

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ ДОВГОСТРОКОВОГО РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВОСТІ

Обґрунтовано актуальність дослідження відповідних математичних методів і моделей довгострокового розвитку національної промисловості. Доведено, що каузальні економетричні моделі виробництва є відносно простим і зручним у використанні та найбільш поширеним інструментарієм дослідження довгострокового економічного майбутнього. Визначено, що виробничі функції, пристосовані до окремих обставин, довели свою спроможність вирішувати поставлені завдання. Проте проблема більш точного налаштування на особливості модельованого об'єкта досліджень є актуальною в нинішніх умовах розвитку України, при концентрації уваги на окремих секторах, зокрема на промисловості, та у зв'язку з революційними трансформаціями виробничих сил і відносин відповідно до поширення кіберфізичних технологій Четвертої промислової революції.

У таких специфічних обставинах доцільно порушувати питання про використання більш складних комплексних моделей. З одного боку, вони є кращими, оскільки дозволяють точніше налаштовуватися на модельований об'єкт, у тому числі за рахунок додавання важливих чинників, які перебувають за межами виробничої системи, а з іншого – гіршими, оскільки ускладнюють аналіз і суттєво збільшують кількість змінних, потрібних для опису динаміки економічного зростання. У зв'язку з цим не можна нехтувати експертними методами дослідження. Вибір типу моделі, кола факторів впливу, можливих сценаріїв розвитку тощо потребує, як правило, експертних оцінок (часто неявних). Тому при аналізі довгих факторів і тенденцій розвитку важливо дотримуватися головного методологічного посилу експертних підходів до побудови форсайтів: для далеких часових горизонтів в умовах суттєвої невизначеності доцільно порушувати питання не про розрахунок «правильного майбутнього», а про оцінку спектру вірогідних сценаріїв розвитку, розширення і переосмислення його нових можливостей і викликів, зокрема для уникнення потенційно згубних ідей і очікувань, закладених у поточну політику.

Ключові слова: Четверта промислова революція, математичні методи і моделі, довгостроковий розвиток, промисловість, фактори виробництва, економічна динаміка, форсайт.

JEL: A10, C10, C49, C50, C60, C67, C68, D24, D57, D58, D60, E10, E17, E19, E20, E22, E23, E60, L52, L60, O10, O11, O12, O14, O20, O47

Промисловість є провідною ланкою економіки, драйвером економічного зростання та одним із ключових елементів національного виробництва. Світові впливові

зарубіжні організації, зокрема McKinsey & Company, PwC, Deloitte та ін., активно здійснюють пошуки методів підтримки промисловості та у своїх звітах регулярно

© С. С. Турлакова, 2022

публікують результати таких досліджень, де математичні методи і моделі розвитку промисловості органічно пов'язані з методами та моделями динаміки ВВП та основних економічних факторів, що її визначають.

Багато з таких методів засновані на довгостроковому прогнозуванні розвитку економіки загалом, які базуються на різних сценаріях використання факторів виробництва: праці (часто з урахуванням її якості), капіталу (результату інвестицій, джерелом яких виступають заощадження) і технологій (науково-технічного прогресу). Зокрема, широкого розповсюдження в таких дослідженнях набула модель Кобба-Дугласа, а також її модифікації (Solow, 1956; Туманова, Шагас, 2004; Ромер, 2014; Ковалев, Господарик, 2014; Brems, 1975; Васильев, 2006; Пикетти, 2014; Асемоглу, 2018; De Long, 1988; Hall, Jones, 1996; Mankiw, Romer, Weil, 1992; Нуреев, 2008; Шараев, 2006; Bergheim, 2005; Denison; Schultz, 1961; Schultz, 1963; Nelson, Phelps, 1966; Cörvers, 1996; Cörvers, 1997; Barro, 1993; Barro, 2010; Buiter, Rahbari, 2011; Felipe, Kumar, Abdon, 2012; Hausman, Hidalgo, 2011; Амоша, Харазішвілі, Ляшенко, 2018; Харазішвілі, 2017, 2018, 2019; Харазішвілі, Ляшенко, 2021).

Загалом такі комплексні методи і моделі не обмежуються аналізом факторів виробництва, що прямо визначають обсяги випуску (галузевого, національного, регіонального, світового), а поширюють дослідження на широке коло економічних процесів і явищ, які також суттєво впливають на довгу економічну динаміку, але є «зовнішніми» для безпосередньо виробничих факторів. До таких можна віднести моделі циклічності економічних процесів і розвитку технологій (Акаев, Хироока, 2009; Vishnevsky, Harkushenko, Kniaziev, 2020), моделі економічної динаміки (моделі обчислювальної рівноваги – Столерю, 1974; Макаров, Бахтизин, Бахтизина, 2005), нелінійні моделі розвитку складних економічних систем з урахуванням зворотних зв'язків (моделі системної динаміки – Forrester, 2007; Mea-

dows, Jorgen, Meadows, 2004), агентні моделі, що враховують особливості поведінки децентралізованих економічних агентів (Niazi, Hussain, 2011; Bonabeau, 2002), еволюційні моделі проявів закономірностей мінливості, спадковості та відбору в економіці (Gual, Norgaard, 2010; Половян, Вишнева, 2017) тощо.

Проте наявність широкого кола математичних методів (інструментів) та моделей (створених за їх допомогою імітацій об'єктів), призначених для наукового передбачення економічного і виробничого майбутнього, що розв'язують різні завдання і в окремих дослідженнях можуть описуватись і групуватись по-різному, не вирішують питання вибору математичного інструментарію довгострокового розвитку промисловості.

Метою статті є типологізація та огляд різних математичних методів і моделей, що можуть використовуватись для передбачення довгострокового розвитку національної промисловості.

Основні типи моделей

Дослідники розглядають можливість використання широкого спектру таких математичних методів (інструментів) і моделей (образів об'єктів). Першим кроком у їх аналізі є систематизація. Наприклад, у роботі Ю. Вертакової (Вертакова, 2016) методи прогнозування, застосовувані для побудови відповідних моделей і оцінки майбутньої динаміки ВВП, пропонується поділяти за характером залученої інформації на фактографічні (статистичні), експертні (інтуїтивні) і комбіновані. Така класифікація є зрозумілою, але дещо спрощеною, оскільки, наприклад, статистична інформація може використовуватись як для простої екстраполяції окремих факторів аналізованих систем, що має обмежене застосування, так і для побудови більш складних каузальних моделей, які представлені множиною понять предметної сфери і зв'язків між ними та вирішують багато різних завдань. Побудова коректної класифікації, а точніше типологізації (виокремлення типових під-

множин), постійно зростаючої множини математичних інструментів тільки за однією ознакою (характером залученої інформації) є проблематичною.

Більш коректним можна вважати підхід, що спирається на ідеї, викладені у відомих роботах (Chambers, Mullick, Smith, 1971; Armstrong, 2001), які поділяють наукові методи дослідження економічного майбутнього на (а) якісні (експертні) та (б) кількісні. Перші засновані на так званих «м'яких» даних (soft data), що включають експертні думки, припущення, тлумачення тощо, тому їх не можна прямо виміряти і верифікувати. Другі – здебільшого на «твердих» даних (hard data), тобто таких, які можна виміряти і незалежно перевірити (верифікувати).

У свою чергу, кількісні методи можна поділити на (b₁) статистичні (екстраполяційні) і (b₂) каузальні. Перші прогнозують виробництво залежно від неекономічних змінних (часу і простору), другі – як наслідок дії економічних (виробничих) факторів – землі (ресурсів), праці, капіталу та ін. При цьому екстраполяційні методи та засновані на них моделі є відносно простими і менш витратними, але вони краще пристосовані для близьких часових горизонтів, а далекі часові горизонти потребують побудови більш складних каузальних моделей.

Каузальні методи можна поділити на (b₂₁) каузальні економетричні та (b₂₂) каузальні комплексні. Методи (b₂₁) використовують статистичні техніки аналізу економічних даних для надання емпіричного змісту (параметризації) постульованим виробничим факторам. А методи (b₂₂), крім статистичного аналізу економічних даних з метою параметризації факторів, вводять також додаткові причинно-наслідкові зв'язки, що визначають закономірності розвитку самих виробничих факторів чи економічної системи загалом.

Практичне застосування того чи іншого методу прогнозування промисловості

та економіки в цілому визначається цілями дослідження, наявністю необхідної інформації та довжиною періоду випередження (Ковалев, Господарик, 2014).

Оскільки в цій статті йдеться про довгостроковий економічний розвиток, доцільно сконцентрувати увагу на каузальному інструментарії. Для цього спочатку проаналізовано каузальні економетричні підходи, а потім – каузальні комплексні. Завершують розгляд якісні (експертні) та комбіновані підходи.

Каузальні економетричні методи та моделі

Зазвичай моделі довгострокового прогнозування зростання економік країн світу засновані на різних сценаріях використання факторів виробництва: праці (часто з урахуванням її якості), капіталу (результату інвестицій, джерелом яких виступають заощадження) і технологій (науково-технічного прогресу). Звичайна модель економічного зростання валового внутрішнього продукту (GDP) країни – це деяка функція Y , що залежить від вказаних факторів і змінюється в часі t :

$$GDP(t) = Y((L(t), K(t), A(t))), \quad (1)$$

де $L(t)$ – трудові ресурси країни, які часто застосовуються з урахуванням якості (наприклад, середньої тривалості навчання)¹;

$K(t)$ – нагромаджений у країні капітал (основні фонди);

$A(t)$ – сукупна продуктивність факторів – *Total Factor Productivity (TFP)*, що відображає вплив науково-технічного прогресу на продуктивність праці.

Земля (природні ресурси) зазвичай вважається доступною за умовчанням. Але деякі дослідники до моделі економічного зростання країн окремо додають енергетичний фактор, оскільки в сучасних умовах за високих цін на енергоносії енергоємність економіки набуває особливого значення (Ковалев, Господарик, 2014). При цьому як

¹ Іноді якість людського капіталу $H(t)$ ураховують як окремий чинник.

функцію зростання $Y(\dots)$ часто використовують одну з відомих виробничих функцій. Найчастіше застосовують моделі на основі класичної виробничої функції Коба-Дугласа:

$$Y(t) = A(t)K^\alpha(t)L^{1-\alpha}(t), \quad (2)$$

де $Y(t)$ – випуск продукції (ВВП, ВДВ);

α – еластичність основного капіталу $K(t)$, що використовується у процесі виробництва;

$1 - \alpha$ (або β) – еластичність праці $L(t)$;

$A(t)$ – сукупна продуктивність чинників (технологічний прогрес), тобто структурні параметри виробничої функції, або параметри науково-технічного прогресу.

Функція Коба-Дугласа набула поширення серед фахівців для прогнозування зростання економік країн світу в різних модифікаціях. Так, наприклад, у роботах Ю. Харазішвілі (Харазішвілі, 2017, 2018, 2019; Харазішвілі, Ляшенко, 2021) вирішується завдання визначення впливу науково-технологічного прогресу на результуючі показники економічного зростання. При цьому основним засобом оцінювання ролі та інноваційного внеску в економічне зростання є модель функції сукупної пропозиції на базі виробничої функції.

Завдання кількісної оцінки впливу факторів інноваційної діяльності на динаміку економічного розвитку та ендогенне визначення його внеску в економічне зростання країни в зарубіжних роботах зазвичай отожднюється з виявленням впливу НТП у різних модифікаціях функції Коба-Дугласа (Харазішвілі, 2018). В Україні для оцінювання впливу інноваційної діяльності на економічний розвиток запропоновано використовувати метод мультиплікатора. Зокрема, в роботі (Харазішвілі, Ляшенко, 2021) розроблено підхід, заснований на виробничій функції зі стійкістю віддачі від масштабу виробництва у формі, запропонованій Я. Тінбергеном, із нейтральним технічним прогресом за Дж. Хіксом, спадною граничною продуктивністю макрофакторів та обмеженістю їх взаємозамінності. Такий

підхід, на думку авторів, забезпечує причинно-наслідковий функціональний (а не статистичний) зв'язок між вхідними та вихідними змінними, не потребує побудови довгих рядів даних, характеризується динамічними коефіцієнтами еластичності, коефіцієнтом завантаження капіталу та можливістю врахування інноваційного фактора в кожному окремому періоді.

З точки зору прийняття рішень при стратегічному плануванні на різних рівнях управління вибір функції Коба-Дугласа, як математичного інструменту передбачення основних тенденцій економічного розвитку із запропонованими різними авторами вдосконаленням, є цілком логічним і обґрунтованим, у тому числі тому, що вона дозволяє використовувати модельні розрахунки для вибору важелів впливу на динаміку виробництва. Більше того, ця функція неодноразово підтвердила свою надійність при довгостроковому прогнозуванні зростання економік країн світу та окремих галузей залежно від різних сценаріїв використання праці, інвестицій, технологій і різноманітних інших факторів, які часто додаються у процесі її модифікацій.

В іншій відомій моделі, запропонованій Р. Солоу (Solow, 1956), виробнича функція базується на неокласичних передумових (Туманова, Шагас, 2004), згідно з якими технологічний прогрес збільшує продуктивність праці:

$$Y(t) = Y(K(t), L(t)A(t)), \quad (3)$$

$$A(t) = A(0)e^{gt}, \quad g = \text{const.}$$

У цій виробничій функції використовуються звичайні фактори (праця L і капітал K) і вона має постійну віддачу від масштабу $Y(\alpha K, \alpha LA) = \alpha Y(K, LA)$. При цьому гранична продуктивність факторів є позитивною та спадною, а виробнича функція задовольняє таким умовам: якщо запас одного з факторів нескінченно малий, то його гранична продуктивність нескінченно велика, якщо запас одного з факторів нескінченно великий, то його гранична продуктивність нескінченно мала. Крім того, для

виробництва потрібен кожен фактор:
 $Y(K, 0) = Y(0, LA) = 0$.

Кількість населення $L(t)$, представлена в моделі сукупними трудовими ресурсами, зростає постійним темпом $n = \text{const} : L(t) = L(0)e^{nt}$. Для пошуку розв'язку моделі використовуються питомі показники на одиницю ефективної праці (Туманова, Шагас, 2004): випуск $y = Y / LA$; запас капіталу на одиницю ефективної праці $k = K / LA$; споживання на одиницю ефективної праці $c = C / LA$; інвестиції на одиницю ефективної праці $i = I / LA$. Тоді виробничу функцію можна представити як $y = Y / LA = Y(K / LA, 1)$.

Найчастіше як конкретний приклад виробничої функції, що задовольняє передумови моделі, використовується вищезгадана функція Коба-Дугласа (Туманова, Шагас, 2004; Ромер, 2014). У цьому разі модель Солоу має такий вигляд:

$$Y(t) = K^\alpha(t)(A(t)L(t))^{1-\alpha}. \quad (4)$$

Розрахунок впливу на економічне зростання сукупної продуктивності факторів (*TFP*) є найбільш складним завданням. Класична модель Солоу для темпів зростання *TFP* (залишок Солоу) описується рівнянням

$$\text{Growth}A(t) = \text{Growth}GDP(t) - (\alpha \text{Growth}K(t) + (1 - \alpha) \text{Growth}L(t)). \quad (5)$$

Модель впливає з припущення про те, що наявність знань обумовлює ту частину зростання ВВП, яка не пояснюється такими факторами, як праця та капітал. Це так званий залишок Солоу, який, за оцінками окремих фахівців, становить до половини всього зростання. Для США та інших розвинутих країн у прогнозах темп зростання сукупної продуктивності факторів часто дорівнює 1,3%, що спричиняє зростання продуктивності праці приблизно на 2% на рік (Ковалев, Господарик, 2014). Для країн, що розвиваються, $A(t)$ визначають залежно від швидкості конвергенції, тобто освоєння чужих інновацій у межах інвестиційного процесу та трансферу у виробництво власних.

Модель Солоу заклала необхідну тематичну базу для аналізу темпів зміни капіталу й економічного ефекту економічного прогресу, спираючись на яку дослідники створили безліч більш складних модифікацій. Тому цю модель вважають відправною точкою для багатьох сучасних досліджень економічного зростання (Туманова, Шагас, 2004; Ромер, 2014).

До недоліків моделі Солоу належить те, що вона не пояснює, як рішення домогосподарств впливають на норму заощадження і в цілому на темпи економічного зростання (Brems, 1975; Васильев, 2006; Пикетти, 2014). Параметри норми заощаджень і темпів науково-технічного прогресу задаються екзогенно, рішення економічних агентів на них ніяк не впливають, що суттєво обмежує її практичне застосування. Крім того, процес нагромадження капіталу, який прийнято вважати сильною стороною моделі, по суті є «чорною скринькою», механізм впливу на який з боку економічних агентів у моделі не розкрито (Асемоглу, 2018).

Також до обмежень моделі відносять те, що вона базується на припущеннях, далеких від дійсних умов, і тільки при їх виконанні висновки з відповідних модельних розрахунків можуть обґрунтовано застосовуватися до аналізу реальних економічних процесів. Наприклад, модель Солоу передбачає безперервну рівновагу та повну зайнятість усіх ресурсів, що на практиці зазвичай не спостерігається. До того ж вона суперечить кейнсіанському підходу через припущення про те, що інвестиції визначають обсяг заощаджень, а не навпаки.

Використання моделі на практиці свідчить, що результати розрахунків не завжди достатньою мірою відповідають емпіричним даним. Наприклад, одним із передбачень моделі є те, що економіки бідних країн мають зростати швидше, ніж економіки багатих за умов схожості структурних параметрів. Але дослідження Дж. Де Лонга (De Long, 1988), П. Ромера (Romer, 1989), Р. Холла та Ч. Джонса (Hall, Jones, 1996) дово-

дять, що на практиці зазвичай відбувається інакше. Є лише поодинокі приклади (японське економічне диво, корейське економічне диво), коли спочатку бідні країни змогли наздогнати багаті за рівнем ВВП на душу населення, але здебільшого зближення рівнів розвитку не відбувається (Асегоглу, 2018).

Ще одна суттєва невідповідність фактичним даним виявилася при спробах порівняння ставки відсотка в різних країнах (Туманова, Шагас, 2004). Факт суттєвого відхилення їх реальних значень від теоретичних спричинив розвиток більш складних моделей, припущення яких щодо відсоткової ставки є більш реалістичними.

У зв'язку з цим деякі дослідники пішли шляхом розширення поняття «капітал» за рахунок включення до нього людського капіталу. Результатом застосування такого підходу стала поява моделі Менк'ю-Ромера-Вейла (Mankiw-Romer-Weil model) (Туманова, Шагас, 2004):

$$Y(t) = K^{\alpha}(t)H^{\beta}(t)(A(t)L(t))^{1-\alpha-\beta}. \quad (6)$$

У даному випадку людський капітал представлений параметром $H^{\beta}(t)$, а пошук рішень моделі розширюється використанням питомого показника запасу людського капіталу на одиницю ефективної праці $h = H / LA$. При цьому параметр α – це еластичність випуску за фізичним капіталом, β – еластичність випуску за людським капіталом, $1 - \alpha - \beta$ – еластичність випуску за працею.

Отже, модель Менк'ю-Ромера-Вейла – це розширена модель Солоу з включенням людського капіталу. Вона краще відповідає фактичним міждержавним відмінностям, ніж класична модель Солоу, завдяки включенню людського капіталу до факторів виробництва, а також тому, що в розвинутих країнах його рівень на душу населення є істотно вищим (Ромер, 2014; Асегоглу, 2018; Mankiw, Romer, Weil, 1992; Нуреев, 2008; Шараєв, 2006).

Незважаючи на те що модель (6) є важливим кроком уперед порівняно з

моделлю Солоу, оскільки краще описує міжкраїнні відмінності, їй також притаманні родові недоліки підходу Солоу. Зокрема, використання моделі не дає відповіді на запитання: чому саме бідні країни є бідними – тому, що їм не вистачає фізичного чи людського капіталу, або тому, що в них використовуються неефективні технології? (Асегоглу, 2018). Крім того, аналогічно моделі Солоу науково-технічний прогрес і норми заощаджень у моделі Менк'ю-Ромера-Вейла задаються екзогенно.

Намагаючись усунути ці недоліки, інші дослідники пропонують підходи, при яких спочатку норма заощаджень, а потім і темпи економічного зростання є наслідком рішень економічних агентів, а не задавалися б екзогенно (Туманова, Шагас, 2004). Це, зокрема, більш складні, але менш наочні моделі FORMEL-G (Bergheim, 2005), Денісона (E. Denison) (Ковалев, Господарик, 2014), Шульца (T. Schultz) (Schultz, 1961; Schultz, 1963), Нельсона-Фелпса (R. Nelson, E. Phelps) (Nelson, Phelps, 1966), Керверса (F. Cörvers) (Cörvers, 1996; Cörvers, 1997; Cörvers, 1997) та ін.

Як зазначено вище, у сучасних прогнозах за моделями Коба-Дугласа чи Солоу праця часто коригується з урахуванням її якості $h(t)$ (Ковалев, Господарик, 2014, с. 3):

$$L(t) = h(t)N(t), \quad (7)$$

де $h(t) = e^{\psi(s)}$ – показник якості освіти.

Кусочно-лінійна функція $\psi(s)$ є маржинальною віддачею від відповідного рівня освіти, параметр s – середня тривалість навчання (середня плюс вища освіта), які часто беруть із робіт Р. Барро та Д. Лі (Barro, 1993; Barro, 2010).

Вплив освіти на економічне зростання є багатограним. Зокрема, вона розвиває у працівників здатність до сприйняття та використання на практиці нових наукових ідей і технологій, що сприяє більш ефективному перерозподілу наявних ресурсів («алокаційний» ефект). Висококваліфікована робоча сила швидше адаптується до мінливих умов виробництва і технологій.

Також освіта підвищує швидкість, з якою поширюються та відбуваються відкриття.

Для оцінювання ступеня впливу освіти на НТП та через нього – на економічне зростання потенціал НТП зазвичай вимірюють величиною трудових ресурсів, зайнятих у цьому секторі. Вважається, що приріст людського капіталу забезпечує приріст сектору НТП та інтенсифікацію потоку нових знань і технологічних ідей. Оскільки на демографічну ситуацію на відрізках часу в 10-20 років вплинути практично неможливо, зростання ВВП буде тим більшим, чим вище частка зайнятих у прогнозованій частині економічно активного населення країни і чим довше вони навчатимуться. Тому часто для спрощення розрахунків передбачається експоненційне зростання праці (Bergheim, 2005).

Загалом необхідність розширення переліку факторів, що враховуються при моделюванні економічного розвитку країн, є зрозумілою, проте труднощі, крім фундаментальної проблеми пошуку компромісу між точністю і простотою, зазвичай полягають у пошуку надійного способу оцінки впливу якості освіти на динаміку ВВП. Це ускладнює отримання достовірних результатів розрахунків, що обмежує можливості практичного застосування відповідних моделей.

Іншу відому економетричну модель зростання, яка враховує якість людського капіталу, у 1997 р. запропонував Р. Барро (Barro, 2010):

$$\begin{aligned} \text{GrowthGDP}_{p.c.}(t, t + \Delta t) = \\ = Y(\text{GDP}_{p.c.}(t), h(t), \dots), \end{aligned} \quad (8)$$

де $\text{GrowthGDP}_{p.c.}(t, t + \Delta t)$ – середньорічне зростання ВВП на душу населення в період з року t до року $t + \Delta t$ (зазвичай, $\Delta t = 1, 5$ або 10 років);

$\text{GDP}_{p.c.}(t)$ – стартовий ВВП на душу населення;

$h(t)$ – стартовий рівень якості людського капіталу, що вимірюється тривалістю навчання та очікуваною тривалістю життя.

Інші, неперелічені незалежні (пояснюючі) змінні характеризують поведінку економічних суб'єктів. Це норма заощад-

жень та інвестицій, умови ведення господарської діяльності, якість урядової політики: податки, верховенство права, економічні свободи тощо (Ковалев, Господарик, 2014).

Зазвичай історичні ряди даних для екзогенних незалежних змінних логарифмуються, що дозволяє знизити піки розподілу випадкових величин і згладити проблему можливої неоднорідності спостережень. У цьому випадку коефіцієнти рівняння стають безрозмірними величинами – еластичностями, зміст яких полягає у визначенні відсоткової зміни ендегенної (залежної) змінної у відповідь на одновідсоткове збільшення значення екзогенної змінної при незмінності інших факторів. Результати застосування моделі Барро для прогнозування середньорічного зростання світового ВВП на душу населення показали її високу точність (Ковалев, Господарик, 2014, с. 10-12).

У 2011 р. з'явилася модифікована версія моделі Барро від банку НБС, у якій на історичних даних по 40 країнах були уточнені коефіцієнти, що використовуються в моделі. Модифікації стосуються коефіцієнтів регресії, а також усунення з моделі змінних, що стосуються умов торгівлі. Тестування моделі для 40 країн показало її досить високу точність, незважаючи на фінансову кризу 2009 р. Також на основі моделі було розраховано середньорічне зростання ВВП на душу населення за моделлю Барро у версії банку НБС за трьома сценаріями економічної політики на 2010-2050 рр. (Ковалев, Господарик, 2014, с. 12-13).

Недоліками моделі є використання усереднених факторів, які не завжди об'єктивно відображають реальний стан справ економіки аналізованих країн. До таких факторів, зокрема, належать тривалість навчання, яка може бути різною для різних верств населення і виражатися досить приблизними загальними цифрами, і очікувана тривалість життя, визначення якої через вплив складно передбачуваних обставин (як, наприклад, пандемія COVID-19), може давати дуже приблизні оцінки. Крім того, у рамках моделі фактори промислового розвитку не розглядаються в явному вигляді,

що потребує відповідної адаптації при використанні цього підходу для визначення довгострокових трендів у сфері індустрії.

Згідно з моделлю Citibank (Buiter, Rahbari, 2011) до факторів економічного зростання, крім двох основних (зростання кількості економічно активного населення з урахуванням його якості, та норми заощаджень, яка визначає інвестиції), належать ще два додаткових: стартова торговельна відкритість (частка експорту та імпорту у ВВП) та якість інститутів й економічної політики (виміряні Світовим банком за рейтинговими індексами: якість державного управління – Regulatory Government Quality, верховенство права – Law Index, умови для бізнесу – Doing Business). На основі модельних розрахунків експерти Citibank очікували на середньорічне зростання світового ВВП (за ПКС у доларах 2010 р.) за 2010-2030 рр. на рівні 4,65% з уповільненням у 2030-2050 рр. до 3,8%. У подальших прогнозах як драйвери зростання Citibank обіцяє враховувати також культурні традиції, міграцію, природні ресурси, якісну структуру виробництва тощо, а якість навчання вимірювати не лише терміном навчання, але і показником знань школярів за індексом PISA.

Загалом перелік факторів у моделі свідчить про досить повне охоплення можливих причин економічного зростання країн, проте вона, аналогічно до попередньої, є дуже складною, що обмежує можливості економічної інтерпретації виконаних розрахунків.

Оригінальний підхід до довгострокового прогнозування середньорічного зростання, заснований на його залежності від вихідного рівня складності економіки країни, запропоновано Р. Хаусманом та Ц. Хідальго (Felipe, Kumar, Abdon, 2012; Hausman, Hidalgo, 2011). При цьому індекс складності економіки (ECI) країни i (сума впроваджених у товари знань) обчислюється залежно від диверсифікованості й унікальності вироблених у країні товарів, а також з урахуванням порівняльних переваг цих товарів. Ученими на часовому відрізку 1964-2008 рр. було встановлено тісний зв'язок

між індексом складності економіки та ВВП на душу населення, принаймні для країн з обмеженим (менше 10% від загальної суми) експортом природних ресурсів. Для таких країн індекс складності економіки пояснює 75% зростання ВВП на душу населення (Hausman, Hidalgo, 2011). Основна та найпростіша економетрична модель Хаусмана-Хідальго має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \text{GrowthGDP}_{p.c.}(t, t + \Delta t) = & 0,0443ECI - \\ & -0,0037ECI \ln \text{GDP}_{p.c.}(t) - \\ & -0,00638 \ln \text{GDP}_{p.c.}(t) + \\ & +0,0368 \text{WrowthExpResource}(t). \end{aligned} \quad (9)$$

У цій моделі складність становлять розрахунки відповідних індексів. Звідси виникає питання до заснованих на них прогнозах економічного розвитку країн через складність перевірки на адекватність як вихідних, так і прогнозних даних. До того ж індекси мають досить узагальнений вигляд і не виокремлюють галузеві особливості виробництва, хоча у факторах заявлено про диверсифікацію товарів за деякими ознаками. Окрім того, сучасні тенденції економічного розвитку безперечно відрізняються від залежностей попередніх років, так що в цьому сенсі модель потребує актуалізації та перегляду задіяних чинників.

Синтез моделі Барро та моделі Хаусмана-Хідальго здійснив Азіатський банк розвитку. На основі панельних даних для 69 країн за 1962-2007 рр. (у цьому випадку використано дані для стартових змінних за 1962 р.) було одержано модель, яка враховує галузеві особливості виробництва в результатуючому показнику (Felipe, Kumar, Abdon, 2012).

Але при цьому відкритим залишилося питання кількісної оцінки потенційних можливостей майбутніх структурних змін. У зв'язку з цим для подальшого застосування розглянутої моделі необхідним є уточнення її коефіцієнтів з урахуванням актуальної статистики відповідних показників, а також уточнення переліку факторів, що використовуються, з урахуванням сучасних тен-

денцій економічного розвитку (пандемія COVID-19, цифровізація економіки тощо).

Економетричні моделі, побудовані на історичних даних різних періодів і різних теоріях щодо зміни факторів зростання (відмінності стосуються переважно побудови функцій зміни технологічного прогресу та якості людського капіталу), і навіть ефективності його використання («правильної» економічної політики), можна агрегувати в гібридні. Гібридні виробничі моделі побудовані на синтезі інших моделей на основі виробничих функцій (Felipe, Kumar, Abdon, 2012). Наприклад, береться середньозважена моделей (1), (2), (4), (6) або їх спрощених варіантів. Ідея цього підходу є аналогічною відомій схемі кібернетика Шеннона щодо синтезу «надійних схем із ненадійних елементів». Тобто гібридні моделі – це своєрідні усереднення (агрегації) не самих прогнозів, а їх моделей, тому прогнози за гібридними моделями зазвичай не збігаються із середньоарифметичними консенсус-прогнозами. Істотним недоліком такого підходу є дуже приблизні значення всіх факторів і прогнозів загалом. Крім того, виникає проблема забезпечення сумісності розрахунків (наприклад, відносно долара зразка 2003, 2009, 2011 рр. тощо).

Проте сучасні дослідники продовжують розвивати гібридний інструментарій для прогнозування зростання ВВП відповідно до прогнозних значень чинників, наведених у формулах (1), (2), (4), (6).

Наприклад, у роботі (Ковалев, Господарик, 2014, с. 18-20) запропоновано гібридну багатофакторну модель, що містить фактори зростання різних відомих моделей, але з арифметично усередненими коефіцієнтами, тобто ослабленим впливом окремих факторів. Пропонований підхід до довгострокового прогнозування економічного зростання інтегрує низку моделей попередників і застосовується авторами для оцінювання зростання країн ЄАЕС на часових відрізках 2013-2030-2050 рр. Автори здійснили сценарні припущення щодо майбутніх темпів зростання праці та її якості, капіталу, технологічного прогресу та ін. Виконані

ними розрахунки показали, як може зростати економіка країн ЄАЕС та світових лідерів у довгостроковій перспективі до 2050 р., виходячи з демографічного прогнозу та припущень про зростання тривалості навчання, а також прогнозів про норму інвестицій (фактично це прогноз того, яку частину ВВП країна споживає, а яку заощаджує) та про швидкість наздоганяючої модернізації (як швидко країна скорочує технологічне відставання від США).

Слід відзначити, що в гібридну модель (Ковалев, Господарик, 2014, с. 18-20) закладено усереднений варіант економічної політики, найважливіший із параметрів якої – норма інвестицій – не може бути нижчою за 25-30% ВВП, а міжнародні рейтингові індекси (тривалість навчання, умови бізнесу, верховенство права) дотримуються заявленої вихідної динаміки. Інші варіанти сценаріїв авторами не розглянуто, що обмежує можливість застосування моделі. Крім того, відкритим залишається принципове питання про те, чи можна отримати достовірні прогнозні значення результатуючих показників на основі синтезу усереднених неточних сценаріїв і прогнозів.

Каузальні комплексні методи та моделі

Як відзначено вище, каузальні комплексні методи і моделі не обмежуються аналізом факторів виробництва, що прямо визначають обсяги випуску (галузевого, національного, регіонального, світового), а поширюють дослідження на широке коло економічних процесів і явищ, які також суттєво впливають на довгу економічну динаміку, але є «зовнішніми» для безпосередньо виробничих факторів. Це, наприклад, циклічність економічних процесів і розвитку технологій, різної довжини «хвилі» в економіці (Акаев, Хироока, 2009; Vishnevsky, Harkushenko, Kniaziev, 2020), феномен економічної рівноваги у зв'язку з економічною динамікою (моделі обчислювальної рівноваги (Столерю, 1974; Макаров, Бахтизин, Бахтизина, 2005)), нелінійний характер розвитку складних економічних систем з урахуванням зворотних зв'язків (моделі системної

динаміки (Forrester, 2007; Meadows, Jorgen, Meadows, 2004)), особливості поведінки децентралізованих економічних агентів (агентні моделі (Niazi, Hussain, 2011; Bonabeau, 2002)), прояви закономірностей мінливості, спадковості та відбору в економіці (еволюційні моделі (Gual, Norgaard, 2010; Половян, Вишневская, 2017)) тощо.

Такі моделі часто називають імітаційними, оскільки вони намагаються за допомогою математичного інструментарію найбільш точно описати (імітувати) функціонування і розвиток реальних систем. У цьому полягає їх сила й одночасно слабкість, оскільки, з одного боку, вони явно виграють у точності налаштування на модельований об'єкт, а з іншого – втрачають властивість універсальності. Таких моделей можна побудувати нескінченну кількість, оскільки нескінченною є кількість реальних об'єктів. Проте зазвичай «ядро» цих комплексних моделей складають різного роду виробничі функції, про які йшлося раніше.

Одним із прикладів комплексного підходу може служити модель Хірооки-Акаєва (Акаєв, Хіроока, 2009), призначена для довгострокового прогнозування з урахуван-

ням циклічності інноваційно-технологічного розвитку сучасної економіки, зокрема циклів Кондратьєва.

Суть запропонованого підходу полягає у припущенні, що базові інновації майбутнього першого кондратьєвського циклу є відомими. Тоді сумарна додана вартість від інноваційних продуктів у поточному циклі Кондратьєва розраховується з урахуванням того, що траєкторія дифузії інноваційних продуктів описується логістичною кривою та починається тільки після того, як траєкторію розвитку технології завершено. Під базовими інноваційними продуктами автори розуміють такі інновації, як мультимедіа, нанотехнології, біотехнології, надпровідники, квантові комп'ютери тощо.

При цьому, припускаючи, що базисні інновації майбутнього i -го циклу Кондратьєва є відомими (див. таблицю) (Акаєв, Хіроока, 2009, с. 730), сумарну додану вартість від інноваційних продуктів у поточному циклі Кондратьєва запропоновано розраховувати як

$$\Delta Y_i = \sum_{j=1}^n \frac{Y_{ij}}{1 + c_{ij} \exp[-a_{ij} Y_{ij} (t - t_{ij})]} \quad (10)$$

Таблиця – Припущення про базисні інновації i -го циклу Кондратьєва

i, j	Базисні інновації майбутнього i -го циклу Кондратьєва	Рік завершення відповідної (j -ї) базисної технології	Очікуваний обсяг ринку
1	Мультимедіа	t_{i1}	Y_{i1}
2	Нанотехнології	t_{i2}	Y_{i2}
3	Біотехнології	t_{i3}	Y_{i3}
4	Надпровідники	t_{i4}	Y_{i4}
...	...		
N	Квантові комп'ютери	t_{in}	Y_{in}

При цьому кожна інновація створює обсяг ринку відповідного k -го інноваційного продукту у $(i-1)$ -му циклі Кондратьєва $\bar{Y}_{i-1,k}$.

У роботі (Акаєв, Хіроока, 2009) розглядається модель, яка враховує умови тривалості життєвого циклу інновацій 25-30 років і життєвий цикл інфратраєкторій, що

дорівнює тривалості відповідного циклу Кондратьєва (40-50 років). Окрім того, у запропонованій моделі автори виходять із того, що ринок магістральних нововведень значно розширюється в наступному циклі Кондратьєва та виключає повторний розрахунок доданої вартості цих нововведень у новому циклі Кондратьєва.

$$\Delta \bar{Y}_i = \sum_{k=1}^m \frac{\bar{Y}_{i-1,k}}{1 + \bar{c}_{i-1,k} \exp[-\bar{a}_{i-1,k} \bar{Y}_{i-1,k} (t - t_{i-1}^*)]} + \sum_{l=1}^s \frac{\tilde{Y}_{i,l}}{1 + \tilde{c}_{i,l} \exp[-\tilde{a}_{i,l} \tilde{Y}_{i,l} (t - t_i^*)]} - \sum_{k=1}^m \bar{Y}_{i-1,k} I(t - t_i^* - \Delta t_{i-1,k}), \quad (11)$$

де $\tilde{Y}_{i,l}$ – очікувана ємність ринку, яка формується l -ю траєкторією, що впливає з i -го циклу Кондратьєва;

$\bar{Y}_{i-1,k}$ – очікувана ємність ринку, яка формується k -ю інфратраєкторією, що впливає з $(i-1)$ -го циклу Кондратьєва;

$t_i^* (t_{i-1}^*)$ – рік початку підйому $i(i-1)$ -го циклу Кондратьєва;

$I(t - t_i^* - \Delta t_{i-1,k})$ – одинична функція.

Таким чином, поточне значення ВВП визначається залежно від початкового значення ВВП на рік початку прогнозування, яке збігається з початком підйому першого циклу Кондратьєва та темпу збалансованого зростання традиційних галузей економіки. Поточне значення ВВП у такому разі в (Акаєв, Хироока, 2009, с. 731) запропоновано визначати як

$$Y_i^* = Y_0^* e^{qt} + \Delta Y_i + \Delta \bar{Y}_i, \quad (12)$$

де Y_0^* – початкове значення ВВП на рік початку прогнозування, що збігається з початком підйому i -го циклу Кондратьєва;

q – темп збалансованого зростання традиційних галузей економіки.

Перший доданок у формулі (12) означає, що традиційні (вже існуючі) галузі економіки розвиваються за моделлю збалансованого зростання, що передбачає постійний темп зростання q , який автори пропонують визначати за такою формулою (по суті це варіант виробничої функції) (Столерю, 1974):

$$q = n + \frac{g}{\alpha}, \quad (13)$$

де n – темп зростання активного населення;

α – частка оплати праці у національному доході,

g – темпи зростання технічного прогресу у традиційних галузях економіки.

Модель показує, що традиційні (існуючі) галузі економіки розвиваються за патерном збалансованого зростання. Це передбачає постійний темп збільшення кількості активного населення, ураховує частку опла-

ти праці в національному доході та темп зростання технічного прогресу. Традиційні галузі також поглинають інновації через механізм злиття технологій (Hirooka, 2006), збільшуючи цим генеровану додану вартість. Темп технічного прогресу у традиційних галузях головним чином визначається характеристиками злиття технологій.

Розглянутий підхід призначений для прогнозування економічного розвитку на стадії підвищення кондратьєвського циклу з урахуванням того, що розгляд починається з початку підйому циклу. Якщо ж потрібен прогноз на понижувальній стадії, починаючи з піку, тоді необхідно відштовхуватися від початкового значення ВВП на піку циклу Кондратьєва:

$$Y_i^* = \bar{Y}_0^* e^{qt} + \sum_{k=1}^m \frac{\tilde{Y}_{i,l}}{1 + \tilde{c}_{i,l} \exp[-\tilde{a}_{i,l} \tilde{Y}_{i,l} (t - t_i^*)]}. \quad (14)$$

Таким чином, формули (10-12) і (14) є відносно компактною математичною макромоделлю для довгострокового прогнозування динаміки економічного розвитку. Перевагою цієї моделі є врахування циклічності економічних процесів і відображення їх особливостей відповідним результуючим показником, а недоліком – труднощі з розрахунками параметрів економічних циклів і забезпеченням достовірності визначення точки нинішнього стану розвитку об'єкта дослідження.

Ідея життєвого циклу технологій знайшла застосування у моделі (Vishnevsky, Harkushenko, Kniaziev, 2020), яка призначена для вимірювання технологічних розривів між окремими країнами. Автори обгрун-

тують, що кожна з національних економік інвестує у свій комплекс домінуючих технологій. При цьому більшим витратам у вигляді вкладень у фізичний і цифровий капітали (x) відповідають більші результати у вигляді продуктивності праці (y). Але ця залежність є не лінійною, а S-подібною, яка описується формулою логістичної кривої

$$y = \frac{A}{1 + 10^{a - (1 + \mu)x}} + C, \quad (15)$$

де A – параметр, що визначає нижню межу логістичної кривої;

C – параметр, що визначає різницю між верхньою та нижньою межами логістичної кривої;

a – параметр, що визначає вплив науково-технічного прогресу (залежність між видатками на НДДКР і продуктивністю праці);

μ – параметр, що характеризує співвідношення фізичного і цифрового капіталу.

Очевидно, що для кожної країни параметри функції (15) є різними, тобто кожна з них перебуває на своїй логістичній кривій, відстань між якими визначає величина технологічних розривів.

У роботі (Vishnevsky, Harkushenko, Kniaziev, 2020) параметризацію функції (15) виконано за допомогою інструментарію MS Excel з використанням статистичних даних по трьох економіках – Німеччині, Чехії та Україні. Результати моделювання свідчать, що навіть за умови досягнення тієї ж фондоозброєності в Україні, як у Чехії та Німеччині, вона не зможе їх наздогнати за показником продуктивності праці, якщо тенденції розвитку, притаманні останнім десятиріччям, буде продовжено. Іншими словами, оскільки в Україні домінують застарілі технології, то навіть масове впровадження інновацій, у тому числі заснованих на придбаних технологіях, не зможе вирішити проблеми радикального підвищення конкурентоспроможності національної економіки і переходу її зі стану «сировинного придатку» розвинутих країн, до стану «нового індустріального тигру»

(Vishnevsky, Harkushenko, Kniaziev, 2020, с. 13).

Перевагою аналізованої моделі є її простота та зручність у використанні, а недоліком – те, що розроблений підхід до визначення перспектив розвитку не передбачає можливості переходу з однієї технологічної кривої на іншу, а отже, не дає можливості визначити, що саме потрібно зробити в Україні для того, щоб зламати негативні тенденції та перейти на новий техніко-технологічний рівень виробництва.

На даних України побудовано також дослідження (Бабич, 2017), у якому запропоновано вдосконалений варіант раніше розробленої імітаційної моделі прогнозування науково-технологічного розвитку країни на 2008-2012 рр.¹ (Kononenko, Babych, 2011; Kononenko, Repin, 2006).

Автори пропонують перегрупувати і розширити кількості модельованих видів економічної діяльності відповідно до Національного класифікатора КВЕД-2012 та врахувати взаємодію видів економічної діяльності з використанням міжгалузевого балансу В. Леонтьєва (методу «витрати-випуск») (Леонтьєв, 1997). Також ними розроблено алгоритм моделювання міжгалузевих взаємодій, що дозволяє прогнозувати обсяг виробленої продукції кожним із видів економічної діяльності та необхідний обсяг імпорту для виробничих потреб.

Зокрема, імітаційна модель науково-технічного розвитку (Kononenko, Babych, 2011) дозволяє моделювати 11 видів економічної діяльності України, об'єднані в такі галузі промисловості: енергетика, машинобудування, металургія, харчова промисловість. Уся модель побудована відповідно до методології системної динаміки Дж. Форрестера. Структура імітаційної моделі являє собою набір блоків, об'єднаних за допомогою закритих інформаційних потоків, що містять дані про фінанси, якість і чисельність персоналу, структуру основних фондів та оборотних коштів, рівень застосовуваних методів, продуктів і нематеріальних

¹ Державна програма прогнозування науково-технологічного розвитку на 2008-2012 роки (Інститут економіки і прогнозування НАН України). URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/91694233>

активів. Основними блоками імітаційної моделі є такі: види економічної діяльності; сфера науково-дослідної інженерії; сфера розвитку діяльності; сфера освіти; сфера торгівлі. Блоки забезпечення імітаційної моделі включають: блок інвестицій розповсюдження; блок визначення типу економічного стану економічної діяльності країни; блок, що описує демографічну ситуацію в країні; блок, що імітує бюджети всіх рівнів країни. Загалом імітаційна модель містить понад 2000 змінних і чинників та забезпечує середньостроковий прогноз зміни таких параметрів господарської діяльності галузей, що розглядаються: обсяг виконаних інженерних досліджень; обсяг завершених заходів щодо розвитку; сума основних засобів; обсяг робочого капіталу; сума нематеріальних активів; кількість персоналу, задіяного у виробництві; рівень кадрового дефіциту на виробництві; чистий прибуток та ін.

Удосконалена фахівцями Інституту економіки і прогнозування НАН України імітаційна модель, порівняно з існуючими аналогами, має такі переваги (Бабич, 2017):

можливість її використання для прогнозування розвитку промисловості як в Україні, так і в будь-якій країні Європейського Союзу завдяки відповідності класифікатору КВЕД-2012 міжнародній статистичній класифікації видів економічної діяльності ЄС (NACE);

можливість прогнозування розвитку промисловості України в розрізі її основних галузей і видів економічної діяльності, що утворюють ці галузі;

наявність механізму моделювання міжгалузевих взаємодій, що підвищує адекватність прогнозування процесів виробництва та розподілу продукції між видами економічної діяльності, державним сектором, кінцевим споживанням населення та іноземними споживачами;

наявність механізму моделювання обсягу імпорту продукції для внутрішньогалузевого споживання (виробничих потреб) щодо кожного з видів економічної діяльності, що розглядаються в імітаційній моделі.

Однак, незважаючи на наведені переваги, а також можливість застосування

органами державної влади для побудови середньо- та довгострокових прогнозів розвитку окремих видів економічної діяльності, промисловості зокрема, імітаційна модель має певні обмеження у використанні. Це пов'язано з тим, що класифікація видів економічної діяльності з 2012 р. декілька разів уточнювалася, тож модель потребує відповідного перегляду. Крім того, при моделюванні міжгалузевих взаємодій не були враховані нові фактори, що відображають особливості Четвертої промислової революції та розвитку цифрових технологій.

Оригінальний підхід до моделювання економічного розвитку України на регіональному і національному рівнях з використанням ідей системної динаміки розроблено в Інституті економіки промисловості НАН України в рамках реалізації проекту щодо створення інформаційно-аналітичної системи супроводження бюджетного процесу (Вишневський, 2013). У роботі були задіяні десятки фахівців, спільними зусиллями яких було розроблено методологію, створено моделі, сформовано бази даних і комп'ютерні програми, призначені для побудови й аналізу різних сценаріїв розвитку національного господарства та його основних територіальних складових у контексті впливу бюджетно-податкової політики. Первинний елемент усієї цієї системи складають моделі економік областей України, у яких підприємства різних галузей випускають продукцію, використовуючи працю і капітал:

$$Y_{ie} = f_1(K_{ie}^f, K_{ie}^v, L_{ie}^h), \quad (16)$$

$$K_{ie}^{fr} > 0, K_{ie}^{vr} > 0, \quad (17)$$

де Y_{ie} – обсяг товарної продукції галузі ε у періоді i (без урахування ПДВ і акцизів, у порівняльних цінах);

K_{ie}^f – залишкова вартість основного капіталу галузі ε у періоді i ($K_{ie}^f > 0$);

K_{ie}^v – обіговий капітал галузі ε у періоді i ($K_{ie}^v > 0$);

L_{ie}^h – витрати праці (у годинах) у галузі ε у періоді i ;

i – номер періоду.

Функція f_1 в моделі представлена як виробнича з постійною еластичністю заміщення (CES – Constant Elasticity of Substitution)

$$Y_{ie} = \gamma_e \left[k_e^f (K_{ie}^f)^{-\alpha_e} + k_e^v (K_{ie}^v)^{-\alpha_e} + k_e^l (L_{ie}^h)^{-\alpha_e} \right]^{-\frac{1}{\alpha_e}} \zeta_i, \\ K_{ie}^f > 0, K_{ie}^v > 0, L_{ie}^h > 0, \\ k_e^f > 0, k_e^v > 0, k_e^l > 0, k_e^f + k_e^v + k_e^l = 1, \quad (18)$$

де γ_e – параметр нейтральної ефективності технологій у галузі ε ;

k_e^v – параметр фондомісткості обігового капіталу в галузі ε ;

k_e^f – параметр фондомісткості обігового капіталу в галузі ε ;

k_e^l – параметр трудомісткості виробництва в галузі ε ;

ν_e – параметр віддачі на масштаб виробництва в галузі ε (ступеня однорідності функції) $\nu_e > 0$;

$\sigma_e = 1/(1 + \alpha_e)$ – еластичність заміщення ресурсів у галузі ε ;

ζ_i – рівень інфляції в періоді i .

Із використанням цієї функції як ядра моделі було створено дуже складну і розгалужену інформаційно-аналітичну систему, певне уявлення про яку дає рисунок.

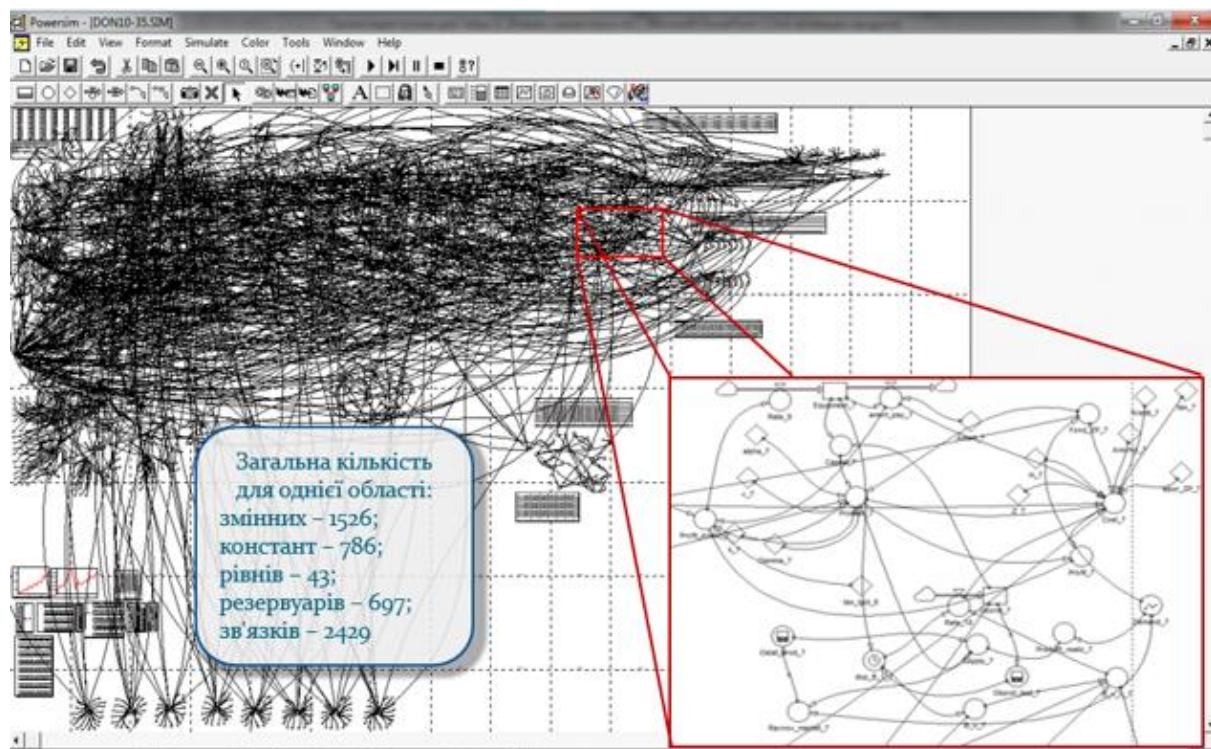


Рисунок – Фрагмент системно-динамічної моделі економіки області (Вишневецький, 2013, с. 90)

Апробація системи засвідчила її достатню точність при прогнозуванні розвитку і придатність для вирішення поставлених завдань, у тому числі з урахуванням галузевої специфіки. Але у зв'язку з великою кількістю змінних, різного роду параметрів, потрібних первинних даних тощо її обслуговування було вельми складним і трудомістким.

Усі наведені моделі – це лише окремі приклади з величезного масиву математичних імітацій, створених у світі. Перераховувати їх усі неможливо, тому що кількість модельованих об'єктів і вирішуваних при моделюванні завдань є нескінченною. А що важливо – так це винести певні уроки.

Як показали результати цього короткого огляду, імітаційні моделі зазвичай

передбачають точне налаштування на функціонування конкретних об'єктів і вирішення специфічних завдань, а тому поширення або зміна сфери їх застосування є завжди проблемою. Під кожне нове завдання більш простим і доцільним є створення нової моделі, ніж переналаштування і поширення вже відомої. Але з робіт попередників можна і потрібно брати апробовані керівні принципи та корисні ідеї.

Не менш важливо засвоїти певні методологічні настанови, а саме: за умови забезпечення достатнього зв'язку отриманих результатів із даними спостережень (вимога операціональності) доцільно надавати перевагу простішим моделям із меншою кількістю чинників впливу (вимога економічності).

Експертні та комбіновані підходи

Експертні та комбіновані підходи широко використовуються для виявлення тенденцій економічного зростання в умовах динамічних соціально-економічних, техніко-технологічних, екологічних та інших трансформацій. Загалом вважається, що методи експертних оцінок із залученням провідних представників конкретних галузей знань можуть бути достатньо об'єктивними і точними, у тому числі тому, що евристика, заснована на обмеженій інформації, за певних умов може бути навіть більш надійним інструментом передбачення, ніж формальні методи дослідження, засновані на «твердих» даних (Gigerenzer, Brighton, 2009).

У процесі еволюції експертного підходу, що базується на аналізі суджень висококваліфікованих фахівців у тих чи інших галузях наукового знання, виокремилася низка методів, серед яких найчастіше використовуються методи однорангової оцінки (peer review), «круглого столу», «мозкового штурму», Делфі та ін.

Однак у зв'язку із суб'єктивністю експертних оцінок і високим ризиком отримання суттєвих помилок їх часто не використовують у чистому вигляді, а комбінують із методами економіко-математичного моделювання та сценарного підходу. Такі

комбінації широко використовуються як для ретроспективних оцінок впливу нових наукових і технологічних досягнень на природу, економіку та суспільство, так і для побудови сценаріїв майбутнього.

Прикладом може бути форсайтинг (для найдовшого часового інтервалу – стратегічний форсайтинг), який часто поєднує експертні методи передбачення з різними методами побудови узгоджених прогнозів: «... систематичні спроби оцінити довгострокові перспективи науки, технологій, економіки та суспільства, щоб визначити стратегічні напрями досліджень та нові технології, здатні принести найбільші соціально-економічні блага» (Martin Ben, 1993). Форсайтинг виходить із варіантів можливого майбутнього, які можуть настати при виконанні певних умов: правильного визначення сценаріїв розвитку, досягнення консенсусу щодо вибору того чи іншого бажаного сценарію, вжитих заходів щодо його реалізації (Соколов, 2007). Метою застосування цього методу в найширшому розумінні є «досягнення найповнішого консенсусу в суспільстві у процесі обговорення варіантів розвитку майбутнього та його сценаріям різними соціальними групами» (Писаренко, Кваша, Карлюк, Лях, 2015, с. 8). При цьому часто метод форсайтингу передбачає опитування за допомогою методу Делфі достатньої кількості експертів і використання як допоміжних індикаторів кількісних показників. При цьому висновки фахівців вважаються основними (Писаренко, Кваша, Карлюк, Лях, 2015).

Слід зазначити, що на початку 90-х років минулого століття форсайтинг розвивався переважно в чотирьох країнах (США, Німеччина, Японія та Австралія), у 2001 р. кількість таких країн досягла 29, а з 2008 р. – понад 50 (Писаренко, Кваша, Карлюк, Лях, 2015). У Японії перший 30-річний технологічний форсайт було розроблено Агентством з науки і техніки у 1970 р. з метою забезпечення уряду та приватного сектору загальним оглядом перспектив науки і техніки, необхідним для розроблення узгоджених політичних, економічних та

науково-технічних рішень. З того часу такі дослідження здійснюються на регулярній основі з періодичністю один раз на п'ять років. Перевірка результативності першого опитування, виконаного у 1970 р., показала, що протягом наступних 20 років повністю або частково виправдалися 64% виконаних оцінок. Разом з тим японські фахівці вбачають цінність методології форсайтингу навіть не стільки у достовірності одержуваних оцінок і прийнятих на основі прогнозів управлінських рішень, скільки у самому процесі вироблення узгоджених оцінок.

Більшість сучасних форсайтів розробляється за принципами взаємодоповнення трендових і експертних методів. При цьому якісні методи більшою мірою націлені на «творчий підхід», а кількісні – на «доказовість» (Попов, Сергеева, 2010). Відповідно до «Посібника зі стратегічного форсайту» П. Бішопа (Bishop, Hines, 2007, р. 191-229) відповідна методологія включає п'ять основних етапів:

- формулювання проблеми або опис обраного напрямку;

- вивчення існуючих умов, які впливають на досліджувану сферу;

- аналіз існуючої ситуації;

- визначення поточних тенденцій щодо проблеми, яка вивчається, і формулювання можливих сценаріїв розвитку з імовірними наслідками;

- розроблення пропозицій (рекомендацій) щодо кожного сценарію за участю всіх зацікавлених сторін.

Застосування форсайтингу дозволяє комплексно виявляти проблемні та критичні зони майбутнього, визначати фактори, що впливають на формування стратегій розвитку у сфері дослідження, представляти інтереси всіх стейкхолдерів, організованих в експертні групи. Насамперед форсайт орієнтований на оцінку перспектив інноваційного розвитку та вивчення можливих технологічних горизонтів. Набір підходів, що використовуються у форсайт-проектах, постійно розширюється та охоплює сьогодні десятки методів – як якісних (інтерв'ю, огляди літератури, «дерева відповіднос-

тей», сценарії та ін.), так і кількісних (метод зворотного прогнозування, моделювання, аналіз взаємного впливу (cross-impact analysis) тощо). Такі відомі методи, як Делфі, «дорожня карта», критичні технології, багатокритеріальний і патентний аналіз, ігрове моделювання та ін., мають синтетичний характер. Набір методів, що застосовуються в тому чи іншому проєкті, може обиратися з урахуванням багатьох чинників: часових і ресурсних обмежень, наявності достатньої кількості висококваліфікованих експертів, доступу до інформаційних джерел тощо. При цьому ключовою умовою успіху проєкту є використання методів, що забезпечують ефективну роботу залучених експертів (Мельников, 2015).

У цілому форсайтінг (форсайт) є терміном для методологій і підходів, які, відштовхуючись від волатильності, невизначеності, нечіткості та складності майбутнього, досліджують його ймовірні сценарії, включаючи найбільш бажані, та створюють інсайти, які ведуть до прийняття відповідних заходів, необхідних тут і зараз. Форсайт є інструментом виявлення трендів у найближчому, середньо- та довгостроковому майбутньому, які необхідно враховувати при плануванні на всіх рівнях управління, особливо на національному. На національному рівні стратегічне виявлення трендів сприяє реалізації більш ефективного державного управління, а також конструкції послідовного формулювання національних стратегій та національної ідентичності (Мельников, 2015, с. 103-104).

За частотою використання інструменти форсайтингу розподіляють на (Попов, Сергеева, 2010):

- 1) методи з високою частотою використання (50-25% форсайт-проектів) – огляди літератури, сценарії, метод мозкового штурму, панелі, семінари;

- 2) методи із середньою частотою використання (24-10% форсайт-проектів) – метод Делфі, критичних технологій, SWOT-аналіз, сканування середовища, тренди;

- 3) методи з малою частотою використання (9-1% форсайт-проектів) – техноло-

гічні дорожні карти, картування зацікавлених кіл, опитування населення, імітаційне моделювання, ретрополяція, есе, ділові ігри, аналіз взаємовпливу факторів, аналіз мегатрендів, багатфакторний аналіз, методи бібліометрії.

Наведені дані свідчать про більшу популярність у форсайт-проєктах «м'яких» методів дослідження порівняно з традиційними кількісними. Загалом, інструменти, що отримали узагальнену назву «форсайтінгу», зарекомендували себе як надійний засіб вибору пріоритетів у сфері науки і технологій, а надалі – і в широкому колі проблем соціально-економічного й екологічного розвитку. За результатами форсайт-проєктів формуються численні національні та міжнародні дослідницькі програми. Зокрема, у ЄС – Шоста та Сьома Рамкові програми з наукових досліджень і технологічного розвитку. У Японії основу програм форсайту становить метод Делфі, за яким кожні п'ять років розробляється технологічний прогноз на найближчі 30 років. У США за допомогою форсайтінгу визначають пріоритети технологічного розвитку щодо критичних технологій (горизонт планування – 10 років). У Великобританії наприкінці 1990-х – початку 2000-х років розроблялися форсайт-прогнози щодо підвищення добробуту та якості життя (горизонт – 10-20 років), а також щодо посилення інноваційного потенціалу науки (горизонт – 10-20 років). У Німеччині форсайтінг використовується для розроблення стратегічного бачення для Міністерства освіти і науки (горизонт – 20 років) (Соколов, 2007).

Серед реалізованих форсайт-проєктів (Implemented Foresight Projects) слід відзначити такі (Быстров, 2019):

розроблення соціальних програм (старіння населення, охорона здоров'я, освіта) у Німеччині, Японії, Австрії, Нідерландах;

стратегічні програми інноваційного розвитку Японії, Ірландії, Австралії;

прогнози, сценарії, технологічні карти розвитку галузей економіки Великобританії, Італії, Канади;

посилення інтеграції науки та освіти в ЄС;

розроблення національних (міжнародних) науково-технічних програм Чехії, Китаю, ЄС, формування переліків критичних технологій США, Франції, Нідерландів;

позиціонування у світовому науково-технологічному просторі Японії, Великобританії, Німеччини.

Одним з останніх актуальних напрямів розроблення форсайт-проєктів стало дослідження довгострокового індустріального розвитку. Зокрема, форсайтінг може використовуватися для виявлення факторів, здатних вплинути на економіку і суспільство в середньо- та довгостроковій перспективі (Быстров, 2019). У роботах (Magruk, 2020; Vecchiato, Favato, di Maddaloni, Do, 2020) визначається взаємозв'язок форсайтінгу з постановкою цілей стратегії у промисловості та вибором механізмів їх реалізації. Активне використання інформаційних і комунікаційних технологій для інтеграції виробничих систем на різних рівнях і по всьому ланцюгу створення доданої вартості, також відоме як промисловий інтернет речей, є актуальною темою для стратегічного форсайтінгу через очікувані масштабні економічні, соціальні та екологічні наслідки розвитку кіберфізичних систем (Matthias Weber, Gudowsky, Aichholzer, 2019; Magruk, 2020; Çifci, Yüksel, 2018).

Висновки. Як свідчить виконаний аналіз, каузальні економетричні моделі виробництва – це відносно простий і зручний у використанні, а тому найбільш поширений інструментарій дослідження довгострокового економічного майбутнього. При цьому процес генерування доданої вартості визначається залежно від змін ключових факторів, які його визначають. Існує багато варіантів виробничих функцій, пристосованих до окремих обставин, і вони в цілому довели свою здатність вирішувати поставлені завдання.

Проте лише простоти та зручності недостатньо, коли постає проблема більш точного налаштування на особливості модельованого об'єкта досліджень. Така проблема є актуальною, коли, по-перше, досліджується економіка «з особливостями розвитку», якою є нинішнє господарство Укра-

їни; по-друге, коли особлива увага приділяється не економіці загалом, а її окремим секторам (у даному випадку – промисловості), яку доводиться моделювати у зв'язках і взаємозалежностях з іншими секторами економіки; по-третє, коли плавна течія економічних подій порушується з тих чи інших причин, зокрема, у зв'язку з революційними трансформаціями виробничих сил і відносин. Наразі саме такий час, оскільки світом поширюються кіберфізичні технології Четвертої промислової революції.

У таких специфічних обставинах доцільно порушувати питання про використання більш складних комплексних моделей. Вони, з одного боку, є кращими, оскільки дозволяють точніше налаштовуватися на модельований об'єкт, у тому числі за рахунок додавання важливих чинників, які перебувають за межами власне виробничої системи, а з іншого – гіршими, оскільки ускладнюють аналіз і суттєво збільшують кількість змінних, потрібних для опису динаміки економічного зростання. Більше змінних – це більше ступенів свободи, більше розмірність простору станів системи, а отже, більша невизначеність щодо того, яким може бути економічне майбутнє та які саме важелі впливу на нього доцільно обирати. Крім того, краще попадання в історичні дані не завжди означає більший потенціал для передбачення майбутнього. Це, зокрема, обумовлено ефектом «перенавчання», адже чим більш гнучкою і точно налаштованою на історичні дані є модель, тим більшою є імовірність того, що вона «спіймала» не тільки об'єктивні закономірності розвитку, але і випадкові «шуми» (Gigerenzer, Brighton, 2009).

У зв'язку з цим не можна нехтувати експертними методами дослідження, тим більше, що без них неможливо побудувати методи кількісного аналізу «твердих» даних – вибір типу моделі, кола факторів впливу, можливих сценаріїв розвитку тощо потребує, як правило, експертних оцінок (часто неявних). Тому, зберігаючи конструктивний сумнів щодо значущості різного роду авторських прогнозів, опитувань тощо (особливо без їх належної технічної підго-

товки), при аналізі довгих факторів і тенденцій розвитку важливо дотримуватись головного методологічного посилу експертних підходів, розвинутого при побудові форсайтів. Тобто для далеких часових горизонтів в умовах суттєвої невизначеності доцільно порушувати питання не про розрахунок «правильного майбутнього», а про оцінювання спектру вірогідних сценаріїв розвитку, розширення і переосмислення його нових можливостей і викликів, зокрема для уникнення потенційно згубних ідей і очікувань, закладених у поточну політику. Саме таке оцінювання може становити предмет подальших досліджень.

Література

- Акаев А.А., Хироока М. (2009). Об одной математической модели для долгосрочного прогнозирования динамики инновационно-экономического развития. *Доклады Академии наук*. Т. 425. № 6. С. 727-732.
- Амоша О.І., Харазішвілі Ю.М., Ляшенко В.І. (2018). Модернізація економіки промислових регіонів України в умовах децентралізації управління: монографія. НАН України, Ін-т економіки пром-сті. Київ. 300 с.
- Асемоглу Д. (2018). Введение в теорию современного экономического роста: в 2 кн. Москва: ИД "Дело" РАНХиГС. 928 с.
- Бабич И.И. (2017). Моделирование межотраслевых взаимодействий в имитационной модели прогнозирования развития промышленности Украины. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Сер.: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами: зб. наук. пр.* № 2 (1224). С. 95-105.
- Быстров А.В. (2019). Форсайт как инструмент промышленного стратегического развития. *Экономика в промышленности*. Т. 12. № 3. С. 248-255. DOI: <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2019-3-248-255>
- Васильев Е. П. (2006). Агрегированная производственная функция "Спор двух

- Кембриджей". *Вопросы экономики*. № 6 (138). С. 26-28.
- Вертакова Ю. В. (2016). Обзор экономических подходов и моделей для прогнозирования ВВП. *Экономика и управление*. № 2 (124). С. 22-29.
- Вишневський В.П. (2013). Нові аналітичні методи обґрунтування бюджетно-податкової політики держави. *Вісник НАН України*. № 5. С. 89-91.
- Вишневський В. П., Гаркушенко О. М., Князев С.І. (2020). Технологічні розриви: концепція, моделі, шляхи подолання. *Наука та інновації*. Т. 16. № 2. С. 3-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin16.02.003>
- Ковалев М., Господарик Е. (2014). Гибридные модели долгосрочного прогнозирования экономического роста стран ЕАЭС. *Вестник ассоциации белорусских банков*. №33 (748). С. 2-20.
- Леонтьев В. В. (1997). Межотраслевая экономика. Москва: Экономика, 479 с.
- Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Бахтизина Н. В. (2005). *CGE модель социально-экономической системы России со встроенными нейронными сетями*. Москва: ЦЭМИ РАН, 152 с.
- Мельников В. В. (2015). Форсайт как инструмент стратегического планирования развития промышленности. *Государственное и муниципальное управление в XXI веке: теория, методология, практика*. № 19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/forsayt-kak-instrument-strategicheskogo-planirovaniya-razvitiya-promyshlennosti> (Дата звернення: 12.09.2022).
- Нуреев Р. М. (2008). Экономика развития: модели становления рыночной экономики. Москва: Норма. 367 с.
- Пикетти Т. (2014). Капитал в XXI веке. пер. с фр. А. Л. Дунаев, науч. ред. пер. А. Ю. Володин. Москва: Ад Маргинем Пресс. 592 с.
- Писаренко Т. В., Кваша Т. К., Карлюк Г. В., Лях Л.В. (2015). Інноваційна діяльність та її вплив на економічний розвиток в Україні: монографія. Київ: УкрІНТЕІ, 124 с.
- Половян А. В., Вишневская Е. Н. (2017). Регулирование коэволюции экономико-экологических популяций в контексте устойчивого развития. *Экономика и математические методы*. Т. 53. № 2. С. 101-117.
- Попов С. В., Сергеева В. В. (2010). Трендовое прогнозирование и научно-технологический форсайт – от конкуренции к синтезу. *Управление наукой и наукометрия*. № 9. С. 170-178.
- Ромер Д. (2014). Высшая макроэкономика. Пер. с англ. В.М. Полтерович. Москва: ИД ГУ ВШЭ. 855 с.
- Соколов А. В. (2007). Форсайт: взгляд в будущее. *Форсайт*. № 1 (1). С. 8-15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/forsayt-vzglyad-v-budushee> (Дата звернення: 12.09.2022).
- Столерю Л. (1974). Равновесие и экономический рост. Москва: Статистика. 472 с.
- Туманова Е. А., Шагас Н. Л. (2004). Макроэкономика. Элементы продвинутого подхода. Москва: ИНФРА-М. 400 с.
- Харазішвілі Ю. М. (2017). Світло та тінь економіки України: резерви зростання та модернізації. *Економіка України*. № 4(665). С. 22-45.
- Харазішвілі Ю. М. (2018). Оцінка внеску науково-технологічного прогресу в економічне зростання промислових регіонів України. *Економіка промисловості*. 3 (83). С. 5-20. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2018.03.005>
- Харазішвілі Ю. М. (2019). Теоретичні засади визначення інноваційного внеску в економічне зростання. *Управління економікою: теорія і практика. Восьмі Чумаченківські читання: зб. наук. праць*. С. 12-22.
- Харазішвілі Ю. М., Ляшенко В. І. (2021). Урахування інноваційних факторів економічного зростання у виробничій функції Коба-Дугласа (на прикладі старопромислових регіонів України). *Економіка промисловості*. № 1 (93). С. 5-19.
- Шараев Ю. В. (2006). Теория экономического роста. Москва: ИД ГУ ВШЭ. 254 с.

- Armstrong J. S. (Ed.) (2001). *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 849 p.
- Barro R., Lee J-W. (1993). International comparisons of educational attainment. *NBER Working Paper*. № 4349. 47 p.
- Barro R., Lee J-W. (2010). A new data set of educational attainment in the world, 1950-2010. *NBER Working Paper*. № 15902. 49 p.
- Bergheim S. (2005). Global growth centres 2020: Formel-G for 34 economies. *Deutsche Bank Research*. 32 p.
- Bishop P., Hines A. (2007). Thinking about the future: Guidelines for strategic foresight. Washington, DC: Social Technologies. 253 p.
- Bonabeau E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 99 (3). P. 7280-7287. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Brems H. (1975). The capital controversy: a Cambridge, Massachusetts View of Cambridge, England. *De Economist*. № 123. P. 369-384. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02115744>
- Buiter W., Rahbari E. (2011). Global growth generators: moving beyond emerging markets and BRIC's. Citi Investment Research & Analysis. *Citigroup Global Make*. 83 p.
- Chambers J. C., Mullick S. K., Smith D. D. (1971). How to choose the right forecasting technique. *Harvard business review*. Vol. 49 (4). P. 45-74.
- Çifci H., Yüksel N. (2018). "Foresight 6.0: The New Generation of Technology Foresight". *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC)*. P. 1-5.
- Cörvers F. (1996). The impact of human capital on labor productivity in manufacturing sectors of the European Union. *University of Limburg. ROA-RM-1996/2E*. 26 p.
- Cörvers F. (1997). Explaining trade in industrialized countries by country-specific human capital endowments. *Economic Modelling*. Vol. 14. P. 395-416.
- Cörvers F. (1997). The impact of human capital on labor productivity in manufacturing sectors of the European Union. *Applied Economics*. Vol. 29. P. 975-987.
- De Long J. B. (1988). Productivity Growth, Convergence, and Welfare: Comment. *The American Economic Review*. Vol. 5(78). P. 1138-1154.
- Felipe J., Kumar U., Abdon A. (2012). Using capabilities to project growth, 2010-2030. *Journal of the Japanese and International Economies*. № 26. P. 153-166.
- Forrester J. (2007). System Dynamics – a Personal View of the First Fifty Years. *System Dynamics Review*. Vol. 23 (2-3). P. 345-358.
- Gigerenzer G., Brighton H. (2009). Homo Heuristicus: Why Biased Minds Make Better Inferences. *Topics in Cognitive Science*. Vol. 1. P. 107-143. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2008.01006.x>
- Gual M., Norgaard R. (2010). Bridging Ecological and Social Systems Coevolution: A Review and Proposal. *Ecological Economics*, Vol. 69, pp. 707-717.
- Hall R. E., Jones C. I. (1996). The Productivity of Nations. *NBER Working Paper*. № 5812. DOI: <https://doi.org/10.3386/w5812>
- Hausman R., Hidalgo C.A. (2011). Atlas of economic complexity. Mapping path to prosperity. *Cambridge: MIT Press*. 364 p.
- Hirooka M. (2006). *Innovation Dynamism and Economic Growth. A Nonlinear Perspective*. Cheltenham; Northampton (MA): Edward Elgar. 426 p.
- Kononenko I., Babych I. (2011). Forecasting of Results of the State-Level Projects Implementation. The 7th International Conference on Business, Management and Economics (ICBME 2011). E-Proceedings. Cesme, Izmir, Turkey. 15 p.
- Kononenko I., Repin A. (2006). The Modelling and Forecasting of the Technological and Innovational Development of a Transition-Economy Country. *The 3rd International Conference on Project Management (ProMac2006)*. Sydney, Australia. 7 p.

- Magruk A. (2020). Uncertainties, Knowledge, and Futures in Foresight Studies – A Case of the Industry 4.0. *Фортисім*. № 4 (14) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uncertainties-knowledge-and-futures-in-foresight-studies-a-case-of-the-industry-4-0> (Дата звернення: 12.09.2022).
- Mankiw G., Romer D., Weil D. (1992). Contribution to the Empirics of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics* № 2. Vol. 107. P. 407-437. DOI: <https://doi.org/10.2307/2118477>
- Martin, Ben R. (1993). Research Foresight and the exploitation of science base. HSMO, London. 85 p.
- Matthias Weber K., Gudowsky N., Aichholzer G., (2019). Foresight and technology assessment for the Austrian parliament. *Finding new ways of debating the future of industry 4.0, Futures*. Vol. 109. P. 240-251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.06.018>
- Meadows D.H., Jorgen R., Meadows D.L. (2004). *The limits to growth: the 30-year update*. Vermont: Chelsea Green Publishing Company, 338 p.
- Nelson R.R., Phelps E.S. (1966). Investment in Humans, Technological Diffusion, and Economic Growth. *American Economic Review*. № 1/2. Vol. 56. P. 69-75.
- Niazi M., Hussain A. (2011). Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey. *Scien-tometrics*. Vol. 89. P. 479-499. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-011-0468-9>
- Schultz T.W. (1961). Investment in Human Capital. *American Economic Review*. № 1. Vol. 51. C. 1-17.
- Schultz T. W. (1963). The economic value of education. *New York: Columbia University Press*. 92 p.
- Solow R. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*. Vol. 70 (1). P. 65-94.
- Amosha, O.I., Kharazishvili, Yu.M., & Lya-shenko, V.I. (2018). Modernization of the economy of industrial regions of Ukraine in the minds of decentralization of management: monograph. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Industrial Economics. Kyiv [in Ukrainian].
- Asemoglu, D. (2018). Introduction to the theory of modern economic growth: in 2 books. Moskow: Publishing House "Delo" RANEPa [in Russian].
- Babich, I.I. (2017). Modeling of intersectoral interactions in a simulation model for forecasting the development of Ukrainian industry. *Visnyk natsionalnogo universytetu "KhPI". Series: Stratehichne upravlinnia, upravlinnia portfeliamy, prohramamy ta proektamy: collection of scientific papers*, 2 (1224), pp. 95-105 [in Russian].
- Bystrov, A.V. (2019). Foresight as a tool for industrial strategic development. *Ekonomika v promyshlennosti*. 12 (3), pp. 248-255. DOI: <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2019-3-248-255> [in Russian].
- Vasiliev, E. (2006). Aggregate production function "Dispute between two Cambridges". *Voprosy ekonomiki*, 6 (138), pp. 26-28 [in Russian].
- Vertakova, Yu. V. (2016). Review of economic approaches and models for GDP forecasting. *Ekonomika i upravleniye*, 2 (124), pp. 22-29 [in Russian].
- Vishnevsky, V.P. (2013). New analytical methods of obstructing the budgetary and tax-paying policy of the state. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.*, 5, pp. 89-91 [in Ukrainian].
- Vishnevsky, V.P., Harkushenko, O.M., & Kni-aziev, S.I. (2020). Technology Gaps: The Concept, Models, and Ways of Overcoming. *Sci. innovation*, 16 (2), pp. 3-17. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine16.02.003>
- Kovalev, M., & Gospodarik, E. (2014). Hybrid models of long-term forecasting of economic growth in the EAEU countries. *Vestnik assotsiatsii belorusskikh bankov*, 33 (748), pp. 2-20 [in Russian].
- Leontiev, V. V. (1997). Intersectoral economy. Moscow: Economics [in Russian].
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., & Bakhtizina N.V. (2005). *CGE model of the socio-economic*

References

- Akaev, A.A., & Hirooka, M. (2009). On one mathematical model for long-term forecasting of the dynamics of innovation and economic development. *Doklady Akademii nauk*, 425 (6), pp. 727-732. [in Russian].

- system of Russia with built-in neural networks. Moscow: CEMI RAN [in Russian].
- Melnikov, V.V. (2015). Foresight as a tool for strategic planning of industrial development. State and municipal management in the XXI century: theory, methodology, practice, 19. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/forsayt-kak-instrument-strategicheskogo-planirovaniya-razvitiya-promyshlennosti> [in Russian].
- Nureev, R. M. (2008). Economics of Development: Models for the Formation of a Market Economy. Moscow: Norma [in Russian].
- Piketty, T. (2014). Capital in the XXI century. In A. L. Dunaev (Transl. from french.), A. Yu. Volodin (Scien. ed.). Moscow: Ad Marginem Press [in Russian].
- Pisarenko, T.V., Kvasha, T.K., Karlyuk, G.V., & Lyakh, L.V. (2015). Innovation activity and its influx into economic development in Ukraine: monograph. Kiev: UkrINTEI [in Ukrainian].
- Polovyan, A.V., & Vishnevskaya, E.N. (2017). Regulation of co-evolution of economic and ecological populations in the context of sustainable development. *Ekonomika i matematicheskiye metody*, 53 (2), pp. 101-117 [in Russian].
- Popov, S.V., & Sergeeva, V.V. (2010). Trend forecasting and scientific and technological foresight – from competition to synthesis. *Upravleniye naukoj i naukometriya*, 9, pp. 170-178 [in Russian].
- Romer, D. (2014). Higher macroeconomics. In V.M. Polterovich (Trans. from English). Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics [in Russian].
- Sokolov, A. V. (2007). Foresight: a look into the future. *Forsayt*, 1 (1), pp. 8-15. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/forsayt-vzglyad-v-budushee> [in Russian].
- Stoleriu, L. (1974). Equilibrium and economic growth. Moscow: Statistics [in Russian].
- Tumanova, E., & Shagas, N. L. (2004). Macroeconomics. Elements of an advanced approach. Moscow: INFRA-M [in Russian].
- Kharazishvili, Yu. (2017). Light and shadow of the economy of Ukraine: reserves for growth and modernization. *Ekonomika Ukrainy*, 4(665), pp. 22-45 [in Ukrainian].
- Kharazishvili, Yu. (2018). Evaluation of the scientific and technological progress in the economic growth of industrial regions of Ukraine. *Econ. promysl.*, 3 (83), pp. 5-20. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2018.03.005> [in Ukrainian].
- Kharazishvili, Yu. M. (2019). Theoretical ambush for the purpose of innovative contribution to economic growth. *Upravlinnia ekonomikoiu: teoriia i praktyka. Vosmy Chumachenkivski chytannia*: collection of scientific papers, pp. 12-22 [in Ukrainian].
- Kharazishvili, Yu., & Lyashenko, V. (2021). Improvement of innovative factors of economic growth in the Cob-Douglas production function (on the basis of the old industrial regions of Ukraine). *Econ. promysl.*, 1 (93), pp. 5-19 [in Ukrainian].
- Sharaev, Yu. V. (2006). Theory of economic growth. Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics [in Russian].
- Armstrong, J. S. (Ed.) (2001). *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 849 p.
- Barro, R., & Lee, J-W. (1993). International comparisons of educational achievement. *NBER Working Paper*, 4349. 47 p.
- Barro R., & Lee J-W. (2010). A new data set of educational attainment in the world, 1950-2010. *NBER Working Paper*, 15902, 49 p.
- Bergheim, S. (2005). Global growth centers 2020: Formel-G for 34 economies. *Deutsche Bank Research*, 32 p.
- Bishop, P., Hines, A. (2007). Thinking about the future: Guidelines for strategic foresight. Washington, DC: Social Technologies. 253 p.
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 (3), pp. 7280-7287. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Brems, H. (1975). The capital controversy: a Cambridge, Massachusetts View of Cambridge, England. *De Economist*, 123,

- pp. 369-384. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02115744>
- Buiter, W., & Rahbari, E. (2011). Global growth generators: moving beyond emerging markets and BRIC's. Citi Investment Research & Analysis. *Citigroup Global Make*, 83 p.
- Chambers, J.C., Mullick, S.K., & Smith, D.D. (1971). How to choose the right forecasting technique. *Harvard business review*, 49 (4), pp. 45-74.
- Çifci, H., & Yüksel, N. (2018). "Foresight 6.0: The New Generation of Technology Foresight". *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC)*, pp. 1-5.
- Corvers, F. (1996). The impact of human capital on labor productivity in manufacturing sectors of the European Union. *University of Limburg*. ROA-RM-1996/2E. 26 p.
- Corvers, F. (1997). Explaining trade in industrialized countries by country-specific human capital endowments. *Economic modelling*, 14, pp. 395-416.
- Corvers, F. (1997). The impact of human capital on labor productivity in manufacturing sectors of the European Union. *Applied Economics*, 29, pp. 975-987.
- De Long, J. B. (1988). Productivity Growth, Convergence, and Welfare: Comment. *The American Economic Review*, 5 (5), pp. 1138-1154.
- Felipe, J., Kumar, U., & Abdon, A. (2012). Using capabilities to project growth, 2010-2030. *Journal of the Japanese and International Economies*, 26, pp. 153-166.
- Forrester, J. (2007). System Dynamics – a Personal View of the First Fifty Years. *System Dynamics Review*, 23 (2-3), pp. 345-358.
- Gigerenzer, G., & Brighton, H. (2009). Homo Heuristicus: Why Biased Minds Make Better Inferences. *Topics in Cognitive Science*, 1, pp. 107-143. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2008.01006.x>
- Gual, M., & Norgaard, R. (2010). Bridging Ecological and Social Systems Coevolution: A Review and Proposal. *Ecological Economics*, 69, pp. 707-717.
- Hall, R. E., & Jones, C. I. (1996). The Productivity of Nations. *NBER Working Paper* No. 5812. DOI: <https://doi.org/10.3386/w5812>
- Hausman, R., & Hidalgo, C.A. (2011). Atlas of economic complexity. Mapping path to prosperity. *Cambridge: MIT Press*. 364 pp.
- Hirooka, M. (2006). *Innovation Dynamism and Economic Growth. A Nonlinear Perspective*. Cheltenham; Northampton (MA): Edward Elgar, 426 p.
- Kononenko, I., Babych, I. (2011). Forecasting of Results of the State-Level Projects Implementation. The 7th International Conference on Business, Management and Economics (ICBME 2011). E-Proceedings. Cesme, Izmir, Turkey, 15 p.
- Kononenko, I., & Repin, A. (2006). The Modelling and Forecasting of the Technological and Innovational Development of a Transition-Economy Country. *The 3rd International Conference on Project Management (ProMac2006)*. Sydney, Australia, 7 p.
- Magruk, A. (2020). Uncertainties, Knowledge, and Futures in Foresight Studies - A Case of the Industry 4.0. *Форсайт №4* (14) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uncertainties-knowledge-and-futures-in-foresight-studies-a-case-of-the-industry-4-0> (Accessed: 12.09.2021).
- Mankiw, G., Romer, D., & Weil, D. (1992). Contribution to the Empirics of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 2 (107), pp. 407-437. DOI: <https://doi.org/10.2307/2118477>
- Martin, Ben R. (1993). Research Foresight and the exploitation of science base. *HSMO, London*, 85 p.
- Matthias Weber, K., Gudowsky, N., & Aichholzer, G., (2019). Foresight and technology assessment for the Austrian parliament. *Finding new ways of debating the future of industry 4.0, Futures*, 109, pp. 240-251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.06.018>
- Meadows, D.H., Jorgen, R., & Meadows, D.L. (2004). *The limits to growth: the 30-year update*. Vermont: Chelsea Green Publishing Company, 338 p.

- Nelson, R.R., & Phelps, E.S. (1966). Investment in Humans, Technological Diffusion, and Economic Growth. *American Economic Review*, 1/2 (56). pp. 69-75.
- Niazi, M., & Hussain, A. (2011). Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey. *Scientometrics*, 89, pp. 479-499. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-011-0468-9>
- Schultz, T.W. (1961). Investment in Human Capital. *American Economic Review*, 1 (51), pp. 1-17.
- Schultz, T.W. (1963). The economic value of education. *New York: Columbia University Press*. 92 p.
- Solow, R. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), pp. 65-94.

Светлана Сергеевна Турлакова,

д-р экон. наук

Институт экономики промышленности НАН Украины
ул. Марии Капнист, 2, г. Киев, 03057, Украина

E-mail: svetlana.turlakova@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3954-8503>

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ДОЛГОСРОЧНОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Обоснована актуальность исследования соответствующих математических методов и моделей долгосрочного развития национальной промышленности. Доказано, что каузальные эконометрические модели производства являются относительно простым и удобным в использовании и наиболее распространенным инструментарием исследования долгосрочного экономического будущего. Определено, что производственные функции, приспособленные к отдельным обстоятельствам, доказали свою способность решать поставленные задачи. Однако проблема более точной настройки на особенности моделируемого объекта исследований актуальна в нынешних условиях развития Украины, при концентрации внимания на отдельных секторах, в частности промышленности, и в связи с революционными трансформациями производственных сил и отношений соответственно распространению киберфизических технологий Четвертой промышленной революции.

В таких специфических обстоятельствах целесообразно ставить вопрос об использовании более сложных комплексных моделей. С одной стороны, они лучше, поскольку позволяют точнее настраиваться на моделируемый объект, в том числе за счет добавления важных факторов, которые находятся за пределами производственной системы, а с другой – хуже, поскольку усложняют анализ и существенно увеличивают количество переменных, необходимых для описания динамики экономического роста. В этой связи нельзя пренебрегать экспертными методами исследования. Выбор типа модели, круга факторов воздействия, возможных сценариев развития и т.д. требует, как правило, экспертных оценок (часто неявных). Поэтому при анализе долгих факторов и тенденций развития важно придерживаться главного методологического посыла экспертных подходов к построению форсайтов: для дальних временных горизонтов в условиях существенной неопределенности целесообразно ставить вопрос не о расчете «правильного будущего», а об оценке спектра возможных сценариев развития, расширения и переосмысления его новых возможностей и вызовов, в частности во избежание потенциально пагубных идей и ожиданий, заложенных в текущую политику.

Ключевые слова: Четвёртая промышленная революция, математические методы и модели, долгосрочное развитие, промышленность, факторы производства, экономическая динамика, форсайт.

JEL: A10, C10, C49, C50, C60, C67, C68, D24, D57, D58, D60, E10, E17, E19, E20, E22, E23, E60, L52, L60, O10, O11, O12, O14, O20, O47

RESEARCH OF MATHEMATICAL METHODS AND MODELS OF LONG-TERM INDUSTRIAL DEVELOPMENT

The importance of the study of relevant mathematical methods and models of long-term development of the national industry is substantiated. It has been proven that causal econometric models of production are relatively simple and convenient to use in practice, as well as the most common tools for researching the long-term economic future. It was defined that the production functions, adapted to individual circumstances, proved their ability to solve the assigned tasks. However, the problem of more accurate adjustment to the features of the simulated object of research is particularly relevant in the current conditions of development of Ukraine, in the conditions of concentration of attention on certain sectors, on particular branch of industry, and in connection with the revolutionary transformations of production forces and relations, in accordance with the spread of cyber-physical technologies of the Fourth Industrial revolution.

In such specific circumstances, it makes sense to ask for more sophisticated models. On the one hand, they are better, as they allow more accurate tuning of the modeled object, including by adding important factors that are outside the production system. On the other hand, they are worse because they complicate the analysis and significantly increase the number of variables needed to describe the dynamics of economic growth. In this connection, expert research methods cannot be neglected. Choosing the type of model, the range of influencing factors, possible development scenarios, etc., usually requires expert assessments (often implicit). Therefore, when analyzing long-term factors and development trends, it is important to adhere to the main methodological message of expert approaches in the construction of foresights: for long time horizons in conditions of significant uncertainty, it is appropriate to ask questions not about the calculation of the "correct future", but about the assessment of the spectrum of probable scenarios of development, expansion and rethinking its new opportunities and challenges, in particular – to avoid potentially harmful ideas and expectations, embedded in the current policy.

Keywords: the Fourth industrial revolution, mathematical methods and models, long-term development, industry, factors of production, economic dynamics, foresight.

JEL: A10, C10, C49, C50, C60, C67, C68, D24, D57, D58, D60, E10, E17, E19, E20, E22, E23, E60, L52, L60, O10, O11, O12, O14, O20, O47

Формат цитування:

Турлакова С. С. (2022). Дослідження математичних методів і моделей довгострокового розвитку промисловості. *Економіка промисловості*. № 4 (100). С. 53-77. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2022.04.053>

Turlakova, S. S. (2022). Research of mathematical methods and models of long-term industrial development. *Econ. promisl.*, 4 (100), pp. 53-77. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2022.04.053>

Надійшла до редакції 02.11.2022 р.