

У цьому дослідженні, на відміну від попередніх [1; 16; 18], ураховується повний вектор граничних значень (нижнє та верхнє: критичне, порогове, оптимальне). Причому для розрахунку скороченого вектора граничних значень (нижнє та верхнє: порогове, оптимальне) можна використовувати для t рівень довіри 0,98 або 0,99 з таблиць t -розподілу Стюдента, а для розрахунку критичних значень індикаторів (нижнє критичне, верхнє критичне) – рівень довіри 0,998 або 0,999 [20]. Для експоненціального типу розподілу при відсутності параметра t для деяких граничних значень за критичне обирається мінімальне значення індикатора (хвіст вправо) або максимальне (хвіст вліво) зі взірцевої вибірки.

1.3. Методологія визначення рівня й стратегування енергетичної безпеки

Енергетичну безпеку, на наше переконання, варто віднести до сфер, які безпосередньо реалізують один із фундаментальних національних інтересів – сталий розвиток національної економіки, суспільства і держави для зростання рівня та якості життя населення.

Водночас енергетична безпека також бере участь у забезпеченні інших національних інтересів – державного суверенітету та незалежності, інтеграції України у європейський енергетичний простір тощо [1; 16; 18; 19].

Отже, з огляду на авторський підхід, вважаємо, що енергетичну безпеку варто визначати як окреслення межі об'єкта управління (сфери дослідження), як *«спроможності технічно надійним, економічно ефективним та екологічно прийнятним способом задовольняти потреби суспільства в енергоресурсах, забезпечувати стає функціонування національної економіки у нормальних і кризових умовах, захищати суверенітет держави у формуванні та здійсненні політики захисту національних інтересів»* [1, с. 47].

Відповідно до цього визначення здійснювався подальший аналіз рівня енергетичної безпеки, описаного низкою складників, кожен з яких, своєю чергою, характеризується сукупністю властивостей (показників). Щоб оцінити прогрес у досягненні встановлених цілей, використовують **індикатори** – показники досягнення цільового стану. Такі показники можуть бути наскрізними та одночасно стосуватися різних особливостей системи.

Для вирішення завдання інтегрального визначення рівня енергетичної безпеки України застосовується універсальна методологія ідентифікації та стратегування, яка порівнює стан різних сфер та обґрунтовує стратегічні сценарії безпекового розвитку [1].

Ідентифікація рівня безпеки передбачає інтегральне оцінювання порівняно з пороговими значеннями завдяки: науковому обґрунтуванню вектора граничних значень індикаторів, добору форми інтегрального індексу (*мультиплікативна*), нормуванню індикаторів та порогових значень (*комбінований метод нормування*), визначенню вагових коефіцієнтів (*динамічні за методами головних компонент та ковної матриці*).

Для інтегрального оцінювання переважна кількість дослідників використовує «адитивну функцію корисності» (лінійна згортка) у спосіб утворення суми окремих критеріїв, помножених на свої вагові коефіцієнти – «метод зважених сум»:

$$I_t = \sum_{i=1}^n a_i z_{i,t}, \quad a_i \geq 0 \quad i \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1. \quad (1.1)$$

Проте цей підхід має суттєвий недолік, що полягає в можливості компенсувати рівень інтегрального показника деяких індикаторів за рахунок інших. Така форма допускає ситуацію значущості інтегрального показника при нульовому значенні одного або кількох індикаторів (завдяки застосуванню методу нормування за «розмахом варіації»), унеможливаючи тим самим дослідження впливу таких індикаторів на рівень безпеки. При значному відхиленні мінімальних значень індикаторів від нуля динаміка нормованого індикатора дедалі більше відхиляється від відображення динаміки вхідного індикатора, показуючи не динаміку самого індикатора, а динаміку зміни його діапазону.

З урахуванням нелінійності процесів у об'єкті дослідження найбільш адекватним вбачається використання мультиплікативної форми інтегрального індексу, пов'язаної з адитивною через логарифмічну функцію:

$$I_t = \prod_{i=1}^n z_{i,t}^{a_i}; \quad \sum a_i = 1; \quad a_i \geq 0. \quad (1.2)$$

Для моделювання складники інтегрального показника енергетичної безпеки повинні бути безрозмірними величинами, тоді як вихідні

показники (індикатори), за якими здійснюється оцінка рівня енергетичної безпеки, можуть мати різні розмірності. Тому всі вибрані індикатори приводять до *нормованої безрозмірної величини*, отриманої одним із методів нормування.

Процедура нормування індикаторів та їхніх порогових значень є необхідним етапом розрахунку, оскільки різні індикатори мають різну розмірність. Понад те, вони можуть бути різноспрямованими: є індикатори, збільшення яких бажане (S – стимулятори), інші – зменшення яких бажане (D – дестимулятори).

Процедура нормування виконує дві основні функції:

- 1) переводить індикатори різних розмірностей у безрозмірні величини до діапазону $[0, 1]$;
- 2) уможливорює зіставлення різноспрямованих індикаторів через специфічне нормування.

Після нормування динаміка нормованих індикаторів має точно відтворювати динаміку вихідних індикаторів у певному масштабі.

Найчастіше застосовують такі методи нормування:

– «за еталонними значеннями»:

$$S: z_i = \frac{x_i}{k_{\text{норм}}}, \quad k_{\text{норм}} \geq x_{\text{max}}; \quad D: z_i = \frac{k_{\text{норм}}}{x_i}, \quad k_{\text{норм}} \leq x_{\text{min}}; \quad (1.3)$$

– «за розмахом варіації» з деякими модифікаціями:

$$S: z_i = \frac{x_i - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}; \quad D: z_i = \frac{x_{\text{max}} - x_i}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}. \quad (1.4)$$

де x_i – поточне значення індикатора; $k_{\text{норм}}$ – нормуючий коефіцієнт; x_{min} – мінімальне значення індикатора; x_{max} – максимальне значення індикатора.

Пропонуємо застосовувати *комбінований метод нормування*, заснований на модифікації методу нормування «за розмахом варіації», що передбачає прирівнювання до нуля $x_{\text{min}} = 0$ у формулі нормування (фактично виключення нормування щодо діапазону зміни індикаторів) [19, с. 74–77].

$$S: z_i = \frac{x_i}{k_{\text{норм}}}, \quad D: z_i = \frac{k_{\text{норм}} - x_i}{k_{\text{норм}}}, \quad k_{\text{норм}} \geq x_{\text{max}}. \quad (1.5)$$

Нормуючий коефіцієнт для індикаторів-стимуляторів обирається рівним максимальному значенню з діапазону індикаторів та їхніх

порогових значень; для індикаторів-дестимуляторів він має бути більшим за максимальне значення з того самого діапазону на 5...10 %.

При цьому в процесі формування набору індикаторів та їх нормалізації необхідно визначитись щодо їх внеску в оцінку інтегрального індикатора або інтегральних граничних значень (вагові коефіцієнти). Більшість дослідників для визначення вагових коефіцієнтів застосовує експертні оцінки, які, однак, значною мірою є суб'єктивними, не дають можливості запобігання принциповим помилкам, а тому суттєво знижують наукову та практичну цінність одержаних результатів. Для відповідності наявному стану мінливої ситуації необхідно частіше проводити експертні оцінювання, що пов'язано з деякими труднощами і щодо складу експертів, і щодо частоти опитування.

Бажано користуватися формалізованими методами, які дають змогу уникнути суб'єктивізму та забезпечують адекватний науковий результат оцінювання. Можливе застосовування таких підходів до визначення вагових коефіцієнтів, розташованих за їх важливістю: моделювання, ігрові методи, метод головних компонент. Найбільш доступним із переліченого є метод головних компонент, який реалізується за допомогою стандартного пакета «Статистика» через визначення вектор-стовпчика дисперсій, матриці абсолютних величин факторних навантажень, їх добутку та розрахунку вагових коефіцієнтів. Ураховуючи те, що для визначення інтегральних граничних значень їх матриця є недовизначеною (кількість рядків – часових періодів переважно менша від кількості головних компонент – кількості індикаторів), застосовується процедура обертання *Varimax*, а для інтегральної згортки індикаторів – процедура обертання *Kvartimax*. У такий спосіб формалізованим методом отримуємо *постійні* у визначений період вагові коефіцієнти.

Постійність значень вагових коефіцієнтів притаманна всім підходам до визначення інтегральних оцінок, які існують, що, однак, зовсім не відповідає реальності. Суттєві зміни у безпековій, політичній, технологічній чи економічній сферах можуть призводити до радикальних змін взаємозв'язків у системі (зміни вагомості тих чи тих елементів, процесів, функцій), а це, своєю чергою, спричиняє зміни вагових коефіцієнтів.

З метою врахування цього аспекта оцінювання рівня енергетичної безпеки для визначення динамічних вагових коефіцієнтів автори пропонують метод *ковзної матриці*, заснований на використанні методу головних компонент, який полягає в послідовному зсуві матриці міні-

мально необхідного розміру вздовж періоду часу та визначенні вагових коефіцієнтів за певний часовий період [21].

Мінімально необхідний розмір матриці (кількість рядків n – періодів часу) визначається з умови рівності кількості індикаторів (кількості стовпців m – головних компонент) кількості додатних власних значень цієї матриці. Вагові коефіцієнти, визначені для індикаторів із застосуванням первинної мінімальної матриці, будуть постійними тільки для цього початкового (розгінного) періоду часу ($t_1 - t_{n+1}$). Постійне змішування визначеної мінімальної матриці впродовж періоду часу (рядків матриці) на рядок (зазвичай рік) дозволяє визначити поточні динамічні вагові коефіцієнти ($t_i - t_{i+n}$), які враховуватимуть реальні політичні й економічні зміни в країні в різні періоди часу.

Інтегральне згортання індикаторів I та їхніх граничних значень P дозволяє отримати ієрархічну багатofакторну математичну модель енергетичної безпеки у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{I-VII} = \prod_{k=1}^7 I_{k,t}; \quad P_{ij} = \prod_{j=1}^6 P_{ij}^{b_{ij}}; \quad P_{ij} = [P_{кр,ij}^H; P_{пор,ij}^H; P_{опт,ij}^H; P_{опт,ij}^B; P_{пор,ij}^B; P_{кр,ij}^B]; \\ I_{I,t} = \prod_{i=1}^9 z_{i,t}^{a_i}; \quad I_{II,t} = \prod_{i=1}^5 z_{i,t}^{a_i}; \quad I_{III,t} = \prod_{i=1}^6 z_{i,t}^{a_i}; \quad I_{IV,t} = \prod_{i=1}^7 z_{i,t}^{a_i}; \\ I_{V,t} = \prod_{i=1}^5 z_{i,t}^{a_i}; \quad I_{VI,t} = \prod_{i=1}^5 z_{i,t}^{a_i}; \quad I_{VII,t} = \prod_{i=1}^{11} z_{i,t}^{a_i}; \end{array} \right. \quad (1.6)$$

де k – кількість складників; I – кількість індикаторів; j – кількість градацій безпеки.

Свою чергою, застосування системного підходу до опису сфери енергетичної безпеки як об'єкта управління дає можливість сформувати набір індикаторів, який, порівняно з підходами, що існують, уможливить точніше оцінювати поточний та перспективний рівні енергетичної безпеки, зважаючи на внутрішню динаміку трансформації системи та динаміку зовнішнього середовища. Запропонований підхід [1; 16; 18] максимально широко охоплює всі елементи / процеси / явища, що впливають на систему забезпечення енергетичної безпеки з урахуванням її місця в системі забезпечення національної безпеки та стійкості суспільства і держави.

Зазначимо, що спосіб групування індикаторів залежить від практичних цілей дослідника. У публікації [1] використано можливе групування параметрів для двох основних випадків відповідно до:

– розширення сфери управління (складності управлінських рішень) щодо об'єкта управління¹³: ресурсна забезпеченість; економічна доступність; економічна прийнятність; екологічна прийнятність; модель стійкості; якість управління;

– системного опису об'єкта управління: цілісний опис системи (система енергетичної безпеки як елемент більших систем); інституційно-організаційна структура системи (елементи та зв'язки системи); функціональна структура системи (функції та ролі); процесне відтворення системи (виробничі, управлінські, сервісні процеси та процеси з підтримки на всіх етапах життєвого циклу; трансформаційні процеси, які зумовлюють зміни в системі); якість матеріалу системи.

У цій праці, на відміну від [1; 16; 18], щоб продемонструвати ефективність застосування методології оцінки рівня енергетичної безпеки як інструмента стратегічного управління, групи індикаторів згруповано за сімома стратегічними цілями, установленими в Стратегії енергетичної безпеки України [22]: ресурсна достатність (I); економічна доступність (II); економічна прийнятність (III); енергетична ефективність (IV); екологічна прийнятність (V); стійкість енергетичного сектору (VI); захищеність національних інтересів (VII) (табл. 4).

Таблиця 4. Зміст стратегічних цілей, установлених у Стратегії енергетичної безпеки України

Стратегічна ціль	Зміст
I. Ресурсна достатність (<i>energy availability, accessibility</i>)	Надана державою можливість для всіх споживачів отримувати необхідну кількість енергетичних ресурсів потрібної якості; відображає ресурсно-технологічний вимір, тобто фізичну наявність енергозабезпечення, енергетичних ресурсів і технологій
II. Економічна доступність (<i>energy affordability</i>)	Надана державою можливість для всіх споживачів отримувати необхідну кількість енергетичних ресурсів потрібної якості за прийнятною ціною; поєднує ресурсно-технологічний вимір з економічним складником
III. Економічна прийнятність	Надана державою можливість для всіх споживачів отримувати необхідну кількість енергетичних ресурсів потрібної якості

¹³ Фактично цей підхід відповідає відомому й поширеному сьогодні у світі підходу 4 A's (*availability, accessibility, affordability, acceptability*) та адаптованому для потреб України: ресурсна достатність; технічна надійність; економічна вигідність; екологічна прийнятність.

Закінчення табл. 4

Стратегічна ціль	Зміст
<i>(energy (economy) acceptability)</i>	за прийнятною ціною, коли мета, способи й принципи використання енергії відповідають поняттю соціальної справедливості; поєднує ресурсно-технологічний та економічний виміри з ціннісною складовою (передусім відображеною в засадничих нормативно-правових актах)
IV. Енергетична ефективність <i>(energy efficiency)</i>	Спроможність держави забезпечити зменшення кількості енергії, яка потрібна, щоб забезпечити всіх споживачів товарами й послугами; поєднує ресурсно-технологічний вимір з економічним складником
V. Екологічна прийнятність <i>(energy (ecology) acceptability)</i>	Надана державою можливість для всіх споживачів отримувати необхідну кількість енергетичних ресурсів потрібної якості за прийнятною ціною, коли мета, способи й принципи використання енергії відповідають світоглядним установкам суспільства в екологічній сфері; поєднує ресурсно-технологічний та економічний виміри з ціннісною складовою (передусім відображеною в засадничих нормативно-правових актах)
VI. Стійкість енергетичного сектору <i>(energy resilience)</i>	Спроможність держави запобігати виникненню кризової ситуації в короткостроковому періоді завдяки механізмам нейтралізації негативного впливу загроз енергетичній безпеці будь-якого типу, адаптування до умов, що постійно змінюються, та швидкого відновлення після кризи; відображається в політиці енергетичної безпеки <i>(energy security policy)</i>
VII. Захищеність національних інтересів (в енергетиці)	Спроможність держави забезпечити надійне, доступне і прийнятне енергозабезпечення, що не завдає шкоди національним інтересам і збереженню національних цінностей; поєднує ресурсно-технологічний, економічний і ціннісний виміри з безпековим складником; відображається в політиці енергетичної безпеки <i>(energy security policy)</i>

Джерело: складено авторами.

Вибрану сукупність індикаторів наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Індикатори енергетичної безпеки України

Номер	Індикатор (I)	Тип	Розмірність
I. Ресурсна достатність			
1	Задоволення потреб власними ПЕР	<i>S</i>	% споживання
2	Вартість імпорту енергетичних ресурсів	<i>D</i>	% ВВП
3	Частка ресурсу в енергетичному балансі: нафта та нафтопродукти	<i>D</i>	% у балансі
4	природний газ	<i>D</i>	— » — » — » —
5	енергетичне вугілля	<i>D</i>	— » — » — » —
6	ядерна й термоядерна енергія	<i>S</i>	— » — » — » —
7	гідроенергетика	<i>S</i>	— » — » — » —

Продовження табл. 5

Номер	Індикатор (I)	Тип	Розмірність
8	сонячна й вітрова енергетика	S	% у балансі
9	енергія біомаси	S	— » — » — » —
II. Економічна доступність			
10	Вартість спожитих енергоресурсів для держави	D	% ВВП
11	Річне споживання електроенергії в розрахунку на одну особу	S	MВт·год
12	Річне енергоспоживання в розрахунку на одну особу	S	т н.е.
13	Частка сукупного доходу домогосподарства, що спрямовується на оплату житлово-комунальних послуг	D	%
14	Якість постачання первинних ресурсів, палива та енергії	S	% (експертна оцінка)
III. Економічна прийнятність			
15	Валовий внутрішній продукт (ВВП) у розрахунку на одну особу	S	тис. дол. США
16	Рівень інвестування підприємств ПЕК	S	% випуску ПЕК
17	Рівень оновлення основних засобів ПЕК	S	% інвестицій до ОЗ ПЕК
18	Тінізація ПЕК	D	% ВДВ ПЕК
19	Оплата праці в ПЕК	S	% випуску ПЕК
20	Концентрація енергетичних ринків за індексом Герфіндала – Гіршмана	D	індекс (за постачальниками)
IV. Енергетична ефективність			
21	Енергоємність валового внутрішнього продукту	D	т н. е./1000 дол. США
22	Частка енергетики у валовому внутрішньому продукті	D	% ВДВ ПЕК у ВВП
23	Тіньове споживання ПЕР	D	% ВВП
24	Загальні втрати енергетичних ресурсів (баланс)	D	%, загал. постачання
25	Частка споживання на енергетичні потреби	D	— » — » — » —
26	Втрати в мережах теплопостачання	D	%, обсягу передачі
27	Втрати в електромережах	D	— » — » — » —
V. Екологічна прийнятність			
28	Рівень викидів CO ₂ на TPES	D	т CO ₂ /т н. е.
29	Рівень викидів CO ₂ на одиницю ВВП	D	кг/дол. США

Продовження табл. 5

Номер	Індикатор (I)	Тип	Розмірність
30	Кінцева вуглецеємність енергії	D	г CO ₂ /МДж
31	Частка викидів CO ₂ від електро- й теплогенеруючих установок	D	%, загал. викидів
32	Частка енергії відновлюваних джерел у кінцевому споживанні	S	%, кінц. споживання
VI. Стійкість енергетичного сектору¹⁴			
33	Частка найбільшого постачальника в імпорті (за видами ПЕР)	D	%
34	Рівень технологічної залежності імпорту / експорту з одного джерела (за видами енергетичних технологій)	D	% (експертна оцінка)
35	Обсяг запасів / резервів за видами ПЕР	S	діб споживання % від завдань
36	Індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI)	D	хв/рік
37	Ефективність і результативність реагування на кризові ситуації	S	% (експертна оцінка)
VII. Захищеність національних інтересів			
38	Прогнозованість і послідовність політики	S	% (експертна оцінка)
39	Процесна забезпеченість: виробничі процеси та інфраструктура	S	% (експертна оцінка)
40	управлінські процеси та інфраструктура	S	— » — » — » —
41	допоміжні та сервісні процеси та інфраструктура	S	— » — » — » —
42	процеси та інфраструктура з підтримання об'єктів на всіх етапах життєвого циклу	S	— » — » — » —
43	інформаційно-комунікаційні процеси та інфраструктура	S	— » — » — » —
44	Рівень залученості до енергетичних ринків ЄС	S	— » — » — » —
45	Рівень тіньового навантаження капіталу в ПЕК (видобувна промисловість, виробництво електроенергії, газу, пару та кондиційованого повітря)	D	% офіційного

¹⁴ У перспективі, у випадку дослідження окремих аспектів функціонування системи енергозабезпечення (наприклад, системи електропостачання) доцільно розглянути також додаткові індикатори, наприклад *LOLE – Loss Of Load Expected, год* (або *LOLP – Loss Of Load Probability, %*) – імовірність втрати навантаження (або математичне очікування втрати навантаження); – *Expected Energy Not Served, MBM-год* – очікувана неподачена енергія (або ймовірний дефіцит електричної енергії).

Закінчення табл. 5

Номер	Індикатор (I)	Тип	Розмірність
46	Якість державної політики	S	% (експертна оцінка)
47	Якість кадрів (технічних та управлінських)	S	— » — » — » —
48	Відповідність політичних лідерів завданням, що постають перед системою	S	— » — » — » —

Джерело: складено авторами.

Значення індикаторів (табл. 5) установлювали: за офіційними джерелами інформації (28 індикаторів); модельними розрахунками (7 індикаторів); експертними оцінками (13 індикаторів). Визначений набір цільових, порогових та критичних значень індикаторів, станом на 2020 р., застосований для рівня енергетичної безпеки, наведено в додатку 1.

Надалі моделювання оцінок рівня енергетичної безпеки здійснюється відповідно до вищеописаної методології: *обґрунтування вектора граничних значень; нормування індикаторів; обґрунтування динамічних вагових коефіцієнтів; інтегральна згортка індикаторів і граничних значень.*

При цьому можливе коригування тих чи тих складових частин, індикаторів системи та їхніх граничних значень або введення до системи додаткових індикаторів (складових частин) за умови надходження нових даних та розроблення нових методів розрахунку нових важливіших індикаторів, які до цього часу не публікувались органами державної статистики.

Формування стратегії дій із досягнення цільового, безпечного стану також є складною методологічною проблемою. У підходах щодо стратегічного планування застосовують переважно методи прогнозування інтегральних індексів – *«минуле визначає майбутнє»*. Цілком очевидно, що класичні методи прогнозування тут недоречні. По-перше, прогнозування дає продовження існуючих тенденцій (соціально-економічного розвитку, моделей управління, технологій) на майбутнє. По-друге, прогнозування завжди містить помилку. По-третє, необхідно знати, як повинні змінюватися складові частини системи та вибрані з метою її опису індикатори для досягнення бажаного стану. Отже, потрібні зовсім інші підходи. Саме такий підхід пропонується в цій монографії. Він базується на принципі *«майбутнє визначається траєкторією в майбутнє»* (досягнення стратегічних проектних цілей).

Стратегічне бачення сталого розвитку передбачає спочатку визначення стратегічних цілей, які зумовлюють бажані сценарії сталого розвитку та оцінки відхилення інтегрального індексу рівня енергетичної безпеки (та/або його складників) від траєкторії сталого розвитку, а потім – застосовування теоретичних підходів до обґрунтування стратегічних орієнтирів досягнення сценаріїв сталого розвитку.

Після одержання динаміки інтегрального індексу стану системи необхідно вибрати сценарії досягнення стратегічних цілей (реалістичний, оптимістичний, сценарій збалансованого сталого розвитку) залежно від співвідношення значення інтегрального індексу з інтегральними пороговими значеннями, які характеризують оптимальний, передкризовий, кризовий або критичний стан системи. Відповідно, дослідник (управлінець) зможе формувати політику в певній сфері та оцінити необхідні затрати й механізми усунення відхилення динаміки вибраних індикаторів від цільової траєкторії.

Розв'язання декомпозиційної задачі для інтегрального індексу енергетичної безпеки I_t , коли його «еталонне» значення I_t^e є відомим (або заданим), дозволяє з урахуванням чутливості його складників та їхніх динамічних вагових коефіцієнтів установити значення кожного складника для кожного року періоду прогнозування. При цьому декомпозиція інтегрального індексу відбувається послідовно – спочатку для його складників, а потім – для кожного з об'єднаних у них індикаторів енергетичної безпеки.

Проміжними розв'язками задачі є щорічні сукупності семи складників $I_{k,t}$ інтегрального індексу енергетичної безпеки I_t , що відповідають $k = 7$ стратегічним цілям, визначеним у Стратегії енергетичної безпеки України [22] (табл. 5). Кінцевими розв'язками – сукупності значень індикаторів, досягнення яких протягом періоду прогнозування t відповідатиме бажаній траєкторії сталого розвитку у відповідній сфері управління.

Схему адаптивної системи регулювання рівня енергетичної безпеки з еталонною моделлю зображено на рис. 6.

Входом цієї системи є сукупність індикаторів моделі енергетичної безпеки, скомпонованих за визначеною процедурою в інтегральний індекс I_t , та їхні значення, що є статистичними показниками, результатами експертних опитувань чи макроекономічного моделювання. Адаптивність системи забезпечується наявністю у її складі еталонної моделі (входом якої є «еталонні» значення індикаторів, що відповідають ок-

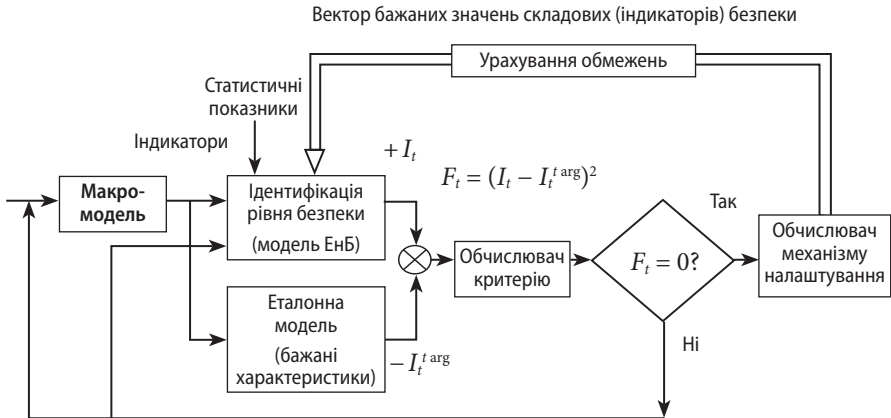


Рис. 6. Схема адаптивної системи регулювання енергетичної безпеки з еталонною моделлю

Джерело: розроблено авторами за [19, с. 85].

ресленим стратегічним цілям) і механізму налаштування параметрів моделі з урахуванням наявних обмежень (максимально й мінімально можливих значень індикаторів).

До блоку «Ідентифікування стану (рівня) безпеки» послідовно закладають рівняння інтегральної згортки складників енергетичної безпеки (ЕНБ) з моделі (3) зі своїми ваговими коефіцієнтами (2) і значення індикаторів моделі енергетичної безпеки.

Постановка задачі системі керування полягає у встановленні такої зміни нормованих значень X_i індикаторів енергетичної безпеки – складників інтегрального індексу I_b , які дозволять зменшити критерій регулювання (сигнал похибки) F_t до нуля. Це є можливим, коли поточне I_t дорівнюватиме заданому («еталонному») I_t^e .

Тому основним принципом роботи механізму налаштування є мінімізація функції квадрату похибки $F_t = (I_t - I_t^e)^2$ та її похідних. При цьому вважається, що всі функції є неперервними та, щонайменше, двічі диференційованими.

Функція F_t є звичайною функцією значень індикаторів x_i , тому її часткові похідні за всіма змінними мають дорівнювати нулю: $\text{grad } F_t = (\partial F_t / \partial x_i) = 0$. Але, оскільки на параметри регулювання x_i накладені обмеження, що визначають фізичні межі їхньої можливої зміни, в разі досягнення одним чи декількома з них граничних (максимальних або мінімальних) значень, що відповідають знаку градієнта за цією змін-

ною, їм присвоюють ці граничні значення. При цьому мінімум функції F_i шукають за іншими змінними, поки знак градієнта не зміниться.

Оскільки через наявність обмежень деякі складники вектора градієнта можуть не дорівнювати нулю, розв'язок такої задачі є субоптимальним, і вона належить до задач нелінійної параметричної оптимізації.

Задля мінімізації критерію регулювання (сигналу похибки) мовою програмування C++ написано процедуру, яка реалізує адаптивний метод регулювання з коротким циклом зворотного зв'язку [19]:

$$F_{min} = strategy(P, f, n_1, n_2, x, f_{zad}, p_{max}, p_{min}, eps, func) \quad (1.7)$$

де F_{min} – результуюча похибка; P – вектор нормованих значень індикаторів інтегрального індексу, з якого розпочинається стратегування (початковий вектор шуканих значень індикаторів, що відповідають заданому значенню інтегрального індексу енергетичної безпеки); I_i і I_i^e – початкове та задане значення інтегрального індексу; n_1 і n_2 – початковий і кінцевий номери індикаторів; p_{min} і p_{max} – вектори мінімальних і максимальних нормованих значень індикаторів, що потребують налаштування; eps – задана похибка розв'язку; $func$ – покажчик на функцію, що викликається для обчислення критерію оптимізації.

Початковий вектор нормованих значень індикаторів, вихідний вектор нормованих шуканих значень індикаторів, а також вихідний вектор шуканих значень індикаторів у фізичних (натуральних) одиницях виміру через застосування зворотної процедури нормування використовують і в розрахунках для кожного наступного року періоду прогнозування.

Далі поступово цей крок зменшується щоразу вдвічі, поки не буде знайдений мінімум F (оптимальний градієнтний метод). Коли знайдено наближене положення мінімуму, бажано визначити мінімум точніше. Один із можливих способів розв'язку – визначення кроку зміни вектора параметрів через квадратичну апроксимацію з використанням трьох останніх значень F [19, с. 88]:

$$x_{min} = \frac{3x_i}{4} \cdot \frac{F_2 - 5F_0 + 4F_1}{F_2 - 3F_0 + 2F_1} \quad (1.8)$$

Інтерполяційна формула наведеного типу є найбільш придатною при чисельному розв'язку задачі пошуку градієнта, оскільки дозволяє уникнути труднощів, що виникають за наявності безперервних функцій, коли при наближенні до мінімуму швидкість наближення прямує до нуля.