

М. О. Круцяк, аспірант кафедри міжнародної економіки,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМПОЗИЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОКРИТТЯ ГРАФІКА ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА СУЧАСНИХ УМОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ

У статті розглядаються особливості композиції, етапи роботи над нею та її специфіка у запропонованій та розробленій автором оптимізаційній економіко-математичній моделі покриття графіка електричного навантаження з метою оцінювання відповідності (достатності) генеруючих потужностей у складі ОЕС України та надання подальших рекомендацій стосовно управління резервами. В основі методології лежать оптимізаційні методи лінійного програмування з критерієм мінімізації економічних витрат і накладенням низки економічних, технічних і технологічних обмежень. Інструментарієм дослідження послужили пакети прикладних програм Microsoft Excel та GNU MathProg Gusek, на основі яких автором реалізовано економіко-математичну модель у запропонованій композиції у вигляді програми. Автором, шляхом проведення розрахунків (із використанням розробленої програми, алгоритму та композиції економіко-математичної моделі) із подальшим їх співставленням з фактичними статистичними даними щодо графіка покриття попиту на електричну енергію в Україні (на прикладі двох діб 2018 року у літній та зимовий періоди) доведено можливість і доцільність використання запропонованої економіко-математичної моделі для цілей визначення оптимального складу генеруючих потужностей в ОЕС України для кожної години доби прогнозованого графіку електричних навантажень у системі, що поряд із традиційними технологіями генерації електричної енергії включає характеристики сучасних технологій, таких як сумісні комплекси сонячних панелей та батарей.

Ключові слова: композиція, моделювання, прогнозування, попит, електрична енергія, ринок, ОЕС України, електричні станції.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сьогодні, в умовах технологічної та структурної перебудови енергетичного сектора України, виконання взятих на себе зобов'язань за Кіотським протоколом, Угодою про асоціацію з ЄС та низкою інших міжнародних угод актуальності набуває оцінювання відповідності (достатності) генеруючих потужностей в ОЕС України з використанням обґрунтованих оптимізаційних економіко-математичних моделей покриття попиту на електричну енергію з урахуванням специфіки роботи різних типів електричних станцій та випадковості зміни характеру факторів впливу на режим їх роботи. Від коректності такого оцінювання залежатиме енергетична безпека країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам моделювання в енергетиці присвячена низка робіт як іноземних, так і

вітчизняних науковців, більшість з яких представляють провідні науково-дослідні інститути та профільні міністерства й асоціації, серед яких: МАГATE [1], BP Shell [2], Entso-E [3] [4], CIGRE [5], Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова [6], Інститут загальної енергетики [7], Інститут економіки та прогнозування [8], Національний інститут стратегічних досліджень [9] та багато інших. У міру вивчення та дослідження проблем в енергетиці останнім часом ними все більше загострюється увага на питанні оптимізації генеруючих потужностей та, відповідно, економіко-математичному апараті, що міг би дозволити вирішити дану проблему.

Постановка завдання із обґрунтуванням одержаних наукових результатів. Метою статті є вдосконалення існуючих підходів до визначення оптимального складу генеруючих потужностей в ОЕС України у кожен момент часу прогнозованого періоду відповідно до

перспективного графіку електричного навантаження у системі, що поряд із традиційними технологіями генерації електричної енергії буде включати сучасні технології (на кшталт поєднання сонячних панелей та батарей в одному комплексі) та додаткові ознаки, що можуть бути використані в процесі управління резервами (як на добу вперед, так і на дещо більший відтинок часу). Акцентування уваги на перевагах і недоліках основних технологій генерації у врахування їх маневреності.

Виклад основного матеріалу дослідження із обґрунтуванням одержаних наукових результатів. Оптимізаційна економіко-математична модель представлена програмою (для роботи у програмному середовищі Microsoft Excel з використанням оптимізатора GNU MathProg [10] стороннього розробника). Програма розроблена для вирішення задач оптимізації покриття перспективного графіку електричного навантаження (тут і далі – ГЕН) протягом року (8760-годин з інтервалом дискретизації в одну годину) на основі детермінованих і стохастичних даних (в останньому випадку використовується метод Монте-Карло). Композицію моделі становлять наступні елементи (у програмі позначені

відповідними вкладками електронної таблиці Excel): 1) конструктор схеми; 2) параметри симуляції; 3) дані навантаження; 4) дані роботи конвекційних ЕС; 5) дані роботи ГЕС+ГАЕС; 6) дані роботи СЕС; 7) дані роботи ВЕС; 8) дані роботи інших типів ЕС; 9) дані резервів; 10) дані електричних зв'язків; 11) дані про накладені обмеження; 12) параметри економічної оптимізації. Нижче наведено опис та, подекуди, обґрунтування елементів.

1. Конструктор схеми. У вікні вставки слід додати принаймні один вузол (ним може виступати як цілісна енергетична система, так і її окремі елементи – електричні станції, споживачі тощо, оскільки для кожного елемента передбачена можливість одночасного споживання і генерації електричної енергії) та електричні зв'язки між цими вузлами.

2. Параметри симуляції. На цій вкладці заповнюється таблиця параметрів симуляції, серед яких обов'язкові (табл. 1):

- день початку тижня;
- день тижня, на яке припадає 01 січня;
- обрати чи рік є високосним, або ж ні;
- кількість років для імітаційного моделювання (кількість експериментів методу Монте-Карло на основі закону великих чисел).

Таблиця 1 – Параметри симуляції представленої економіко-математичної моделі

| Параметри моделювання | Навантаження | Конвекційні ЕС | Гідро ЕС | ВЕС | СЕС |
|------------------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Детерміністично задані дані: | | | | | |
| 1. статус | Вимк. | Вимк. | Вимк. | Вимк. | Вимк. |
| Стохастично задані дані: | | | | | |
| 2. статус | Увімк. | Увімк. | Увімк. | Увімк. | Увімк. |
| 3. кількість експериментів | 100 | 10000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 4. сезонна кореляція | задана помісячно | н/д | задана для року | задана помісячно | задана помісячно |

Далі слід визначитися з тим, якими даними у майбутньому доведеться оперувати – наявними фактичними (стосовно навантаження або генерації електроенергії у різні години доби протягом року) або ж випадковими-стохастичними (у такому випадку програма довільним чином на основі обраних далі закону розподілу ймовірностей та низки інших обов'язкових параметрів генеруватиме відповідні реалістичні часові ряди даних).

Дані навантаження. За наявності фактичних даних заповнюються таблиця ретроспективних даних (табл. 2), у противному випадку – таблиці, що будуть використані для генерації стохастичних часових рядів (табл. 3, табл. 4, табл. 5, табл. 6), кількість яких наперед обирається введенням відповідного показника у табл. 1.

Таблиця 2 – Детерміновані часові ряди динаміки навантаження

| Вузли системи | Часовий ряд № 1 | Часовий ряд № 2 | ... | Часовий ряд № n | Характерне значення | Середнє значення | Мінімальне значення | Максимальне значення |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| Понеділок, 01 січня, 00:00 | 18409 | 19170 | ... | ... | ... | 18789,5 | 18409 | 19170 |
| Понеділок, 01 січня, 01:00 | 18347 | 18224 | ... | ... | ... | 18285,5 | 182240 | 183470 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Субота, 31 грудня, 23:00 | 20102 | 19775 | ... | ... | ... | 19938,5 | 19775 | 20102 |

Таблиця 3 – Матриця просторової кореляції

| Вузли системи | Встановлення потужність | Вид розподілу ймовірностей |
|---------------|-------------------------|----------------------------|
| Вузол № 1 | 25000 | alpha |
| Вузол № 2 | 22200 | delta |
| ... | ... | ... |
| Вузол № n | 0 | mu |

Таблиця 4 – Матриця просторової кореляції

| Вузли системи | Вузол № 1 | Вузол № 2 | ... | Вузол № n |
|---------------|-----------|-----------|-----|-----------|
| Вузол № 1 | 100,0 | 0 | ... | 0 |
| Вузол № 2 | 0 | 100,0 | ... | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| Вузол № n | 0 | 0 | ... | 100,0 |

Таблиця 5 – Матриця коефіцієнтів розподілу

| Місяці року | alpha | beta | gamma | delta | theta | mu |
|-------------|-------|------|-------|-------|-------|-----|
| Січень | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Лютий | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Грудень | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |

Таблиця 6 – Матриця денного профілю навантаження вузла

| Години доби | Січень | Лютий | ... | Грудень |
|-------------|--------|-------|-----|---------|
| 0 | 0,12 | 0,11 | ... | 0,13 |
| 1 | 0,18 | 0,16 | ... | 0,17 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 23 | 0,1 | 0,11 | ... | 0,13 |

Слід відмітити, що вид розподілу та його коефіцієнтів обираються евристично, оскільки від цього напряму залежать результати генерації стохастичних рядів даних. Моделлю передбачене використання наступних видів розподілу: однорідний (альфа-розподіл), бета-, логнормальний, гамма-; розподіл Вейбулла [11].

Після заповнення всіх даних стає доступною вкладка «Дайджест», в якій коротко наведені дані всіх вузлів заданої системи.

3. Дані роботи конвекційних ЕС. До таблиці даних цієї вкладки вносяться дані про структуру традиційних типів електричних станцій, таких як: АЕС, ТЕЦ, ТЕС. Кожній введеної одиниці потужності присвоюються обов'язкові дані, наведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Обов’язкові параметри моделювання конвекційних електричних станцій

| Параметр | Конвекційна станція № 1 | Конвекційна станція № 2 | ... | Конвекційна станція № n |
|---|-------------------------|-------------------------|-----|-------------------------|
| найменування | Добротвірська ТЕС | Запорізька АЕС | ... | Київська ТЕЦ-5 |
| кількість встановлених енергетичних блоків на ній, од. | 5 | 4 | ... | 5 |
| потужність кожного блоку, МВт | 250 | 1100 | ... | 320 |
| вид палива, на якому працює дана електрична станція | вугілля | ядерне паливо | ... | природний газ |
| примусове включення в роботу | ні | так | ... | ні |
| гранично допустиме короткочасне перенавантаження понад номінальне значення, % | 5 | 0 | ... | 10 |
| гранично допустима мінімальна потужність, з якою робота енергетичного блоку залишається стабільною, МВт | 220 | 1050 | ... | 300 |
| час виходу на максимальну спроектовану потужність з режиму підтримки обертів, с | 1800 | 3600 | ... | 360 |
| час повернення з режиму максимальної спроектованої потужності у режим підтримки обертів, с | 900 | 3600 | ... | 180 |
| відсоток потужності, що віднесений для покриття необхідного первинного резерву за критерієм $n-1$, с | 10 | 0 | ... | 12 |
| кількість викидів CO ₂ , т/МВт·год | 1,2 | 0 | ... | 1,5 |
| експлуатаційна вартість, євро/МВт·год* | 5000 | 2500 | ... | 4700 |
| вартість підтримки обертів турбіни без корисного електричного навантаження, євро/година роботи* | 3200 | - | ... | 3500 |
| вартість запуску, євро/пуск* | 3500 | 20000 | ... | 2900 |
| вартість продажу електроенергії на ринку, євро/МВт·г* | 7900 | 3200 | ... | 7600 |
| мінімальний час напрацювання протягом року, год/рік* | 250 | - | ... | 0 |

Примітка: * – зазначені у таблиці вартості є описовими (підібрані виходячи із загальних уявлень і здорового глузду), оскільки вони становлять комерційну таємницю та не підлягають розголошенню.

Варто зазначити, що примусове включення в роботу тієї чи іншої електричної станції пояснюється наступним чином: у випадку з АЕС її зупинка є ризиковою та може призвести до техногенної катастрофи, у випадку з традиційними ТЕЦ або ТЕС не є ризиковою, більш того можливість частих пусків/зупинок останніх передбачені проектною та експлуатаційною документацією [12].

За бажанням роботи з детермінованими даними, слід заповнити дані, такі ж як і для даних навантаження (табл. 2), у протилежному випадку (для роботи з імовірнісними характеристиками подій) – таблицю характеристик, що описують роботу конвекційних ЕС, яка наведена у табл. 8.

4. Дані роботи ГЕС+ГАЕС. Більш складними об’єктами моделювання є ГЕС і ГАЕС, які принципово різняться між собою тим, що ГАЕС на відміну від ГЕС має два режими роботи (турбінний та насосний), а не один (турбінний, генераторний), що привносить складність у вигляді можливості акумулювання потенційної енергії річок або водойм (регулюванням положення шлюзів на річках або режиму перекачування води з верхнього водосховища у нижнє та навпаки). Виходячи із наведеного вище, характеристика роботи будь-якої ГЕС представлена у табл. 9, ГАЕС – у табл. 10 і табл. 11.

Таблиця 8 – Описова характеристика роботи конвекційних ЕС

| Параметр | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|---|--|---|---|--|
| | Тривалість вимушених зупинок, діб | Тривалість планових зупинок, діб | Відношення тривалості вимушених зупинок до діб у році, % | Відношення тривалості планових зупинок до діб у році, % | Мінімальна тривалість простоїв, пов'язаних з проведенням планових робіт, діб | Максимальна тривалість простоїв, пов'язаних з проведенням планових робіт, діб | Середній проміжок часу між зупинками, пов'язаними з вимушеними зупинками, діб | Середній проміжок часу між зупинками, пов'язаними з плановими зупинками, діб |
| Понеділок, 01 січня, 00:00 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | ∞ | ∞ |
| Понеділок, 01 січня, 01:00 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | ∞ | ∞ |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Субота, 31 грудня, 23:00 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | ∞ | ∞ |

Таблиця 9 – Загальна характеристика роботи ГЕС і ГАЕС

| Параметр | Очікувана генерація, ГВт-год | Стандартне відхилення, ГВт-год | Мінімальне значення генерації, ГВт-год | Максимальне значення генерації, ГВт-год | Частка ROR, % | Нижній рівень, % | Верхній рівень, % | Середній рівень, % |
|----------|------------------------------|--------------------------------|--|---|---------------|------------------|-------------------|--------------------|
| Січень | 1200 | 0 | 1200 | 1200 | 0,35 | 15 | 30 | 40 |
| Лютий | 1050 | 0 | 1050 | 1050 | 0,36 | 13 | 25 | 35 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Грудень | 900 | 0 | 900 | 900 | 0,345 | 33 | 40 | 45 |

Таблиця 10 – Параметри роботи ГАЕС

| Параметр | Значення |
|--|----------|
| Коефіцієнт міжмісячної кореляції | 0,8 |
| Кількість переходів з одного режиму в інший протягом доби | 2 |
| Кратність максимуму генерації до середнього значення закачки | 4 |
| Ємність водойм, ГВт-год | 5000 |

Таблиця 11 – Характеристика управління водоймами на ГАЕС

| Параметр | Мінімум, МВт | У середньому, МВт | Максимум, МВт |
|---------------------|--------------|-------------------|---------------|
| Понеділок, 01 січня | 810 | 1200 | 3000 |
| Вівторок, 02 січня | 824 | 1250 | 3000 |
| ... | ... | ... | ... |
| Четвер, 31 грудня | 836 | 1180 | 3000 |

Окрім згаданого вище, ГЕС та ГАЕС можуть утворювати каскади, що складаються з кількох ГЕС або комбінації ГЕС і ГАЕС на одній річці, а тому при моделюванні має враховуватися той факт, що притоки води на такому каскаді мають

бути розподілений між всіма ЕС, з яких він складається.

З цієї причини автором запропоновано ввести діагональну матрицю розподілу водних потоків, представлену табл. 12.

Таблиця 12 – Діагональна матриця розподілу водних потоків

| Найменування ЕС | ГЕС-1 | ГЕС-2 | ... | ГАЕС-n |
|-----------------|-------|-------|-----|--------|
| ГЕС-1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ГЕС-2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| ГАЕС-n | 0 | 0 | 0 | 1 |

У всьому іншому – робота ГЕС і ГАЕС у представленій моделі нічим не відрізняється від роботи конвекційних ЕС, а тому для роботи із детерміністичними даними слід заповнити таку ж таблицю (табл. 2), що й для останніх.

5. Дані роботи СЕС. Робота будь-якої СЕС у представленій моделі може бути охарактеризована з використанням кількох основних параметрів, наведених у табл. 2, табл. 4 і табл. 6 – для моделювання ОЕС з використанням методу Монте-Карло, або на основі ретроспективних статистичних даних щодо генерації на відповідній СЕС, які слід ввести, як у табл. 2.

6. Дані роботи ВЕС. Робота ВЕС з точки зору економіко-математичного моделювання

нічим не відрізняється від роботи СЕС, окрім того, що остання немає одного характерного розподілу ймовірності (може мати будь-який характер розподілу залежно від низки природних чинників і географічного розміщення), у той час як ВЕС у більшості випадків має багатопараметричний вид розподілу Вейбулла [11].

7. Дані роботи інших типів ЕС. У представленій моделі, є можливість врахування роботи інших типів електричних станцій, таких як: ТЕС на біопаливі, геотермальні, інші види акумулювання (окрім ГАЕС та акумуляторних батарей) і транскордонні перетоки, передбачені контрактами (табл. 13).

Таблиця 13 – Дані роботи інших типів ЕС

| Технології ЕС | Спалювання відходів, ГВт·год | Біогаз, ГВт·год | Геотермальні ЕС, ГВт·год | Транскордонні перетоки, ГВт·год |
|----------------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------------|
| Понеділок, 01 січня, 00:00 | 0,6 | 0,2 | 0 | 1,2 |
| Понеділок, 01 січня, 01:00 | 0,65 | 0,24 | 0 | 1,4 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| Субота, 31 грудня, 23:00 | 0,62 | 0,23 | 0 | -0,4 |

8. Дані резервів. Представленою моделлю також передбачено можливість резервування потужності за кількома критеріями: первинний резерв, вторинний резерв, управління попитом з боку споживачів, на добу наперед (табл. 14). Слід зазначити, що дані резервів і дані роботи інших типів ЕС є явно детерміністичними.

9. Дані електричних зв'язків. Електричні зв'язки можуть бути репрезентовані у даній моделі як для передачі постійного струму, так і для передачі змінного. В обох випадках для цього

слід для кожної електричної лінії зв'язку ввести її значення опору та імпедансу (для ліній постійного струму значення останнього рівне нулю). Знаючи ці показники, можна скористатися першим і другим законом Кірхгофа. Окрім того, що на кожна з ліній електричного зв'язку може мати певні обмеження у вигляді пропускної здатності (з урахування напрямку перетоку струму) та цін на транспортування електричної енергії ними (табл. 15).

Таблиця 14 – Дані резервів

| Резерви | Первинний резерв | Вторинний резерв | Резерв для управління попитом з боку споживачів | На добу вперед |
|----------------------------|------------------|------------------|---|----------------|
| Понеділок, 01 січня, 00:00 | 0,6 | 0,2 | 0 | 1,2 |
| Понеділок, 01 січня, 01:00 | 0,65 | 0,24 | 0 | 1,4 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| Субота, 31 грудня, 23:00 | 0,62 | 0,23 | 0 | -0,4 |

Таблиця 15 – Параметри лінії передачі

| Показники | Активний опір, Ом | Імпеданс, Ом | Пропускна здатність (пряма), ГВт·год | Пропускна здатність (зворотна), ГВт·год | Ціна транспортування (пряма), євро/ГВт·год | Ціна транспортування (зворотна), євро/ГВт·год |
|----------------------------|-------------------|--------------|--------------------------------------|---|--|---|
| Понеділок, 01 січня, 00:00 | 400 | 0 | 9 | 4,5 | 12 | 10 |
| Понеділок, 01 січня, 01:00 | 400 | 0 | 9 | 4,5 | 12 | 10 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Субота, 31 грудня, 23:00 | 400 | 0 | 9 | 4,5 | 12 | 10 |

10. Дані про накладені обмеження. Обмеження можуть застосовані до будь-якого вузла або лінії електричного зв'язку, у вигляді рівності або нерівності. Проте, їх застосування має стосуватися ККД як самих вузлів, так і ліній

передач. Так, у табл. 16, як приклад, наведено, втрати електричної енергії при передачі її від вузла генерації через лінію електричної передачі до вузла її кінцевого споживання.

Таблиця 16 – Матриця накладених обмежень

| Показники | Активний опір, Ом |
|-----------------------|-------------------|
| Знак | = |
| Тип | погодинно |
| Кількість об'єктів | 2 вузли, 1 лінія |
| Вузол № 1 – вузол № 2 | 0,72 |
| Вузол № 2 – вузол № 1 | 0,8 |

11. Параметри економічної оптимізації. Частина (у тому числі економічна) параметрів оптимізації були наведені окремо для кожного типу ЕС, які можуть бути змодельовані у

запропонованій економіко-математичній моделі, інша ж – має бути заповнена у цьому елементі композиції моделі (табл. 17).

Таблиця 17 – Параметри економічної оптимізації*

| Показники | Вартість недовиробітку електричної енергії (дефіцит електроенергії в системі), євро/МВт·год | Вартість перевиробітку електричної енергії (профіцит електроенергії в системі), євро/МВт·год |
|-----------|---|--|
| Вузол № 1 | 11500 | 15800 |
| Вузол № 2 | 10700 | 14900 |
| ... | ... | ... |
| Вузол № n | 12100 | 13750 |

Примітка: * – зазначені у таблиці вартості є описовими (підібрані виходячи із загальних уявлень і здорового глузду), оскільки вони становлять комерційну таємницю та не підлягають розголошенню.

Таким чином, у загальному вигляді баланс попиту-пропозиції для кожної n -ої доби ГЕН g , $n=1 \div N$, $g=1 \div G$, на t етапі розрахункового періоду, $t=1 \div T$, у спрощеному вигляді має вигляд:

$$\sum_{k=1}^K Y_{kngt} - \sum_{i=1}^I D_{ingt} - HM_{ngt} + HP_{ngt} (= 0 \quad 1)$$

де:

Y – потужність k типу технології генерації, використаної для покриття попиту у відповідну годину ГЕН, $k=1 \div K$;

D – попит на електричну енергію i -го споживача, $i=1 \div I$;

HP і HM – змінні, які забезпечують можливість отримання рішень за умови порушення балансу з причини неможливості його виконання за заданих обмежень.

У результаті розрахунку у програмі, реалізованої за запропонованими алгоритмом і композицією економіко-математичної моделі, на прикладі 20 грудня 2017 року та 04 липня 2018 року (з використанням ретроспективних даних щодо обсягів попиту на електричну енергію та обсягів генерації [13], за умовно прийнятих і незмінних цін, наведених у табл. 7 і табл. 17), можна досягти зменшення економічних витрат за рахунок оптимізації включення генеруючого обладнання для покриття попиту на електричну енергію у розмірі 2,21% та 3,78%, відповідно.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Автором, шляхом проведення розрахунків (із використанням розроблених програми, алгоритму та композиції економіко-математичної моделі) із подальшим їх співставленням з фактичними статистичними даними щодо графіка покриття попиту на електричну енергію в Україні доведено можливість і доцільність використання запропонованої економіко-математичної моделі для цілей визначення оптимального складу генеруючих потужностей в ОЕС України для кожної години доби прогнозованого графіку електричних навантажень у системі, що поряд із традиційними технологіями генерації електричної енергії включає характеристики сучасних технологій, таких як сумісні комплекси сонячних панелей та батарей.

У подальшому автором розглядається можливість зменшення інтервалу дискретизації економіко-математичної моделі, принаймні, до півгодинного інтервалу, або ж до 5-хвилинного, що пояснюється наявністю подій, початок і кінець яких досить часто припадають на один і той же час (у нашому випадку – на одну годину), а тому такі явища лишаються поза межами розглянутої економіко-математичної моделі, так само як і стрибкоподібна зміна навантаження внаслідок настання аварійних ситуацій та генерації на СЕС та ВЕС навіть за нормальних умов.

Список літератури

1. Статут МАГАТЕ. URL: <https://www.iaea.org/about/statute> (дата звернення: 21.12.2018).
2. BP Energy Outlook. BP energy economics, 2018. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf> (дата звернення: 21.12.2018)..
3. Adequacy Methodology. ENTSO-E, 2014. URL: <https://www.entsoe.eu/outlooks/adequacy-methodology/> (дата звернення: 21.12.2018).
4. Mid Term Adequacy Forecast. ENTSO-E, 2018. URL: <https://www.entsoe.eu/outlooks/midterm/> (дата звернення: 21.12.2018).
5. Technical-Brochures. CIGRE, France, 2018. URL: <http://c5.cigre.org/Publications/Technical-Brochures> (дата звернення: 21.12.2018).
6. Напрями наукових досліджень. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова, 2018. URL: <https://ipme.kiev.ua/napryami-naukovix-doslidzhen/> (дата звернення: 21.12.2018).
7. Найважливіші наукові результати Інституту загальної енергетики НАН України у 2017 році. Інститут загальної енергетики НАН України, 2018. URL: http://ienergy.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=177 (дата звернення: 21.12.2018).

8. Європейська енергетична політика сталого розвитку на тлі зростаючої глобальної конкуренції у світовій торгівлі. Інститут економіки та прогнозування НАН України, 2018. URL: <http://ief.org.ua/?p=7753> (дата звернення: 21.12.2018).
9. Ринок електроенергії в Україні: проблеми вдосконалення. Національний інститут стратегічних досліджень, 2008. URL: <http://old.niss.gov.ua/Monitor/april08/14.htm> (дата звернення: 21.12.2018).
10. GNU MathProg. URL: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/MathProg.htm> (дата звернення: 21.12.2018).
11. Dong, M., & Nassif, A. B. Combining Modified Weibull Distribution Models for Power System Reliability Forecast, 2018. arXiv preprint arXiv:1805.10420.
12. Проектні роботи: «Технічне переоснащення котлоагрегату ст.№4 Трипільської ТЕС в частині використання неprojektного палива». Prozorro – публічні закупівлі, 2018. URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2017-05-19-000529-c> (дата звернення: 21.12.2018).
13. Диспетчерська інформація. Укренерго, 2018. URL: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/> (дата звернення: 21.12.2018).

References

1. International Atomic Energy Agency (2018). *Statut*. URL: <https://www.iaea.org/about/statute> (date of request: 21.12.2018).
2. BP Energy Outlook (2018). *BP energy economics*. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf> (date of request: 21.12.2018).
3. ENTSO-E (2014). *Adequacy Methodology*. URL: <https://www.entsoe.eu/outlooks/adequacy-methodology/> (date of request: 21.12.2018).
4. ENTSO-E (2018). *Mid Term Adequacy Forecast*. URL: <https://www.entsoe.eu/outlooks/midterm/> (date of request: 21.12.2018).
5. CIGRE-France (2018). *Technical-Brochure*. URL: <http://c5.cigre.org/Publications/Technical-Brochures> (date of request: 21.12.2018).
6. Instytut problem modeliuвання v enerhetytsi im. H.Ye. Pukhova (2018). *Napriamy naukovykh doslidzhen*. URL: <https://ipme.kiev.ua/napriami-naukovix-doslidzhen/> (date of request: 21.12.2018).
7. Instytut zahalnoi enerhetyky NAN Ukrainy (2018). *Naivazhlyvishi naukovi rezultaty Instytutu zahalnoi enerhetyky NAN Ukrainy u 2017 rotsi*. URL: http://ienergy.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=177 (date of request: 21.12.2018).
8. Instytut ekonomiky ta prohnouzuvannya NAN Ukrainy (2018). *Yevropeiska enerhetychna polityka staloho rozvytku na tli zrostaiuchoi hlobalnoi konkurentsii u svitovii torhivli*. URL: <http://ief.org.ua/?p=7753> (date of request: 21.12.2018).
9. Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhe (2008). *Rynok elektroenerhii v Ukraini: problemy vdoskonalennia*. URL: <http://old.niss.gov.ua/Monitor/april08/14.htm> (date of request: 21.12.2018).
10. SourceForge (2018). *GNU MathProg*. URL: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/MathProg.htm> (date of request: 21.12.2018).
11. Dong, M., & Nassif, A. B. (2018). *Combining Modified Weibull Distribution Models for Power System Reliability Forecast*. arXiv preprint arXiv:1805.10420.
12. Prozorro – publichni zakupivli (2018). *Projektne roboty: «Tekhnichne pereosnashchennia kotloahrehatu st.#4 Trypils'koi TES v chastyni vykorystannia neproektnoho palyva»*. URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2017-05-19-000529-c> (date of request: 21.12.2018).
13. Ukrenerho (2018). *Dyspetcheska informatsiia*. URL: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/> (date of request: 21.12.2018).

M. O. Krutsyak, postgraduate student of International Economics Department, NTUU Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Composition of the optimization economic-mathematical model of coverage of electric

loading schedule under the current functioning conditions

The article deals with the peculiarities of the composition, the stages of its work and its specificity in the proposed and developed by the author the optimization economic-mathematical model of the coverage of the electric load schedule in order to assess the adequacy of generating capacities in the UES of Ukraine and provide further recommendations regarding the management of reserves.

A basis of the methodology are optimization methods of linear programming with a criterion for minimizing economic costs and the imposition of a number of economic, technical and technological constraints.

The toolkit for the study was Microsoft Excel and GNU MathProg Gusek application packages, based on which the author implemented an econometric model in the proposed composition as a program. As a result of the analysis of calculations made by the program for the retrospective period and comparing them with available statistical data on the balancing of power in the UES of Ukraine, it was possible to prove the feasibility of using the proposed econometric model for solving everyday practical tasks in the energy sector.

The author, by conducting calculations (using the developed program, algorithm and compositions of the economic-mathematical model) with their subsequent comparison with the actual statistical data on the schedule of covering the demand for electric energy in Ukraine proved the possibility and feasibility of using the proposed economic and mathematical model for the purpose of determining the optimal the composition of generating capacities in the UES of Ukraine for every hour of the day of the predicted schedule of electrical loads in the system, which, along with the traditional our power generation technologies include features of state-of-the-art technology such as compatible solar panels and batteries.

In further researches, the author considers the possibility of reducing the sampling interval of the economic-mathematical model, at least, to a half-hour interval, or to a 5-minute, due to the presence of events, the beginning and end of which often occur at the same time (in our case – on one hour), and therefore such phenomena remain outside the bounds of the considered economic-mathematical model, as well as a leap-like change in load due to the occurrence of emergency situations and the generation of SES and WEP, even under normal conditions.

Key words: composition, modeling, forecasting, demand, electrical energy, market, UES of Ukraine, electric power stations.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2018 р.
