

УДК 621.548, 621.311.24

В.А.Денисов (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)

## Динамічні моделі циклічного розвитку систем фотоелектричної генерації

Запропонована модель циклічного розвитку встановлених потужностей фотоелектричних систем генерації у вигляді узагальненої логістичної кривої.

Відповідність значень, розрахованих за допомогою моделі, реальним статистичним даним дала підставу для використання цієї моделі при прогнозуванні розвитку та розповсюдження технології фотоелектричної генерації серед домогосподарств в Україні. Бібл. 26, табл. 1, рис. 4.

**Ключові слова:** інноваційні технології, математична модель, відновлювана енергетика, сценарій розповсюдження.

Orcid: 0000-0002-3297-1114

Системи енергетики є окремим випадком великих систем, розвитку яких присвячено і постійно присвячується багато наукових досліджень. Аналіз останніх [1] приводить до висновку про існування закономірностей розвитку економічних процесів і непередбачуваних відхилень від звичного ходу подій, тобто невизначеності.

Прогнозування розвитку складних економічних систем базується на трьох основних теоретичних напрямках [1]:

- Теорія економічної рівноваги, в основу якої покладено дослідження параметрів стійких станів, причин їх порушення і механізмів відновлення. Моделям, заснованим на теорії рівноваги, присвячені наші попередні роботи, наприклад [2].

- Теорія економічного зростання, предметом якої є визначення умов стійкого, рівноважного, збалансованого росту і розвитку – теорія стадій економічного зростання Уолта Ростоу. Моделям, заснованим на теорії зростання, також присвячені наші попередні роботи, наприклад [3].

- Теорія економічних циклів або теорія кон'юнктури [4], що пояснює причини коливань економічної активності суспільства у часі.

Всі ці три теорії не суперечать, а доповнюють одна одну.

Системи розвиваються циклічно, в них відбуваються коливальні процеси. З періодом кілька років або десятиліть фаза росту супроводжується фазою зниження. При цьому, незва-

жаючи на коливання, загальна тенденція розвитку характеризується зростанням.

Теорія циклів, звана також теорією довгих хвиль Кондратьєва, що запропонована в [4], є основою теорії інновацій і численних інноваційних моделей дифузії нових технологій і параметрів їх життєвого циклу. Кондратьєв досліджував загальний хід динаміки кумулятивних величин – капіталу і населення та їх зв'язок із розвитком технологій. Як він стверджує [4], йому вдалося довести, що закон зміни кумулятивних елементів виражається диференціальним рівнянням, яке згодом було переформульовано в термінах впровадження інноваційних технологій і вважається фундаментальною моделлю інноваційної дифузії [5]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = g(t)(M - N(t)),$$

де  $N(t)$  – кумулятивна кількість користувачів на момент  $t$ , що прийняли та використовують технологію;  $M$  – максимально можлива кількість потенційних користувачів;  $g(t)$  – коефіцієнт (швидкість) дифузії, що відображає ймовірність того, що потенційні користувачі будуть приймати інновації у якийсь невеликий проміжок часу навколо часу  $t$ . Значення  $g(t)$  залежить від таких характеристик процесу дифузії, як тип інновацій, канали зв'язку, час і характеристики соціальної системи.

Залежно від формули для коефіцієнта дифузії  $g(t)$ , запропоновані [6] три моделі інноваційної дифузії: модель зовнішнього впливу [7], де кое-

фіцієнт дифузії  $g(t)$  є коефіцієнт або швидкість дифузії інновації  $p$ ; модель внутрішнього впливу [8], де коефіцієнт дифузії  $g(t) = qN(t)$ . Конкретний вид цієї моделі представлений добре відомою функцією Гомпертца для використання в прогнозуванні розвитку нової технології [9, 10].

Модель змішаного впливу, що розроблена Бассом [11], об'єднує обидві попередні моделі. Для моделі змішаного впливу коефіцієнт дифузії  $g(t) = p + qN(t)$ . В силу своєї великої спільності, у зв'язку з урахуванням внутрішніх і зовнішніх впливів, моделі змішаного впливу найбільш часто використовуються в дослідженнях [6, 12, 13]. Модель змішаного впливу може бути виражена за допомогою наступного рівняння:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left( p + \frac{q}{M} N(t) \right) (M - N(t)). \quad (1)$$

У спеціальному випадку, коли коефіцієнт або швидкість дифузії інновації  $p$  дорівнює нулю, модель Басса спрощується до наступного рівняння:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{q}{M} N(t) (M - N(t)).$$

Ця модель має назву логістичної моделі.

Обидві моделі – і модель Басса, і логістична модель дають S-подібні криві сукупної кількості користувачів. За визначенням, дифузійна S-форма (рис. 1) спочатку збільшується зі зростаючою швидкістю, сукупне число користувачів зростає з плином часу. Згодом крива досягає точки перегину, і швидкість дифузії починає зменшуватися. Нарешті, дифузія досягає рівня насичення  $M$ .

Е.Роджерс [14] вважає, що більша частина графіків прийняття інновацій членами суспільства нагадує нормальний розподіл (рис. 1). Криві показують швидкість і стадії поширення інновації у співтоваристві. Роджерс дав свою назву кожному сегменту, ґрунтуючись на середньому арифметичному і стандартному відхиленні: новатори – 2,5%; ранні послідовники – 13,5%; рання більшість – 34%; пізня більшість – 34%; відстаючі – 16%.

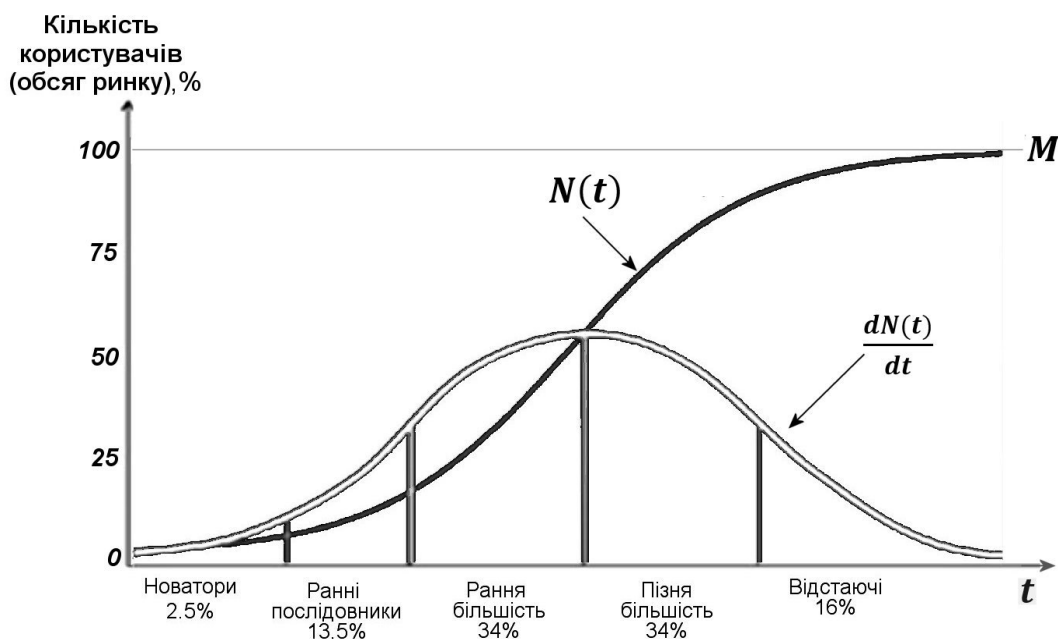


Рис. 1. Життєвий цикл інноваційної технології.

Всі розглянуті моделі припускають постійну максимально можливу кількість потенційних користувачів  $M$ . Але в дійсності  $M$  не є константою. Отже, потрібні моделі, в яких кількість потенційних користувачів є функцією часу  $M(t)$ .

У дослідженнях, присвячених інноваціям та інноваційному розвитку, особливої популярності набула концепція технологічного укладу, що випливає із запропонованої в 1970-1980-ті роки низкою західних економістів концепції техніко-

економічної парадигми [15]. Відомою є пропозиція В.Л.Макарова [16], що характеризує еволюцію сучасного суспільства не з точки зору чисто споживацької парадигми розвитку, характерної для високорозвинених економік ринкового типу, а з точки зору еволюції образів життя. Гіпотеза полягає в тому, що суспільство стратифіковане не за якимось приватним критерієм, наприклад, рівня доходу, майнового стану, рівня освіти чи професійної приналежності, а за образами життя, кожному з яких відповідає певний набір благ і можливостей. Вважається, що індивіди мислять "образами життя" і їх поведінка зорієнтована на придбання способу життя, що розширює межі можливостей.

Процес еволюційного розвитку, що описує еволюцію образів життя у В.Л.Макарова, може бути представлений у вигляді марківського ланцюга, що базується на моделі інституціонального розвитку path dependence (залежність від минулого з привнесенням деяких нових елементів):

$$x(t + 1) = P \cdot x(t),$$

де  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор кількості індивідів у суспільстві, що ведуть  $i$ -й спосіб життя, із загальної кількості, що дорівнює  $n$ ;  $P = [P_{ij}]$  – матриця ймовірностей переходів від одного способу життя до іншого, які здійснюють індивіди за певний, прийнятий за одиницю, інтервал часу. Рівняння марківського ланцюга, що описує еволюцію образів життя у В.Л.Макарова, для оцінки дифузії технологічних інновацій можна трактувати наступним чином:  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор, що задає характеристики набору технологій системи, яка оцінюється;  $P = [P_{ij}]$  – матриця оцінок ймовірностей зміни характеристик. Точність одержаних оцінок при використанні даного підходу буде визначатися адекватністю виділення образів життя, способами віднесення індивіда до того чи іншого "образу" для отримання початкової точки еволюції, методиками отримання матриці ймовірностей та оцінки цих ймовірностей. Складність та невизначеність названих моментів є серйозним ускладненням для використання даного підходу.

Життєвий цикл кожного технологічного укладу [17] триває в середньому близько 100 років. Він охоплює життєві цикли технологій, кож-

ний із яких має свою тривалість. Детальні дослідження [17] показали, що життєвий цикл технології за час свого існування зазнає два підйоми, дві висхідні хвилі. Перша з них припадає на початок розвитку технологічного укладу і обумовлена технологічними, внутрішніми чинниками, викликаними закономірностями пропозиції нових технологій, коли даний уклад прокладає собі дорогу в чужорідному соціально-економічному середовищі. Другий підйом припадає на початок другої половини життєвого циклу, коли економічні відносини в суспільстві вже трансформувалися в достатній мірі, щоб сприйняти технологічні нововведення, запропоновані цим укладом. Цей підйом обумовлений не технологічними, а економічними причинами, зовнішніми по відношенню до розвитку технологічної основи виробництва, і відображає готовність суспільства до впровадження відповідних інновацій і закономірне зростання суспільного попиту на них.

Зазначені два підйоми у розвитку технологічних укладів – ендогенний і екзогенний – в цілому відображають кількісну динаміку самих різних поступально-циклічних процесів. Модель кількісної динаміки технологічних укладів, яка носить назву гіпотези Грублера-Фетисова, дозволяє з достатньою точністю прогнозувати наступ перехідних і кризових періодів у розвитку техніко-економічних макросистем і окремих технологій.

Узагальнення моделі Басса (1) у вигляді узагальної логістичної кривої [18] і з урахуванням перелічених в [5] недоліків дозволило сформулювати [19, 20] математичну модель (2) циклічного розвитку фотоелектричних систем на прикладі Німеччини:

$$N_{sum}(t) = N(t) + \sum_{n=1}^3 K_{\text{c\u00e4\u00e4\u00e4}}(t) \times \left( p + \frac{q}{M} N(t) \right) (M - N(t)). \quad (2)$$

В моделі (2) у явному вигляді використовується  $K_{\text{зв\u00e9\u00e9}}(t)$  – зведений коефіцієнт економічних і технологічних факторів, розрахований для кожного моменту  $t$  за наступною формулою:

$$K_{\text{зв\u00e9\u00e9}}(t) = \frac{KKC(t) \cdot KKД(t)}{KKB(t)},$$

де  $KKC(t)$  – коефіцієнт купівельної спроможності регіону, для якого розраховується сценарій розвитку інноваційної технології на момент  $t$ ;  $KKД(t)$  – коефіцієнт корисної дії фотоелектричних систем генерації;  $KKВ(t)$  – коефіцієнт середньої кінцевої вартості фотоелектричної системи генерації для споживача [22]. На рис. 2 наведено порівнянню відому та прогнозовану динаміку економічних і технологічних коефіцієнтів для Німеччини та України.

$N(t)$  в моделі (2) – сумарна встановлена потужність систем фотоелектричної генерації на момент  $t$ . У свою чергу, щорічна встановлена потужність систем фотоелектричної генерації далі позначена як  $\Delta N(t)$ .

Аналіз експертної прогнозу інформації [22, 23] про цикли розвитку світової економіки, частиною якої є енергетика, і, зокрема, фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії (фотовольтаїка), дає підстави запропонувати наступні прогнози подальшого розвитку цього технологічного тренду.

Як було зазначено вище, модель (2) розглянуто у вигляді узагальненої логістичної кривої. Перша частина якої, у відповідності з гіпотезою Грублера-Фетисова, має два підйоми і включає в

себе два цикли тривалістю 16 та 15 років. Друга частина включає третій цикл тривалістю 19 років. Підставою для включення в модель третього циклу є припущення про появу або доведення до комерційного рівня до того часу більш сучасних технологічних рішень.

Модель розвитку генеруючих потужностей фотоелектричної галузі Німеччини запропоновано у вигляді узагальненої логістичної кривої, що є сумою трьох логістичних кривих із цільовими значеннями  $M_1(T_1)$ ,  $M_2(T_2)$ ,  $M_3(T_3)$  – максимальної можливої встановленої потужності, що мають бути досягнуті у  $T_1 = 2016$ ,  $T_2 = 2031$ ,  $T_3 = 2050$  роках відповідно. Відомі значення встановленої потужності  $N(t)$  в діапазоні  $t = 1, \dots, \tau$  (де  $\tau = 2015$ ) для Німеччини [22, 23] та планові значення  $M_1(2016) = 40$  ГВт,  $M_2(2031) = 78$  ГВт,  $M_3(2050) = 120$  ГВт. Використовуючи метод найменших квадратів, вирішено задачу мінімізації відхилення логістичної кривої від відомих статистичних значень, за результатом отримані оцінки для параметрів  $p_1, q_1$  в діапазоні  $t = 1, \dots, \tau$  для Німеччини. Прогнозні значення щорічної  $\Delta N(t)$  та сумарної встановленої потужності  $N_{sum}(t)$  в діапазоні  $t = 1, \dots, T$  розраховані за формулою динамічної моделі розвитку (2) та представлені на рис. 3.

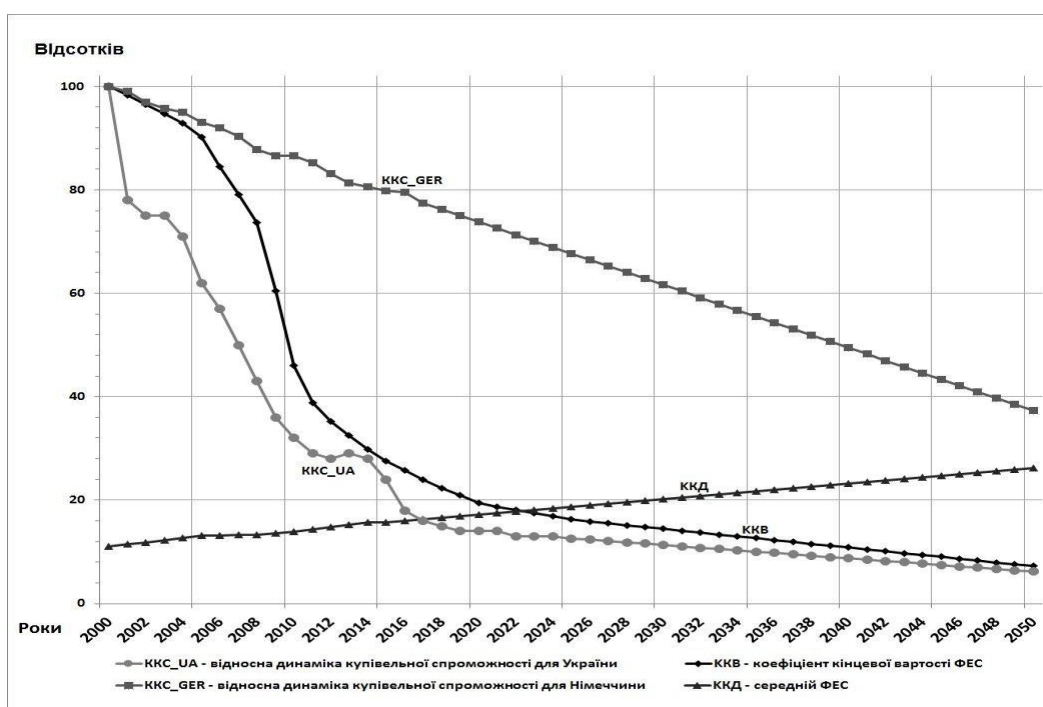


Рис. 2. Порівнянню динаміка економічних і технологічних коефіцієнтів для Німеччини та України.

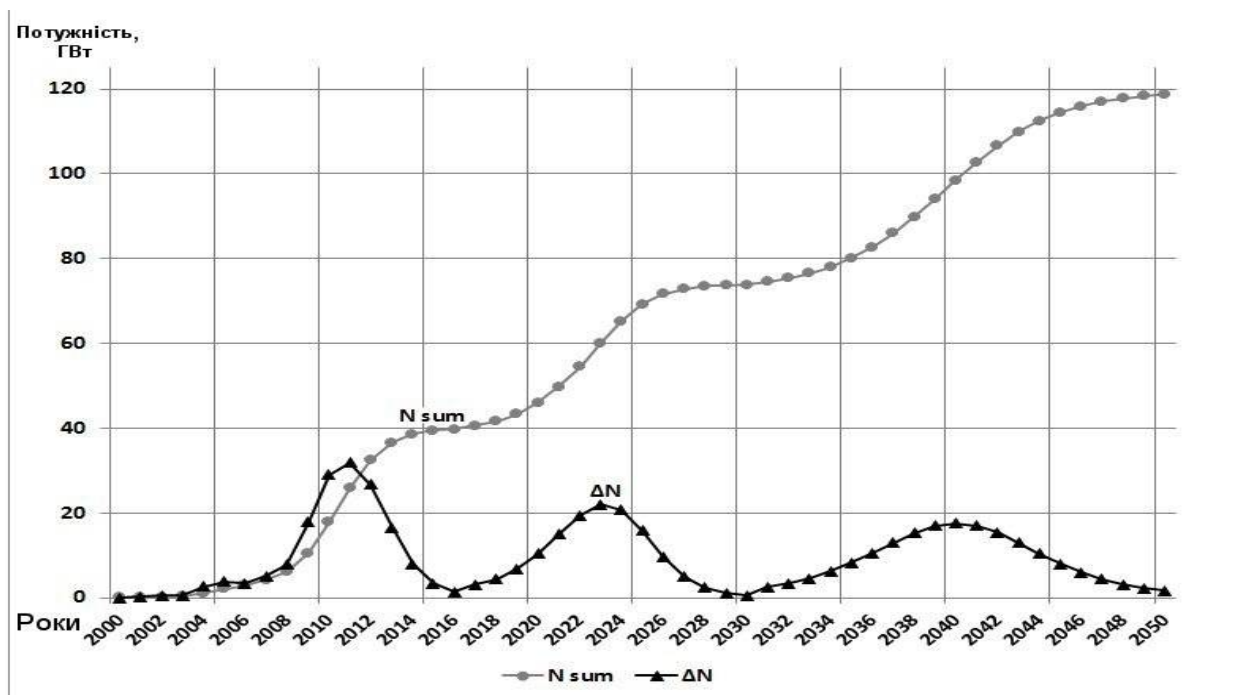


Рис. 3. Прогнозні значення щорічної  $\Delta N(t)$  та сумарної  $N_{sum}(t)$  встановленої потужності систем фотоелектричної генерації для Німеччини.

Гарна відповідність значень, розрахованих за допомогою моделі (2), і реальних статистичних даних дає підставу для використання цієї моделі при прогнозуванні розвитку та розповсюдження технології фотоелектричної генерації серед домогосподарств в Україні.

Прогнозні значення щорічної  $\Delta N(t)$  та сумарної  $N_{sum}(t)$  встановленої потужності систем фотоелектричної генерації для домогосподарств України розраховані з використанням наступної вихідної інформації.

Аналітичні та статистичні дані [24–26] дозволили визначити обсяги встановленої потужності  $N(t)$  в діапазоні  $t = 1, \dots, \tau$  для домогоспо-

дарств України та планові значення  $M_1(2016) = 0,6$  ГВт,  $M_2(2031) = 1,1$  ГВт,  $M_3(2050) = 1,7$  ГВт. Використовуючи метод найменших квадратів, вирішено задачу мінімізації відхилення логістичної кривої  $N_{sum}(t)$  в діапазоні  $t = 1, \dots, \tau$  для домогосподарств України від відомих статистичних значень  $UKR_{cmam}(t)$  у цьому ж діапазоні. За результатом отримані оцінки для параметрів  $p_1, q_1$  в діапазоні  $t = 1, \dots, \tau$  для домогосподарств України. Прогнозні значення щорічної  $\Delta N(t)$  та сумарної встановленої потужності  $N_{sum}(t)$  в діапазоні  $t = 1, \dots, T$  розраховані за формулою динамічної моделі розвитку (2) і представлені в таблиці 1 та на рис. 4.

Таблиця 1. Динаміка економічних та технологічних індикаторів

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
$ККС_{UA}, \%$	100	62	32	24	14	12,6	11,3	10,0	8,7	7,5	6,2
$ККВ, \%$	100	90,2	46,0	27,5	19,5	16,2	14,4	12,6	10,8	9,0	7,2
$ККД, \%$	11,0	13,2	13,9	15,7	17,2	18,7	20,2	21,7	23,2	24,7	26,3
$K_{seo}$	9,9	8,2	8,7	12,4	11,2	13,1	14,3	15,6	16,9	18,5	20,3
$UKR_{cmam}, \text{ГВт}$	0,01	0,07	0,4	0,57							
$N_{sum}, \text{ГВт}$	0,01	0,05	0,33	0,57	0,59	0,84	1,13	1,19	1,53	1,70	1,70
$\Delta N, \text{ГВт}$	0	0,02	0,08	0	0,01	0,10	0	0,02	0,1	0	0

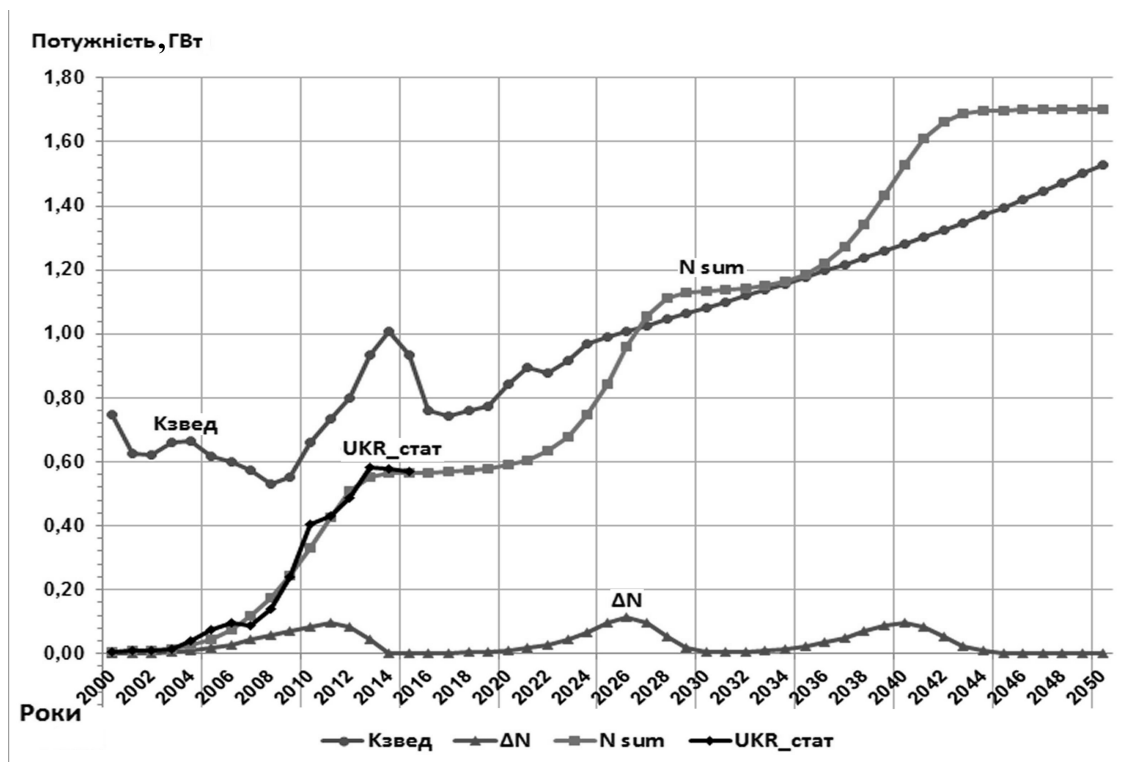


Рис. 4. Прогнозні значення щорічної  $\Delta N(t)$  та сумарної  $N_{sum}(t)$  встановленої потужності систем фотоелектричної генерації для домогосподарств України.

**Висновки.** 1. Системи енергетики є окремим випадком великих систем, розвитку яких присвячено і постійно присвячується багато наукових досліджень. Аналіз останніх приводить до висновку про існування закономірностей розвитку економічних процесів і непередбачуваних відхилень від звичного ходу подій, тобто невизначеності.

2. Теорія економічних циклів або теорія кон'юнктури, що пояснює причини коливань економічної активності суспільства у часі, є одним із основних теоретичних напрямів, на яких базується прогнозування розвитку складних економічних, а отже і енергетичних систем.

3. В статті запропоновано модель циклічного розвитку фотоелектричних систем генерації у вигляді узагальненої логістичної кривої. Перша частина кривої, у відповідності з гіпотезою Грублера-Фетисова, має два підйоми і включає в себе два цикли тривалістю 16 та 15 років. Друга частина включає третій цикл тривалістю 19 років. Підставою для узагальнення моделі та включення до неї третього циклу є припущення про появу або доведення до комерційного рівня до того часу більш сучасних технологічних рішень.

4. Виконані розрахунки за цією моделлю, відповідно до вхідних даних та припущень, що наведені у статті, підтверджують хорошу відповідність значень, розрахованих за допомогою моделі з реальними статистичними даними, що дало підставу для використання цієї моделі при прогнозуванні розвитку та розповсюдження технології фотоелектричної генерації серед домогосподарств в Україні.

5. Запропонована модель циклічного розвитку фотоелектричних систем генерації у вигляді узагальненої логістичної кривої може використовуватись як основа для побудови більш складних моделей з декількома технологічними трендами, що здатні охоплювати не лише відновлювану енергетику, але й електроенергетику в цілому.

1. Цветков В.А. Циклы и кризисы: теоретико-методологический аспект // Нестор-История. Москва Санкт-Петербург. – 2012.

2. Денисов В.А. Модель складної динамічної керованої системи із заздалегідь заданою ієрархічною структурою // Сучасна наука: теорія і практика. –Запоріжжя. – 2012.

3. Viktor Denisov. Dynamic models for developing reference scenarios of energy system // Сборник научных статей. Техника и технология. Современные тенденции в науке и образовании. – Краков. – 2016. – С. 21–24.

4. Кондратьев Н.Д. Проблемы экономической динамики. М.: Экономика, – 1989. – 523 с.
5. Arkadiusz KIJEK, Tomasz KIJEK, MODELLING OF INNOVATION DIFFUSION / OPERATIONS RESEARCH AND DECISIONS No. 3–4 2010 . / [Электронный ресурс]. Режим доступа: [InnovationDiffusionMathModelling.pdf](#).
6. MAHAJAN V., PETERSON R.A., Models for innovation diffusion, CA, Sage Publications, Beverly Hills, 1985.
7. FOURT L.A., WOODLOCK J.W., Early Prediction of Market Success for Grocery Products, Journal of Marketing, 1960, 25 (October), 31–38.
8. MANSFIELD E., Technical change and the rate of imitation, Econometrica, 1961, 29 (4), 741–766.
9. LINSTONE H.A., SAHAL D., Technological Substitution, Elsevier, New York, 1976.
10. MARTINO J., Technological forecasting for decision making, Elsevier, New York, 1983.
11. BASS F.M., A New Product Growth Model for Consumer Durables, Management Science, – 1969.
12. HALL B., Innovation and diffusions, NBER Working Paper 10212, Cambridge, 2004.
13. ROMER P., Increasing returns and long-run growth, Journal of Political Economy, 1986, 94 (5), 1002–1037.
14. Rogers, Everett M., Diffusion of Innovations, New York, Free Press of Glencoe, –1962.
15. Меньшиков С. М., Клименко Л. А. Длинные волны в экономике. Когда общество меняет кожу // М.: Междунар. Отношения. – 1989. – 272 с.
16. Макаров В.Л. Экономика знаний: уроки для России // Вестник российской академии наук. – 2003. – Т. 73, № 5. – 450 с.
17. Нижегородцев Р.М. Модели логистической динамики как инструмент экономического анализа и прогнозирования // Моделирование экономической динамики: риск, оптимизация, прогнозирование. – М., 1997. – С. 34–51.
18. Постан М.Я. Обобщенная логистическая кривая: ее свойства и оценка параметров // Экономика и математические методы, – 1993. – Т.29, вып. 2 – С. 305–310.
19. Viktor Denisov. The logistics models of the life cycle of photovoltaic power generation systems // Сборник научных статей. Техника и технология. Теоретические и практические аспекты развития современной науки. – Ченстохова. – 2016. – С. 27–31.
20. Viktor Denisov. Dynamic models of the cyclical development photovoltaic generation systems // Сборник научных статей. Техника и технология. Научные достижения, наработки, предложения. – Варшава.: "Diamond trading tour". – 2016. – С. 32–35.
21. Viktor Denisov. Capacity development household solar PV in Ukraine // Сборник научных статей. Техника и технология. Научные достижения, наработки, предложения. – Варшава.: "Diamond trading tour". – 2016. – С. 36–38.
22. Dr. Harry Wirth. Recent Facts about Photovoltaics in Germany // Fraunhofer ISE. – 2015. p. 89.
23. The International Renewable Energy Agency (IRENA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/](#).
24. Энергетична галузь України: підсумки 2015 року // – Заповіт. – 2016, 71 с.
25. Bureau of Statistics. Electronic resource: [https://www.statbureau.org/](#).
26. Державна служба статистики України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.ukrstat.gov.ua](#).

## REFERENCES

1. Tsvetkov, V.A. (2012). *Tsikly i krizisy: teoretiko-metodologicheskyy aspekt*. Nestor-Istoria. Moscow Sankt-Peterburg. [in Russian].
2. Denisov, V.A. (2012). *Model skladnoi dinamichnoi kerovanoi systemy iz zazdalegid zadanoiu ierarkhichnoiu strukturoiu*. Zapozhzhia. Suchasna nauka: teoria i praktika. [in Ukrainian].
3. Viktor Denisov. *Dynamic models for developing reference scenarios of energy system*. Sbornik nauchnykh statei. Tehnika i tehnologia. Sovremennye tendencii v nauke i obrazovanii. Krakow. 2016. [in English].
4. Kondratjev, N.D. (1989). *Problemy ekonomicheskoi dinamiki*. Moscow.: Ekonomika. [in Russian].
5. Arkadiusz KIJEK, Tomasz KIJEK, *Modelling of innovation diffusion*. Operations research and decisions No. 3–4 2010 . [in English].
6. MAHAJAN V., PETERSON R.A., *Models for innovation diffusion*, CA, Sage Publications, Beverly Hills, 1985. [in English].
7. FOURT L.A., WOODLOCK J.W., *Early Prediction of Market Success for Grocery Products*, Journal of Marketing, 1960, 25 (October), 31–38. [in English].
8. MANSFIELD E., *Technical change and the rate of imitation*, Econometrica, 1961, 29 (4), 741–766. [in English].
9. LINSTONE H.A., SAHAL D., *Technological Substitution*, Elsevier, New York, 1976. [in English].
10. MARTINO J., *Technological forecasting for decision making*, Elsevier, New York, 1983. [in English].
11. BASS F.M., *A New Product Growth Model for Consumer Durables*, Management Science, – 1969. [in English].
12. HALL B., *Innovation and diffusions*, NBER Working Paper 10212, Cambridge, 2004. [in English].
13. ROMER P., *Increasing returns and long-run growth*, Journal of Political Economy, 1986, 94 (5), 1002–1037. [in English].
14. Rogers, Everett M., *Diffusion of Innovations*, New York, Free Press of Glencoe, 1962. [in English].
15. Menshikov, S.M., Klimenko L.A. (1989). *Dlinnye volny v ekonomike. Kogda obshchestvo meniaet kogu*. Moscow.: Megdunarodnye Otnoshenia. [in Russian].
16. Makarov V.L. (2003). *Ekonomika znanii: uroki dlia Rossii*. Vestnik rossiiskoi akademii nauk. [in Russian].
17. Nizhegorodcev R.M. (1997). *Modeli logisticheskoi dinamiki kak instrument ekonomicheskogo analiza i prognozirova-*

nia. *Modelirovanie ekonomicheskoi dinamiki: risk, optimizatsiia, prognozirovanie*. Moscow. [in Russian].

18. Postan M.J. (1993). *Obobshchennaia logisticheskaia krivaiia: yeie svoistva i otsenka parametrov*. *Ekonomika i matematicheskie metody*. [in Russian].

19. Viktor Denisov. (2016). *The logistics models of the life cycle of photovoltaic power generation systems*. *Sbornik nauchnykh statei. Tekhnika i tekhnologiya. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty razvitiia sovremennoi nauki. Chenshtokhova*. [in English].

20. Viktor Denisov. (2016) *Dynamic models of the cyclical development photovoltaic generation systems*. *Sbornik nauchnykh statei. Tekhnika i tekhnologiya. Nauchnie dostigeniia, narabotki, predlogeniia*. Warsaw. Diamond trading tour. [in English].

21. Viktor Denisov. (2016) *Capacity development household solar PV in Ukraine*. *Sbornik nauchnykh statei. Tekhnika i tekhnologiya. Nauchnie dostigeniia, narabotki, predlogeniia*. Warsaw. Diamond trading tour. [in English].

22. Dr. Harry Wirth. *Recent Facts about Photovoltaics in Germany*. Fraunhofer ISE. – 2015. p. 89. [in English].

23. The International Renewable Energy Agency (IRENA). (2014). Retrieved from: [www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/). [in English].

24. Energetichna galuz Ukrainy: pidsumky 2015 roku. *Zapovit*. 2016. [in Ukrainian].

25. Bureau of Statistics. Electronic resource: <https://www.statbureau.org/>. [in English].

26. Derzhavna sluzhba statistiky Ukrainy. Retrieved from: <https://www.ukrstat.gov.ua/>. [in Ukrainian].

**В.А.Денисов** (Институт общей энергетики НАН Украины, Киев)

#### **Динамические модели циклического развития систем фотоэлектрической генерации**

*Предложена модель циклического развития установленных мощностей фотоэлектрических систем генерации в виде обобщенной логистической кривой. Соответствие значений, рассчитанных с помощью модели, реальным статистическим данным послужило основанием для использования этой модели при прогнозировании развития и распростра-*

*нения технологии фотоэлектрической генерации среди домохозяйств Украины. Библ. 26, табл. 1, рис. 4.*

**Ключевые слова:** инновационные технологии, математическая модель, возобновляемая энергетика, сценарий распространения.

**Denisov V.** (Institute of General Energy of NAS of Ukraine, Kyiv)

#### **Dynamic models of cyclic development of photovoltaic power generation systems**

*The model of cyclic development of installed capacity of photovoltaic generation systems in the form of a generalized logistic curve.*

*Compliance of the values, calculated using the model, to real data was the basis for the model using for the predicting development and dissemination of technology photovoltaic power generation among households in Ukraine. References 26, table 1, figures 4.*

**Keywords:** innovative technologies, mathematical model, renewable energy, distribution scenario.

#### SYNOPSIS

Principles of modeling of the introduction and development of the photovoltaic power generation innovative technologies in renewable energy systems. Based on the analysis, evaluation and development of famous models, the dynamic model of adoption and development, in the form of the generalized logistic curves, that takes into account the cyclical nature of processes, is proposed. To account economic and technological factors – the ratio of purchasing power of the region for which the calculated scenario of development of innovative technologies, efficiency of the photovoltaic generation system; average final cost of PV system generation for user – proposed consolidated rate.

The results of calculations allow us to recommend the proposed model of cyclic development of photovoltaic generation systems in the form of a generalized logistic curve as a basis for building more complex models with several technological trends, which are able to cover not only renewable energy but electricity as a whole.

Стаття надійшла до редакції 14.12.16

Остаточна версія 16.02.17