

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2018, 3(54): 5–9
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2018.03.005>

УДК 004.942:621.311

Т.П. НЕЧАЄВА, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

МОДЕЛЬ ТА СТРУКТУРА ДОВГОСТРОКОВОГО РОЗВИТКУ ГЕНЕРУЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ ВВОДУ-ВИБУТТЯ ПОТУЖНОСТЕЙ ТА ЗМІНИ ЇХ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

В статті наведено опис частково-цілочисельної математичної моделі довгострокового розвитку структури генеруючих потужностей електроенергетичної системи. Для врахування динаміки введення-вибуття нових потужностей протягом прогнозного періоду в моделі використовуються змінні кількості введених за етап одиничних установок та змінні загальної кількості нових установок, доступних до використання в етапі, при формуванні яких враховуються тільки ті введені на попередніх етапах нові установки, термін експлуатації яких ще не закінчився. В моделі також введені обмеження на доступність нових технологій на початкових етапах горизонту прогнозування, а також на прийнятність тільки тих, які будуть введені в експлуатацію до кінцевого етапу прогнозування. При визначенні середньозважених вартостей виробництва електроенергії для нових установок, що оптимізуються у моделі, враховано зміни їх техніко-економічних показників у часі та відповідні значення на етапі введення технології в експлуатацію.

Ключові слова: перспективна структура генеруючих потужностей, електроенергетична система, математична модель, середньозважена вартість виробництва електроенергії.

Дослідження перспективного розвитку структури генеруючих потужностей електроенергетичної системи (ЕЕС) протягом прогнозного горизонту, тривалість якого може перевищувати терміни експлуатації як існуючих на початковому етапі прогнозування, так введених у цей період нових технологій генерації електроенергії, потребує врахування динаміки введення-вибуття потужностей. Для цього найбільш доцільним є представлення кожного типу технологій генерації, що розглядаються в моделі прогнозування розвитку структури генеруючих потужностей ЕЕС, одиничною установкою (енергоблоком) та цілочисельними змінними – їх кількостями.

Врахування динаміки введення-вибуття потужностей, в тому числі на початковому та кінцевому етапах горизонту прогнозування, було проведено С.В. Шульженком [1] у динамічній

частково-цілочисельній моделі математичного програмування розвитку генеруючих потужностей атомної енергетики, яку було розроблено для визначення оптимальної перспективної структури атомної енергетики за критерієм мінімуму витрат на спорудження нових атомних енергоблоків. У цій моделі змінними є кількості нових атомних енергоблоків заданої одиничної потужності. Для забезпечення балансу покриття певного рівня навантаження для атомної генерації у моделі було введено так звану «штрафну» змінну, яка у критерії оптимізації враховується з певним наперед визначеним коефіцієнтом.

Для подолання необхідності використання штрафної змінної і забезпечення балансу покриття графіків електричного навантаження (ГЕН) енергосистеми модель прогнозування розвитку структури генеруючих потужностей ЕЕС було удосконалено за рахунок поєднання використання

© Т.П. НЕЧАЄВА, 2018

як цілочисельних змінних кількості нових установок одиничної потужності для моделювання динаміки введення-вибуття потужностей, так і нецілочисельних змінних потужностей, що використовуються при покритті ГЕН енергосистеми для забезпечення балансу, опис якої наведено у цій статті.

Врахування динаміки введення-вибуття генеруючих потужностей при прогнозуванні на глибоку перспективу, а саме, часового лагу, необхідного для їх будівництва та введення в роботу, необхідності заміщення після закінчення терміну експлуатації та можливості введення до кінцевого етапу горизонту прогнозування тільки тих нових установок, будівництво яких буде завершено, проведено з використанням викладених в [1] підходів.

Виходячи з представлення генеруючих установок їх кількістю та потужністю, встановлені потужності нових технологій, введені в етапі t , є добутком цілочисельної змінної X_{nt}^N кількості введених в етап t потужностей типу n з множини нових установок різних типів N , що розглядаються в моделі, і відповідної потужності одиничної установки P_n . Протягом періоду з початку горизонту прогнозування до етапу прогнозованої доступності на ринку нової технології, а також наступних етапів її будівництва та введення в експлуатацію така потужність є недоступною для використання у моделі. У наступні етапи загальна кількість введених за етап одиниць нових потужностей обмежується певною величиною, обумовленою виробничими потужностями з виготовлення основного обладнання, наявністю майданчиків і ресурсів для будівництва, можливістю одночасного спорудження тощо, що задається обмеженням:

$$X_{nt}^N \leq \begin{cases} 0, & \text{якщо } t \leq T_n^a + T_n^c \\ V_{nt}, & \text{якщо } t > T_n^a + T_n^c \end{cases}, \quad \forall t = 1 \div T, n \in N, \quad (1)$$

де V_{nt} – загальна кількість одиниць нових потужностей типу n , які можуть бути введені у етапі t , T_n^a – етап прогнозованої комерційної доступності нової технології типу n , T_n^c – термін її будівництва.

Обсяги введення нових установок регулюються в тому числі за рахунок застосування інвестиційних обмежень, доступні обсяги яких задаються для кожного етапу прогнозування. При цьому капіталовкладення в одиничну установку розподіляються пропорційно тривалості етапів будівництва [1], а інвестиційні ресурси у нові потужності, що будуть введені за останнім етапом горизонту, не вкладаються, що формалізується сукупністю наступних обмежень:

$$I_t \geq \begin{cases} \sum_{n \in N} \sum_{i=t+1}^{t+T_n^c} X_{ni}^N \frac{C_{ni}^K P_n}{T_n^c}, & \text{якщо } t + T_n^c < T, \\ \sum_{n \in N} X_{n,t+1}^N \frac{C_{nt}^K P_n}{T_n^c}, & \text{якщо } t + 1 = T, \\ \sum_{n \in N} \sum_{i=t+1}^T X_{ni}^N \frac{C_{ni}^K P_n}{T_n^c}, & \text{якщо } t + T_n^c \geq T, \end{cases} \quad (2)$$

де C_{nt}^K – обсяг питомих капіталовкладень в будівництво нової потужності типу n , введеної в експлуатацію на етапі t , I_t – загальний обсяг доступних інвестицій для будівництва нових генеруючих потужностей на етапі моделювання t ; T – останній етап моделювання. Питомі капіталовкладення у нову потужність, введена в етап t , визначаються за допомогою заданих функціональних залежностей зміни питомих капіталовкладень у часі $f(C_n^K(t))$.

Змінна загальної кількості доступних до використання нових потужностей типу n на етапі t враховує динаміку вводу-виводу нових потужностей протягом горизонту прогнозування і складається з кількості усіх нових установок, введених в експлуатацію за всі попередні етапи до поточного етапу включно, за винятком тих, у яких завершився термін експлуатації, що описується сукупністю наступних рівнянь:

$$X_{nt} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t \leq T_n^a + T_n^c \\ \sum_{i=T_n^a+T_n^c+1}^t X_{ni}^N, & \text{якщо } T_n^a + T_n^c < t \leq T_n^a + T_n^c + T_n^o, \\ \sum_{i=t-T_n^o+1}^t X_{ni}^N, & \text{якщо } t > T_n^a + T_n^c + T_n^o \end{cases}, \quad t = 1 \div T, \forall n \in N, \quad (3)$$

де T_n^o – термін експлуатації нової потужності типу n .

Для врахування участі потужностей в балансах покриття ГЕН у моделі застосовується нецілочисельна змінна загальної потужності нових генеруючих установок типу n на етапі t , що фактично використовується при покритті характерного графіка електричних навантажень, яка обмежується загальною встановленою потужністю таких установок з урахуванням їх готовності до несення навантаження та необхідності забезпечення певного мінімального рівня навантаження:

$$d_{nst}^{MN} X_{nt} P_n \leq Y_{nszt} \leq d_{nst}^{MX} X_{nt} P_n, \quad \forall t = 1 \div T, s \in S, z \in Z, \quad (4)$$

де Y_{nszt} – змінна загальної потужності нових генеруючих установок типу n на етапі t , що фактично використовується при покритті z зони доби s се-

зону ГЕН; S – характерні сезони, Z – зони доби ГЕН; d_{nst}^{MN} – коефіцієнт, який враховує мінімально допустимий рівень розвантаження потужності, $0 \leq d_{nst}^{MN} < 1$, d_{nst}^{MX} – коефіцієнт, який враховує доступність та готовність встановленої потужності до несення навантаження, $0 < d_{nst}^{MX} \leq 1$.

Існуючі установки типу e з множини E існуючих на початковому етапі прогнозування потужностей також представлені в моделі їх одиничною потужністю P_e та наперед визначеним параметром кількості одиниць існуючих установок N_{et} , що залишаються в експлуатації на етапі t , який враховує динаміку вибуття існуючих установок після закінчення терміну їх експлуатації, тривалість роботи у понадпроектний термін, а також обмеження експлуатації внаслідок виконання прийнятих зобов'язань. У балансі покриття ГЕН існуючі установки типу e представлені змінною Y_{eszt} їх загальної потужності, яка обмежується їх загальною встановленою потужністю аналогічно до формули (4):

$$d_{est}^{MN} N_{et} P_e \leq Y_{eszt} \leq d_{est}^{MX} N_{et} P_e, \quad \forall t = 1 \div T, s \in S, z \in Z. \quad (5)$$

Баланси покриття характерних графіків електричного навантаження у моделі мають наступний вигляд:

$$\sum_{n \in N} \sum_{f \in F} a_{nsfz} Y_{nsfzt} + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} a_{esfz} Y_{esfzt} = D_{szt}, \quad \forall t = 1 \div T, z \in Z, s \in S \quad (6)$$

де a_{nsfz} , a_{esfz} – коефіцієнти, які враховують можливі рівні та режими f використання встановленої потужності нових та існуючих технологій відповідно у зоні z добового графіка електричного навантаження сезону s , D_{szt} – прогнозний рівень навантаження зони z у сезоні s характерного добового ГЕН.

Критерієм оптимального розвитку структури генеруючих потужностей енергетичної системи на глибоку перспективу є мінімізація загальних витрат нових генеруючих установок, а також експлуатаційних витрат існуючих потужностей при покритті заданих графіків електричних навантажень. Зазвичай такий критерій формується з використанням двох складових витрат [2]. До першої складової відносяться постійні витрати, необхідні для впровадження та функціонування генеруючих потужностей, питома значення яких розраховується по відношенню до встановленої електричної потужності. До другої складової входять змінні експлуатаційні витрати при участі електростанції в покритті графіку електричних навантажень, питома значення яких розраховується по відношенню до обсягів виробленої електро-

енергії. Використання показників середньозважених за життєвий цикл витрат на виробництво електроенергії нових установок та цілочисельних змінних їх кількості приводить до наступного вигляду цільової функції:

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{n \in N} \left(C_{nt}^c X_{nt} P_n + \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{z \in Z} C_{nsfzt}^v Y_{nsfzt} H_{szt} \delta_{zt} \right) + \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{z \in Z} C_{esfzt}^v Y_{esfzt} H_{szt} \delta_{zt} \right] \rightarrow \min, \quad (7)$$

де C_{np}^c – середньозважена складова умовно-постійних витрат на виробництво електроенергії на одиницю потужності, C_{nsfzt}^v , C_{esfzt}^v – середньозважені складові умовно-змінних експлуатаційних витрат на одиницю виробленої електроенергії нових технологій типу n та існуючих типу e відповідно, приведені до початкового етапу роботи установки.

З урахуванням етапу введення нової технології, початкових параметрів та динаміки змін складових витрат у часі протягом горизонту прогнозування формула розрахунку середньозваженої вартості виробництва електроенергії за життєвий цикл приймає наступний вигляд:

$$C_{nf}^{LC}(t) = \sum_{\tau=1}^{T_n^c} \frac{C_n^K(t)}{T_n^c (1+r)^{T_n^c+1-\tau}} + \sum_{\tau=T_n^c+1}^{T_n^c+T_n^a} \frac{C_n^M(t)}{(1+r)^{\tau-T_n^c-1}} + \sum_{\tau=t}^{t+T_n^c} \frac{C_{nfr}^V(f(C_{\tau-t}^F, C^F(t)), f(C_{\tau-t}^E, C^E(t)))}{(1+r)^{\tau-T_n^c-1}}, \quad T_n^a + T_n^c < t \leq T, \quad (8)$$

де $C_{nf}^{LC}(t)$ – середньозважена вартість виробництва електроенергії за життєвий цикл нової установки, працюючої в режимі f , приведена до етапу t введення її в експлуатацію; τ – етап життєвого циклу технології; $C_n^M(t)$ – постійні витрати для підтримки виробничих потужностей в працездатному стані протягом періоду експлуатації, які визначаються в залежності від обсягів капітальних вкладень; $C_{nfr}^V(C_{\tau-t}^F, C_{\tau-t}^E(t))$ – змінні витрати в залежності від режиму експлуатації f : витрати на паливо та матеріали, екологічні платежі, які визначаються в залежності від ціни на паливо $C_{\tau-t}^F$ та екологічних ставок $C_{\tau-t}^E$ на початковому етапі експлуатації технології та їх подальшими змінами протягом періоду експлуатації за функціональними залежностями $f(C^F(t))$, $f(C^E(t))$. Перші дві складові формули (8) є умовно-постійними витратами, остання складова формує умовно-змінні витрати, значення яких використовуються у цільовій функції (7).

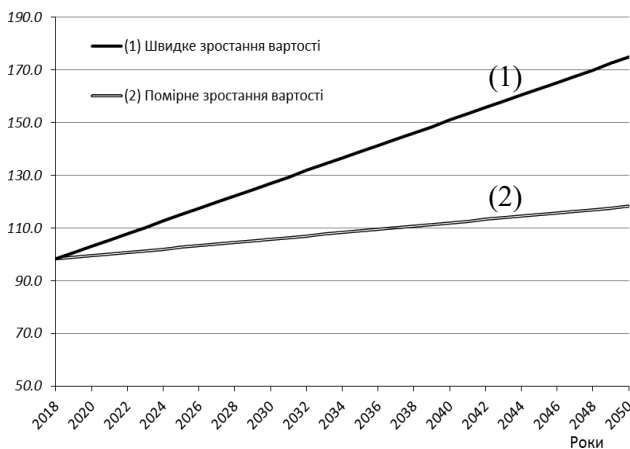
Реалізацію моделі на мові GNU MathProg з використанням оптимізаційного пакету GLPK [3]

Таблиця 1 – Техніко-економічні характеристики нових установок

Тип потужності	Потужність установки, МВт	Питомі капіталовкладення на початковому етапі, \$/кВт	Питомі капіталовкладення на кінцевому етапі, \$/кВт	Термін будівництва, років	Термін експлуатації, років
СЕС дахова фотоелектрична	0,5	1450	700	1	20
СЕС промислова фотоелектрична	5	1400	600	1	20
ВЕС	30	1500	800	2	20
ТЕС вугільна	300	2200	2700	6	40
АЕС	1000	5000	6000	8	60
ТЕС на природному газі	50	800	1000	2	20
ГЕС	60	2000	2500	8	100

проведено з використанням вхідних даних щодо характеристик нових установок (табл. 1) для прогнозного горизонту тривалістю 50 років (етапів). При цьому питомі капіталовкладення у нові потужності протягом цього періоду змінюються лінійно, і технології вважаються доступними вже на першому етапі прогнозування.

Для вугільних нових ТЕС розглядалися два варіанти зміни вартості палива: швидке (1) і помірне (2) зростання, які задані лінійними функціональними залежностями (рис. 1).

**Рисунок 1.** Вартість вугілля для ТЕС, \$/т у.п

Ці дані було використано для розрахунку середньзваженої собівартості виробництва електроенергії для вугільних ТЕС з використанням формули (8), результати якого наведено у табл. 2.

Результати модельних розрахунків динамічної структури генеруючих потужностей для двох варіантів динаміки зміни вартості вугілля за умови обмеження інвестиційних ресурсів на рівні 8 млн. \$ за етап (рік) наведено у табл. 3 і 4.

ВИСНОВКИ

Удосконалення математичної моделі довгострокового розвитку структури генеруючих потужностей електроенергетичної системи з використанням цілочисельних змінних кількості нових установок, введених за етап, та загальної кількості доступних до використання в етапі нових установок дозволяє дослідити динаміку введення-вибуття потужностей з урахуванням етапу вводу в експлуатації та тривалості роботи, зміни у часі їх техніко-економічних показників за умови мінімізації загальних середньзважених витрат на виробництво електроенергії протягом життєвого циклу нових потужностей, приведених на початок їх введення в роботу. Для забезпечення уникнення небалансів покриття характерних графіків електричного навантаження доцільно введення

Таблиця 2 – Результати розрахунку середньзваженої собівартості виробництва електроенергії вугільної ТЕС

Етапи		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Вартість вугілля, \$/т у.п	1	103,1	115,0	127,0	139,0	150,9	162,9	174,8
	2	99,51	102,63	105,75	108,87	111,98	115,1	118,22
Питомі капіталовкладення, \$/кВт		2220,4	2271,4	2322,5	2373,5	2424,5	2475,5	2526,5
Середньзважена собівартість, \$/МВт год	1	179,5	184,8	190,0	195,2	200,4	205,7	210,9
	2	169,9	172,3	174,7	177,1	179,6	182,0	184,4

Таблиця 3 – Структура генеруючих потужностей енергосистеми при швидкому збільшенні вартості вугілля

Показник	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Необхідна становлена потужність всього, ГВт, в тому числі	38,6	42,7	59,8	62,6	57,5	64	70,9
АЕС існуючі	13,8	13,8	13,8	11	3	3	2
АЕС нові	0	0	5	5	10	15	20
ТЕС вугільні існуючі	17,2	16	14,7	11	2,4	0	0
ТЕС вугільні нові	0	2,4	8,4	14,4	19,2	23,1	24,6
ТЕС газові нові	0	0	1,5	1,6	1,6	1,6	3
ВЕС існуючі	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
ВЕС нові	0,3	1,8	3,3	4,8	6	6	6
СЕС існуючі	0,8	0,8	0,8	0,3	0	0	0
СЕС нові	0,6	1,9	3,3	4,7	5,5	5,5	5,5
ГЕС існуючі	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	4,9
ГЕС нові	0	0	3	4,4	4,4	4,4	5

Таблиця 4 – Структура генеруючих потужностей енергосистеми при помірному збільшенні вартості вугілля

Показник	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Необхідна становлена потужність всього, ГВт, в тому числі	38,6	43,9	59,5	62,2	57,2	62,5	70,8
АЕС існуючі	13,8	13,8	13,8	11	3	3	2
АЕС нові	0	0	5	5	10	15	20
ТЕС вугільні існуючі	17,2	16	14,7	11	2,4	0	0
ТЕС вугільні нові	0	2,4	8,4	14,4	19,2	23,1	26,1
ТЕС газові нові	0	1,2	1,2	1,2	1,2	0	1,3
ВЕС існуючі	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
ВЕС нові	0,3	1,8	3,3	4,8	6	6	6
СЕС існуючі	0,8	0,8	0,8	0,3	0	0	0
СЕС нові	0,6	1,9	3,3	4,7	5,5	5,5	5,5
ГЕС існуючі	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	4,9
ГЕС нові	0	0	3	4,4	4,4	4,4	5

нецілочисельних змінних загальних потужностей технологій, з якими вони приймають участь у попиті цих ГЕН, які обмежуються встановленою потужністю відповідної технології з урахуванням доступності їх використання, за умови мінімізації експлуатаційних витрат.

1. Шульженко С.В. Особливості врахування граничних періодів прогнозування на базі динамічної моделі математичного програмування розвитку гене-

руючих потужностей атомної енергетики. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. № 2(41). С. 32—38. <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.032>.

2. Шульженко С.В. Використання траєкторій змін вхідних даних у детерміновано-стохастичних моделях життєвого циклу. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. № 1(36). С. 5—9.

3. GLPK (GNU Linear Programming Kit). URL: <https://www.gnu.org/software/glpk/>.

Надійшла до редколегії 03.09.2018