}^{tot}	x_{brd}^{old}	x_{brd}^{new}	x_{cap}	l_{brd}^{old}	l_{brd}^{new}	l_{cap}	$ksnd_{brd}^{new}$	$ksav_{brd}^{new}$
1	5	5	0	1.665	5	0	5	0	0
2	5	0.005	4.995	2.77389	0.005	1.665	8.33	1.665	1.665
3	13.31667	0	13.31667	1.85185	0	4.43889	5.56111	4.43889	4.43889
4	18.87222	0	18.87222	1.235184	0	6.29074	3.70926	6.29074	6.29074
5	22.57777	0	22.57777	0.823868	0	7.525923	2.474077	7.525923	7.525923
6	25.04937	0	25.04937	0.54952	0	8.349791	1.650209	8.349791	8.349791
7	21.70293	0	21.70293	0.920975	0	7.234311	2.765689	7.234311	7.234311
8	16.14419	0	16.14419	1.537995	0	5.381395	4.618605	5.381395	5.381395
9	15.20262	0	15.20262	1.642509	0	5.067541	4.932459	5.067541	5.067541
10	16.4246	0	16.4246	1.50687	0	5.474866	4.525134	5.474866	5.474866
11	18.4736	0	18.4736	1.27943	0	6.157868	3.842132	6.157868	6.157868
12	20.66334	0	20.66334	1.03637	0	6.887778	3.112222	6.887778	6.887778
13	21.00952	0	21.00952	0.997943	0	7.003174	2.996826	7.003174	7.003174
14	19.38936	0	19.38936	1.177781	0	6.463121	3.536879	6.463121	6.463121
15	17.99518	0	17.99518	1.332535	0	5.998393	4.001607	5.998393	5.998393
16	17.47218	0	17.47218	1.390588	0	5.824059	4.175941	5.824059	5.824059
17	17.80565	0	17.80565	1.353573	0	5.935217	4.064783	5.935217	5.935217
18	18.75726	0	18.75726	1.247944	0	6.25242	3.74758	6.25242	6.25242
19	19.50726	0	19.50726	1.164694	0	6.502421	3.497579	6.502421	6.502421
20	19.468	0	19.468	1.169052	0	6.489334	3.510666	6.489334	6.489334
21	18.97755	0	18.97755	1.223492	0	6.325851	3.674149	6.325851	6.325851
22	18.47626	0	18.47626	1.279135	0	6.158754	3.841246	6.158754	6.158754
23	18.25295	0	18.25295	1.303923	0	6.084316	3.915684	6.084316	6.084316
24	18.42088	0	18.42088	1.285282	0	6.140295	3.859705	6.140295	6.140295
25	18.78265	0	18.78265	1.245126	0	6.260883	3.739117	6.260883	6.260883
26	19.01087	0	19.01087	1.219793	0	6.336957	3.663043	6.336957	6.336957
27	18.99978	0	18.99978	1.221025	0	6.333259	3.666741	6.333259	6.333259
28	18.82545	0	18.82545	1.240375	0	6.275149	3.724851	6.275149	6.275149
29	22.4232	3.788399	18.6348	0	3.788399	6.211601	0	6.211601	6.211601
30	19.85264	5.07368	14.77896	0	5.07368	4.92632	0	4.92632	4.92632

Результати обчислень показують, що, за адекватного моделювання оптимальних сценаріїв переходу на нові технології, навіть найпростіша базова модель ендогенно генерує повний бізнес-цикл рушієм якого є технологічні зміни. Це є конкурентною альтернативою досі пануючій кейнсіанської версії бізнес циклу рушієм якого начебто є коливання сукупного попиту (це викликає запитання навіть на рівні здорового глузду – чому це у людей то зникає, то відновлюється апетит споживати).

Втім, як це видно з рисунку, навіть за відсутності проблем з боку попиту, невідворотні рецесії все-одно можуть відбуватися як початкова фаза перехідного процесу.

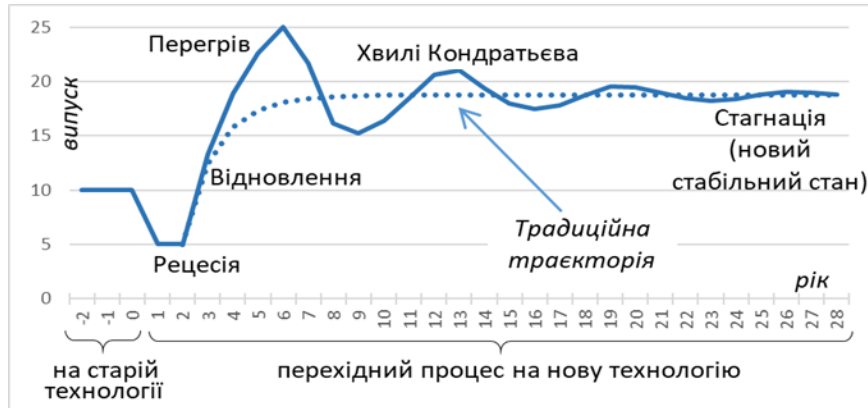


РИСУНОК. Сумарний випуск згідно тестового прикладу $\lim = 5$, індикатор $x_{bra}^{tot}(t)$

При цьому те, що ця задача оптимізаційна є особливо важливим тому, що саме це доводить існування невідворотних рецесій, коли виникають поняття оптимальної рецесії і оптимальної кризи, котрих слід не уникати, а пом'якшувати.

Інша перевага – це найбільш *економна* версія циклу, у тому сенсі що мета встановлення причин циклу взагалі не ставилася, і він виник як неочікуваний побічний і навіть небажаний результат задачі максимізації добробуту; без будь-яких звернень до численних шоків, підшоків тощо. Для України, цей підхід міг би стати у нагоді для планування ефективного використання зовнішніх допомог та інших ресурсів, а щодо розглянутої ринкової фази тимчасового спаду, то вона виникне не раніше наближення України до рівня розвинених країн.

Пунктирна крива ілюструє як загальноприйняте ототожнення фізичного вибуття основного капіталу з фінансовою амортизацією позбавило економічне моделювання від коливань. Припущення, що основні фонди починають фізично «танути» одразу після встановлення, надто розходиться з реальним вибуттям котре відбувається не поступово а дискретно. Окрім зниження оцінки виробничих потужностей і виробництва, це зглажує траєкторію, що породило птолемічну множинність зовнішніх шоків та інших ускладнень щоб примусити неадекватну модель коливатися.

Висновки. Ендогенно показано, що динаміка економіки, яка зумовлена радикальними технологічними змінами, відповідає динаміці розвитку бізнес циклу, тобто, фаз початкового тимчасового спаду, відновлення, зростання, перегріву та хвиль Кондратьєва що затухають до стаціонарного стану або стагнації. Запропонований підхід до моделювання має потенціал підвищити точність планування і прогнозування інноваційного і «зеленого» розвитку всіх країн. Для України – підвищити точність і детальність планування відновлення, у тому числі відновлення «краще ніж було» і «зеленого відновлення».

Авторські внески. Рябошлик В.В. – дослідження, концептуалізація, методологія, формальний аналіз, написання – остаточне редагування; Воловик О.І. – дослідження, опис моделі, аналіз моделі, узагальнення, написання чернетки, редагування, оформлення; Лиховид О.П. – програмне забезпечення, розрахунки, візуалізація.

Подяка. Автори висловлюють подяку Стецюку Петру Івановичу, доктору фізико-математичних наук, члену-кореспонденту НАН України за підтримку та допомогу в проведенні даного дослідження. Робота виконана за підтримки проекту 2.3/25-П НАН України.

Список літератури

1. Михалевич В.С., Сергиенко І.В., Шор Н.З. Исследование методов решения оптимизационных задач и их приложения. *Кибернетика*. 1981. № 4. С. 89–113. <https://doi.org/10.1007/BF01082482>
2. Михалевич В.С., Ю.М. Ермольев, В.Т. Лоскутов и др. Описание пакета программ недифференцируемой и стохастической оптимизации. *Исследование операций и АСУ*. Киев: Вища шк., 1986. Вып. 27. С. 1–19.
3. Михалевич В.С., Бакаев А.А., Гриценко В.И., Ревенко В.Л., Кузнецов Ю.Н. *Информационная технология на транспорте* / ред. В.С. Михалевич. Киев: Наук. думка, 1991. 204 с.
4. Михалевич В.С., Михалевич М.В., Подолев И.В. *Моделирование некоторых процессов в экономике Украины*. 1993. 19 с. (Препр. / НАН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова; 93-46).
5. Михалевич В.С., Михалевич М.В. Динамические макромоделли процессов ценообразования в переходной экономике. *Кибернетика и системный анализ*. 1995. № 3. С. 116–130. <https://doi.org/10.1007/BF02366519>
6. Михалевич М.В., Сергиенко І.В. *Моделирование переходной экономики. Модели, методы, информационные технологии*. К.: Наук. думка, 2005. 672 с.
7. Сергиенко І.В., Михалевич М.В., Стецюк П.И., Кошпай Л.Б. Межотраслевая модель планирования структурно-технологических изменений. *Кибернетика и системный анализ*. 1998. №3. С. 3–17.
8. Стецюк П.І., Березовський О.А., Лиховид О.П. Математичні моделі, методи та програмне забезпечення для планування міжгалузевих структурно-технологічних змін. В книзі *Методи негладкої оптимізації в прикладних задачах*. Київ: ЛАЗУРИТ ПРОЛИГРАФ, 2023. С. 165–205.
9. Рябошлик В.В. Моделирование технологических прыжков. *Матеріали Конференції “Математическое моделирование, оптимизация и информационные технологии*. Молдова, Кишинів. 2016.
10. Ryaboshlyk V. A dynamic input-output model with explicit new and old technologies: an application to the UK. *Economic Systems Research*. 2006. 18(2). P. 183–203.
11. Ryaboshlyk V. An input-output proof of technological changes in business cycle (innovative estimation of innovation impacts). *Economic Systems Research*. 2025. (очікується)
12. Kulyk V.V. Modeling the Inter-Industry Economy as a Critical Infrastructure: Generating Scenarios for the Development of the Economy of Ukraine under the Conditions of War and the Post-War Recovery. *Cybern Syst Anal*. 2023. 59. P. 967–985. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00633-8>
13. Lewney R., Pollitt H., Mercure J-F. From Input-Output to Macro-Econometric Model. *27th IIOA Conference in Glasgow, Scotland*. 2019. P. 1–21.
14. E3ME Model Manual v9.0 (Energy-Environment-Economy Macro-Econometric Model). Cambridge, the UK: Cambridge Econometrics. 2022.
15. MDM-E3: UK Multisectoral Dynamic Model – E3. Cambridge, the UK: Cambridge Econometrics. 2024.
16. Černý M., Bruckner M., Weinzettel J., Wiebe K., Kimmich C., Kerschner C., Hubacek K. Employment effects of the renewable energy transition in the electricity sector. An input-output approach. *ETUI. European Trade Union Institute. Working Paper*. 2021. <https://www.etui.org/sites/default/files/2021-12/Employment%20effects%20of%20the%20renewable%20energy%20transition%20in%20the%20electricity%20sector-An%20input-output%20approach-2021.pdf>.
17. Černý M., Bruckner M., Weinzettel J., Wiebe K., Kimmich C., Kerschner C., Hubacek K. Global employment and skill level requirements for ‘Post-Carbon Europe’. *Ecological Economics*, 216, Article 108014. 2024.
18. Harris S., Weinzettel J., Bigano A., Källmén A. Low carbon cities in 2050? GHG emissions of European cities using production-based and consumption-based emission accounting methods, *Journal of Cleaner Production*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119206>
19. Court C.D., Jackson R.W., Steele A.J.H., Adder J., Pickenpaugh G., Zelek C. Extending the Macroeconomic Impacts Forecasting Capabilities of the National Energy Modeling System. *Regional Research Institute Publications and Working Papers*. 2020. 217. P. 1–21.
20. Stiglitz J.E. Where modern macroeconomics went wrong. In *Rebuilding Macroeconomic Theory*, Vines D., Wills S. eds. Oxford Rev Econ Policy. 2018. Vol. 34, No. 1–2. P. 70–106.
21. Gropp W., Moré J.J. Optimization Environments and the NEOS Server. *Approximation Theory and Optimization*, M. D. Buhmann and A. Iserles, eds. Cambridge University Press, 1997. P. 167–182.
22. Czyzyk J., Mesnier M.P., Moré J.J. The NEOS Server. *IEEE Journal on Computational Science and Engineering*. 1998. 5(3). P. 68–75.
23. Dolan E. The NEOS Server 4.0 Administrative Guide. *Technical Memorandum ANL/MCS-TM-250, Mathematics and Computer Science Division*, Argonne National Laboratory. 2001. <https://www.mcs.anl.gov/papers/TM-250.pdf>

Одержано 22.02.2025

Рябошлик Володимир Всеволодович,

старший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
<https://orcid.org/0000-0002-2642-4368>
ryaboshlyk@ukr.net

Воловик Олена Іванівна,

аспірантка
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
<https://orcid.org/0000-0001-7718-8732>
elenavolovyk@ukr.net

Лиховид Олексій Петрович,

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

УДК 519.8

В.В. Рябошлик*, О.І. Воловик*, О.П. Лиховид

Ідеї В.С. і М.В. Михалевичів – для відновлення України та сприяння розвитку на міжнародному рівні

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ

** Листування: ryaboshlyk@ukr.net, elenavolovyk@ukr.net*

Вступ. Досягнення Школи сучасного міжгалузевого балансу Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, заснованої В.С. і М.В. Михалевичами представляють інтерес як на національному, так і на міжнародному рівнях. Ці розробки можна інтерпретувати як вдосконалення методології двох головних підходів до інноваційного розвитку, а саме: «зверху вниз» і «знизу вверх». Підхід «зверху-вниз» дає економетричний прогноз характеристик нових технологій на основі кореляцій між обсягами видатків на нові розробки та кількості зайнятих у цьому людських та інших ресурсів з одного боку, і покращенням традиційних та інноваційних, зокрема "зелених", параметрів з іншого боку. Підхід «знизу-вверх» – більш точний і розвинений, і базується на кінцевих результатах конкретних розробок інноваційних технологій, для яких вирішується динамічна задача планування і прогнозування їх практичного запровадження, як збалансованого перехідного процесу заміщення старих технологій новими.

В статті запропоновано постановку задачі, орієнтованної на пропозицію, яка має самостійний економічний інтерес і розв'язується оптимізаційною моделлю, яка охоплює обсяг споживання, динаміку заміщення старих технологій новими тощо.

Мета роботи – розробити оптимізаційну модель пошуку найвищого технологічно-допустимого споживання для забезпечення збалансованого перехідного процесу до нових технологій, що передбачає найвищий можливий добробут та розрахувати оптимальний сценарій, котрий може містити ендегенні коливання зумовлені технологічними змінами.

Результати. Побудовано оптимізаційну модель, яка відображає динаміку технологічно-допустимого споживання під час перехідного періоду. Досліджені властивості моделі та виявлено циклічність перехідного процесу; побудовано оптимальний сценарій переходу.

На прикладі показано як навіть за відсутності проблем з боку попиту, невідворотні рецесії всеодно можуть відбуватися як початкова фаза перехідного процесу.

Висновки. Динаміка економіки, яку рухають радикальні технологічні зміни, представляє собою повний бізнес цикл з фазами початкового тимчасового спаду, відновлення, зростання, перегріву та хвиль Кондратьєва що затухають до стаціонарного стану або стагнації. Запропонований підхід до моделювання має потенціал підвищити точність планування і прогнозування інноваційного і «зеленого» розвитку всіх країн. Для України – підвищити точність і детальність планування відновлення, у тому числі відновлення «краще ніж було» і «зеленого відновлення».

Ключові слова: динамічні моделі витрат-випуску, оптимізація, інновації, тестові розрахунки.

UDC 519.8

Volodymyr Ryaboshlyk *, Olena Volovyk *, Oleksii Lykhovyd

The Mykhaleviches' Ideas Implemented for Rebuilding of Ukraine and Contributing to Sustainable Development in the Global Scope

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv

* Correspondence: ryaboshlyk@ukr.net, elenavolovyk@ukr.net

Introduction. The achievements of the School of Modern Inter-Industrial Balance of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, founded by Vladimir.S. and Michael V. Mikhalevyches, are of interest both at the national and international levels. These developments can be interpreted as improvements in the methodology of two main approaches to innovative development, namely: "top-down" and "bottom-up" approaches. The top-down approach provides an econometric forecast of the characteristics of new technologies based on correlations between the volume of expenditures for new developments and the number of human and other resources employed in this, on the one hand, and the improvement of traditional and innovative, in particular "green", parameters, on the other hand. The bottom-up approach is more accurate and developed, and is based on the final results of specific developments of innovative technologies, for which the dynamic task of planning and forecasting their practical implementation is solved, as a balanced transitional process of replacing old technologies with new ones.

The article proposes a problem statement oriented to the supply, which has an independent economic interest and is solved by an optimization model that covers the volume of consumption, the dynamics of replacing old technologies with new ones, etc.

The **purpose** of the work is to develop an optimization model for finding the highest technologically permissible consumption to ensure a balanced transition process to new technologies, which provides for the highest possible welfare and calculate the optimal scenario, which may contain endogenous fluctuations caused by technological changes.

Results. An optimization model was built that reflects the dynamics of technologically permissible consumption during the transition period. The properties of the model were studied and the cyclical nature of the transition process was revealed; an optimal transition scenario was built. The example shows how even in the absence of problems on the demand side, inevitable recessions can still occur as the initial phase of the transition process.

Conclusions. The dynamics of the economy, driven by radical technological change, is a full business cycle with phases of initial temporary recession, recovery, growth, overheating and Kondratieff waves that decay to a stationary state or stagnation. The proposed modeling approach has the potential to increase the accuracy of planning and forecasting innovative and "green" development of all countries. For Ukraine – to increase the accuracy and detail of recovery planning, including "better than before" and "green recovery".

Keywords: dynamic input-output models, optimization, innovation, test calculations.