

Н. В. Караєва, Л. О. Левченко

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ СТАЛИМ РОЗВИТКОМ ЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ РИЗИКІВ І БІФУРКАЦІЙНИХ ЗРУШЕНЬ

Анотація. Проаналізована проблематика забезпечення сталого розвитку енергетики в умовах глобальних ризиків, зростання глобальної невизначеності, непередбачуваності та біфуркаційних зрушень, пов'язаних із Четвертою промисловою революцією та зеленим «енергетичним» переходом. Доведена необхідність розгляду сучасної енергетики як складної емерджентної системи в умовах багатоваріантності та нелінійності векторів розвитку глобальної економіки, енергетики. На основі аналізу методологічних положень теорій лінійної та нелінійної (синергетичної) парадигм обґрунтовано доцільність використання синергетично-кібернетичного підходу до управління сталим розвитком енергетики, враховуючи, що траєкторії функціонування і розвитку енергетики притаманні синтез еволюційного (лінійного, впорядкованого) та хаотичного (нелінійного) процесів. Визначено, що основним напрямом кібернетичного управління енергетичною системою є пошук та реалізація таких керуючих впливів, які за наявності зовнішніх і внутрішніх флуктуацій забезпечать стійкий, безпечний, гомеостатичний режим функціонування системи, у якому вона досягне максимуму своєї ефективності. Зазначено, що проблема гомеостазу (стійкості) в кібернетичі розглядається з чисто функціональної точки зору, і тому в ній (на відміну від синергетики) не аналізуються конкретні механізми самоорганізації. Синергетика досліджує нелінійні процеси самоускладнення систем, виникнення «порядку із хаосу» (і навпаки) та вивчає процеси, коли можуть виникати біфуркаційні зрушення, декілька станів рівноваги (атрактор) і коли керуючі впливи не регулюють безпосередньо поведінку системи. Доведено, що синергетично-кібернетичний підхід до управління сталим розвитком енергетики необхідно розглядати як міждисциплінарний, що ґрунтується на широкому застосуванні апарату синергетичного моделювання (нечітка логіка, нейронні мережі, еволюційні алгоритми, фрактали, елементи теорії хаосу тощо), економіко-математичних, балансових, соціо-психологічних та й інших моделей та методів.

Ключові слова: сталий розвиток енергетики, глобальні ризики, лінійна парадигма, нелінійна парадигма, біфуркація, синергетично-кібернетичний підхід.

Вступ

Ще у 2012 році резолюцією № 67/215 Генеральної Асамблеї ООН «Сприяння розширенню використання нових та відновлюваних джерел енергії» (Promotion of new and renewable sources of energy), 2014–2024 роки оголошено «Десятиліттям сталої енергетики для всіх» [1]. В Енергетичній стратегії України на період до 2035 року зазначено, що сталий розвиток енергетики має стати першим кроком для оздоровлення та зростання економіки країни в цілому [2]. Також сталий розвиток енергетики є важливою передумовою досягнення Цілей сталого розвитку (ЦСР), визначених ООН у документі «Порядок денний в галузі сталого розвитку на період до 2030 року» [3] та виконання Паризької угоди про зміну клімату [4]. Підвищення енергоефективності, збільшення частки відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) та перехід на більш екологічно чисті енерготехнології мають важливе значення для сталого розвитку, в тому числі для боротьби зі зміною клімату.

Сучасний світ входить у нову еру глобальних ризиків, зростання глобальної невизначеності, непередбачуваності та біфуркаційних зрушень (зокрема перехід на шостий технологічний уклад у рамках Четвертої промислової революції та перехід до зеленої економіки й енергетики). На думку експертів Стокгольмського міжнародного інституту досліджень проблем миру (Stockholm International Peace Research Institute, SIPRI) глобальні кризи у сферах безпеки людства (геополітичні, воєнні, енергетичні, соціальні тощо) та екології посилюють одна одну та генерують конфліктність, нестабільність, створюють взаємо-доповнювані нові ризики і

загрози, яким притаманна багатоаспектність прояву та масштабність наслідків [5]. Ключовими глобальними ризиками і загрозами у сфері безпеки людства є війни та інші збройні конфлікти на міжетнічному та релігійному ґрунті; нарощування ядерних озброєнь; міжнародний тероризм; суспільно-політичні заворушення насильницького характеру; геноцид населення тощо. Наприклад, війна Російської Федерації (РФ) проти України створила комплекс загроз воєнного, соціально-економічного, техногенно-екологічного характеру, небезпеку ядерної війни, ризики світовій енергетичній і продовольчій безпеці. Згідно дослідження компанії Economist Intelligence Unit (EIU), саме агресія РФ стала вагомим ризик-чинником для 81 % країн, породжуючи найбільші глобальні ризики саме у сфері енергетичної безпеки для країн Європейського Союзу та інших держав [6]. Сьогодні локальні війни ведуться, головним чином, за володіння енергоресурсами, за контроль над чужими запасами енергоресурсів та магістральними трубопроводами транспортування нафти і газу.

Різноманітність множини факторів глобальних, національних ризиків, їх проявів ускладнюють процес прийняття стратегічних рішень в енергетиці, враховуючи, що за змістовною сутністю ризик є слабо структурованим, оскільки виникає в результаті невизначеності подій та ситуацій, зовнішнього середовища, неповноти і неточності формалізації задачі, нечіткості як самих вхідних даних, процесів, так і моделей, що їх описують.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження з розробки обґрунтованих прогнозів розвитку енергетики та формування на їх основі стратегії державної політики

ґрунтується, переважно, на лінійній парадигми класичної і неокласичної економічної науки, яка є найбільш традиційною для індустріального ХХ століття та слугує базисом кібернетичного підходу до управління енергетикою, під терміном якої, як правило, розглядається "енергетична галузь" або "паливно-енергетичний комплекс", тобто сукупність складних, ієрархічних, керованих техніко-економічних систем (галузей, підприємств), що забезпечують країну паливом, електричною і тепловою енергією, функціонування яких відбувається за фізичними, детермінованими законами. Основними групами методів дослідження у межах кібернетичного підходу є: балансові, економетричні та дослідження операцій (методи оптимізації та математичного моделювання).

В Україні енергетичний баланс є необхідним інформаційним джерелом для оперативного управління та стратегічного планування розвитку енергетики і використовуються, зокрема, для аналізу і зміни прогнозування потреби в енергоресурсах [7, 8]. Але в умовах глобальних ризиків і біфуркаційних зрушень використання балансових моделей значно ускладнює в результаті спотворення надійної інформаційної бази щодо руху енергетичних потоків, зокрема, достовірності розрахунку натуральних обсягів споживання, показників імпорту, експорту та вартісних параметрів, значення яких залежать від стану економіки інших країн та міжнародних фінансових і енергетичних ринків.

Економетричні методи, що базуються на побудові економіко-математичних функцій (моделей) і засновані на регресійному аналізі та виявленні тенденцій розвитку (екстраполяції тренду), доцільно використовувати лише для керованих екзогенних параметрів (зокрема, облікова ставка, тарифи на енергетичні ресурси та послуги, енергоефективність нового обладнання або норми викидів забруднюючих речовин), які є "нормативно" встановлені і для короткострокових прогнозів.

Швидкий розвиток комп'ютерних технологій дозволило зосередити економіко-математичні дослідження вже на розробленні оптимізаційних моделей. Методи лінійного (цільова функція і область пошуку визначаються лінійними залежностями), нелінійного (цільова функція задана як лінійними так і нелінійними залежностями при допустимій області пошуку), стохастичного (цільова функція задається імовірнісною функцією) програмування в енергетиці стають найбільш поширеними. Наприклад, при формуванні сценаріїв для плану дій реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2035 року, використовується комплексна енергетична модель програмування «Times-Україна» [9], яка за методологічним підходом є лінійною оптимізаційною квазидинамічною економіко-математичною моделлю виробничого типу часткової рівноваги з фіксованим попитом, у якій окремі модельні розрахунки проводяться із підключенням спеціальних модулів, реалізованих з елементами цілісильного, нелінійного та стохастичного програмування [10]. Але функціонування і розвиток енергетики здебільшого визначається станом зовнішнього середовища (економічної, соціальної, політичної, екологічної), тому сьогодні стохастичні (випадкові події) фактори розвитку енергетичної системи, у значній

мірі, спотворюють результати, отримані за допомогою детермінованих економіко-енергетичних моделей.

Особливо після світової фінансової кризи 2008-09 рр. у зарубіжному і вітчизняному науковому колі категоричність суджень щодо застарілості методології лінійної парадигми та кібернетичного підходу управління системами посилюється, що є, на наш погляд, достатньо дискусійним питанням враховуючи, що процес управління сталим розвитком енергетики, з однієї сторони має бути спрямовано на забезпечення сталого (стійкого, стабільного) стану енергетики а, з іншої – на розвиток, тобто перехід її в якісно новий стан.

Метою статті є розгляд методологічних засад управління сталим розвитком енергетики в умовах глобальних ризиків і біфуркаційних зворушень.

Виклад основного матеріалу

Загалом проблематика управління сталим розвитком енергетики, на наш погляд, лежить у площині дуалістичності категорій сталість (стійкість) і розвиток в контексті одного часового простору. Дефініція поняття "сталість", змістовна сутність якої більш конкретизується терміном "гомеостаз" (від грецьких *homios* – однаковий і *statis* – стан), розглядається як здатність системи зберігати динамічну рівновагу і розширювати свої структурно-функціональні властивості при впливі на неї збурених дій навколишнього середовища. Механізм гомеостазу направлений на досягнення оптимальної структури елементів системи і визначає умови безпечного її існування. У вищезазначеному контексті категорія «сталій (стійкій)» та «безпечний» нами розглядається як синоніми. Безпека підвищує стійкість системи – здатність системи майже не відхилитися від впорядкованого (обраного) руху під впливом випадкових зовнішніх та внутрішніх подій (флуктуацій, небезпек). Саме на забезпечення енергетичної безпеки, що є важливою умовою досягнення ЦСР, у першу чергу, спрямована енергетична політика і стратегії України на період до 2035 року. Найвищий рівень безпеки досягається за умови, що весь комплекс показників стану системи перебуває в певних допустимих, порогових межах і має свої граничні (нормативно визначені державними органами) значення. Наприклад, у моделі "TIMES-Україна" сценарні значення таких ендегенних і керованих показників як облікова ставка, тарифи на енергетичні ресурси та послуги, енергоефективність нового обладнання або норми викидів, що визначаються відповідними державними органами, можуть бути чітко обґрунтовані й прогнозовані лише за умов стійкого, безпечного стану енергетики.

Дослідження системи у стійкому стані ґрунтуються, переважно, на підходах лінійної парадигми, концептуальними положеннями та принципами якої є: детерміністське уявлення про стійкість; раціональна поведінка "людини економічної" (*homo economicus*); ідея ринкової рівноваги; постулат про декілька станів рівноваги в системі; присутність у системі локальних оптимумів; лінійність взаємозв'язків між параметрами; прогнозованість процесів розвитку системи; пошук найбільш значущих, сильних чинників, тоді як слабкі чинники переважно виключаються з аналізу чи розглядаються як випадкові; керованість системою. Фізичний

зміст принципу лінійності зводиться до твердження, згідно з яким відгуки системи на відносно малі впливи на неї лінійно (пропорційно) залежать від їх сили.

Критерієм раціональної поведінки при виборі оптимальної альтернативи є максимізація корисності в умовах обмеженості ресурсів. Домінуючою теорією дослідження раціональної економічної поведінки досі залишається неокласична, яка доповнена аналізом прийняття рішень за умов ризику (теорія очікуваної корисності Неймана-Моргенштерна) та невизначеності (теорія суб'єктивної очікуваної корисності Л. Севіджа). Принцип максимізації очікуваної корисності сприймається як основний критерій раціональності рішення та вибору.

В енергетичній сфері вихідні положення лінійної парадигми (лінійної динаміки) полягають у наступному: суб'єкти енергетичних ринків (енергокомпанії (виробники), споживачі, інвестори, державні і регіональні органи влади) діють раціонально та намагаються досягти власних цілей, зокрема мінімізація витрат (збитків), максимізація прибутковості; існує прозорість конкурентних ринків факторів виробництва; ринкова рівновага (баланс попиту та пропозиції) досягається в результаті балансу цілей суб'єктів ринку тощо. З математичної точки зору цілі формуються у вигляді цільової функції та системи різноманітних обмежень (екологічних, економічних, політичних тощо), а в якості методичного інструментарію використовуються моделі міжгалузевого балансу, різноманітні виробничі функції (наприклад, виробничі функції Кобба–Дугласа чи Р. Солоу та Е. Денісону, економічні побудови Кейнса), лінійні диференціальні рівняння, у яких невідомі величини входять до ступеня не вище одиниці (наприклад, рівняння Максвелла, рівняння Гамільтона та ін).

У межах кібернетичного підходу до управління енергетичною системою головна увага приділяється вирішенню основного завдання – знаходження оптимального стаціонарного (рівноважного) стану системи, а категоріями прийняття оптимальних рішень є максимізація споживання окремого виду енергоресурсу, максимізація прибутку, мінімізація загальних витрат, мінімізація або досягнення визначеного рівня викидів парникових газів та ін. Але у багатьох випадках оптимальне рішення неможливо вибрати однозначно не лише для ситуацій з ризиками, невизначеністю, але й для детермінованих, враховуючи, що у процес прийняття оптимальних рішень залучаються багато суб'єктів енергетичних ринків із різними інтересами. В умовах конфлікту інтересів різних груп суб'єктів глобального і національного енергетичних ринків (а це поширене явище), ефективність рішень повинні оцінюватися за багатьма, як правило, суперечливими критеріями, зокрема: надійність, безпечність функціонування енергосистем – екологічні вимоги – економічна ефективність – соціальна стабільність. Ігрові підходи управління системою в умовах конфлікту є базовими серед класів задач теорії прийняття рішень. Однак, при використанні стандартних математичних алгоритмів рішення багатокритеріальних задач (методи головної компоненти, Парето-оптимальність, лінійне звертання вагових коефіцієнтів та ін) розв'язок детермінованих моделей не завжди може бути якісно та

кількісно економічно інтерпретовано, тому при моделюванні енергетичних систем намагаються уникати багатокритеріальної оптимізації.

Загалом кібернетика та різноманітні напрямки загальної теорії систем і системного аналізу, на основі функціонального підходу «сигнал-відгук», формують гіпотези про внутрішній склад і будову систем, намагаючись описувати нелінійні процеси еволюції систем за допомогою лінійних моделей (коли це можливо). При цьому акцент робиться на статистичні системи, на морфологічному та функціональному опису. Але інструментарій моделювання, прогнозування лінійної динаміки не спроможна адекватно описати поведінку енергетичної системи чи її складників за нестационарного (нерівноважного) стану, враховуючи, що можливість застосування регресійного аналізу обмежується вимогами до стаціонарності прогнозованого процесу, тобто стійкості у часі його ймовірнісних характеристик.

Основним напрямом кібернетичного управління енергетичною системою є пошук та реалізація таких керуючих впливів, які за наявності зовнішніх і внутрішніх збурень (флуктуацій) забезпечать стійкій, безпечний, гомеостатичний режим функціонування системи, у якому вона досягне максимуму своєї ефективності, найбільш продуктивного режиму функціонування. Іншими словами, кібернетичний підхід, у значній мірі, спрямований на вивчення гомеостатичних процесів, спираючись в основному на негативні зворотні зв'язки і на формалізованому абстрактноматематичному забезпеченні. Але проблема гомеостазу (стійкості) в кібернетичі розглядається з чисто функціональної точки зору, і тому в ній не аналізуються конкретні механізми самоорганізації (самодії) та виникнення якісно нових систем в результаті хаотичних (біфуркаційних) процесів.

Змістовна сутність поняття "розвиток" не може бути пояснена, виходячи лише з логіки лінійної парадигми (неокласичної економічної теорії). Стратегічне управління сталим розвитком енергетикою в умовах глобальних ризиків, невизначеності, біфуркації вимагає використання підходів нелінійної (як синонім синергетичної) парадигми та коригування сутності дефініції поняття "енергетика". З погляду синергетики, як методології постнеокласичної науки, у роботі під поняттям «енергетика» розуміється енергетична галузь, яка розглядається як складна емерджентна система, що складається з взаємопов'язаних підсистем (технологічної, соціально-економічної, екологічної) і охоплює весь комплекс економіко-господарських відносин, пов'язаних з оборотом енергоносіїв (видобуток, переробку, транспортування енергоресурсів та постачання енергії у зручних для споживання формах). Розгляд сучасної енергетики саме як емерджентної системи необхідне в умовах багатоваріантності та нелінійності векторів розвитку глобальної економіки, енергетики, що визначаються як фактором впливу зовнішнього середовища (глобальні кризи у сферах екології та безпеки людства, зростання різного роду конфліктів), так і зміною структурно-функціональних властивостей самої енергетичної системи в результаті прояву наслідків збурюючих подій зовнішнього середовища.

У контексті синергетичної парадигми функціонування і розвиток енергетики слід розглядати як послідовність періодів, що відповідають стійким (гомеостатичним) станам системи, які перериваються періодами біфуркації (хаосу), після чого відбувається перехід до якісно нового стійкого, рівноважного стану (атрактору) або руйнування. Вибір атрактору в точці біфуркації визначається випадковими флуктуаціями, тобто збуджуючими імпульсами (події типу "Чорного Лебедя" Н. Таллеби), які викликають ланцюгову реакцію, що здатна охопити багато елементів системи та сприяють виведенні системи за поріг стійкості (гомеостазу) і початку фази руйнівного хаосу. Пандемія COVID-19, військова агресія РФ стали спусковим гачком сучасної хаотизації світового порядку, глобальної економіки й енергетики. Лише у життєздатних системах із достатнім рівнем потенціалу розвитку хаос виконує конструктивну функцію, породжуючи якісно нові форми порядку. Так, глобальний хаос в енергетичній галузі, спричинений військовою агресією РФ і наслідками цієї агресії (руйнуванням газопроводів і української енергетичної інфраструктури, введенням санкцій), сприяє пришвидшенню виходу енергетики багатьох країн із минулої траєкторії використання викопного палива (вугілля, нафта, природний газ) і ядерного палива (урану) та забезпечує можливість швидкого зеленого «енергетичного переходу» (тобто переходу до якісно нового стійкого, рівноважного стану енергетики). Взаємопов'язані переходи системи від порядку до хаосу і від хаосу до якісно нового порядку здійснюються лише у стані нестійкості (кризи, катастрофи). Слід зазначити, що якісно новий не обов'язково значить кращий.

Саме синергетика (на відміну від кібернетики), досліджує нелінійні процеси самоускладнення систем, виникнення "порядку із хаосу" (і навпаки) та вивчає процеси, коли можуть виникати біфуркаційні зрушення, декілька станів рівноваги (атрактору) і коли керуючі впливи не регулюють безпосередньо поведінку системи, а через використання інструментів "м'якої сили" (soft power), здатні "підштовхнути систему" до формування внутрішніх механізм її самоорганізації.

Синергетична самоорганізація забезпечується позитивним зворотним зв'язком, який відповідає за вибір атрактору в точці біфуркації та переведення системи на якісно новий тренд розвитку. В результаті розвитку змінюється не тільки структура системи, але і її поведінка, функціонування елементів та взаємозв'язки між ними (цим обмежується використання методичного інструментарію лінійної парадигми, зокрема методів теорії дослідження операцій, моделей міжгалузевого балансу тощо). Іншими словами, випадкові флуктуації є необхідною умовою соціально-економічних, політичних, інституціональних якісних змін. У відсутності флуктуацій, за умов чистої рівноваги чи квазі-рівноваги економічна, енергетична системи, як на макро-, так і мікрорівні поступово деградує.

Вищезазначені положення свідчать, що аналіз і управління енергетичною системою в умовах глобальних ризиків, невизначеності і біфуркаційних зрушень додатково потребує використання методологічного апарату теорій нелінійної парадигми, що враховують відкриті постнеокласичною наукою синергетичні ефекти. Мова йде про теорії синергетики

(Г. Хакена), дисипативних структур, самоорганізації (І. Пригожина), динамічного (детермінованого) хаосу (М. Фейгенбаума), самоорганізуючої критичності або самоорганізації на "краю хаосу" (П. Бака) та дослідження фракталів (Б. Мандельброта). У постнеокласичному (синергетичному) науковому середовищі вище наведені теорії об'єднанні міждисциплінарною "Complexity Science" ("Наука про складне").

У синергетичній парадигмі теорія обмеженої раціональності Г. Саймона стає базисом прийняття управлінських рішень. Ідеї теорії Г. Саймона спонукали до стрімкого розвитку дослідження на стику економіки, психології, біології, соціології та формуванні нових галузей (теорій) постнеокласичної економіки: поведінкова (біхевіористська) економіка і нейроекономіка. Основним синергетичним інструментарієм моделювання і прогнозування енергетики в умовах відсутності стаціонарності аналізованих показників і незмінності умов та мультиплікативного впливу глобальних ризик-чинників невизначеності, конфліктності є нечітка логіка, нейронні мережі, еволюційні алгоритми, фрактали, елементи теорії хаосу тощо.

Але слід не забувати, що моделювати енергетичну систему у термінах синергетики потрібно з обережністю: будь-яка система має "пам'ять", тобто не забуває початкових (граничних) умов. Крім того, складна структура енергетичної системи має не тільки пам'ять, але й обмежені можливості передбачення майбутнього стану: в одних периферійних фрагментах цієї структури (наприклад, нафтовій, вугільній галузі) процеси протікають ще так, як у всій структурі (наприклад, паливно-енергетичному комплексі) у минулому, в інших – як будуть в майбутньому. Тобто, якщо говорити мовою синергетики, стійкий стан окремих підсистем виявляється підірваним, але хаотизація самої системи ще не настала. Це пояснюється тим, що аттрактори мають інваріантні рішення, в яких простір і час залежать і тісно пов'язані один з одним.

Вибір нового атрактору сталого розвитку енергетики можуть визначитися початковими умовами (попереднім станом системи), пам'яттю суб'єктів економіко-господарських відносин (енергетичного ринку), зворотними зв'язками, накопиченим соціально-економічним, екологічним, інституціонально-управлінським потенціалом розвитку, а також флуктуаціями типу "Чорного Лебедя".

Висновки

Процес управління сталим розвитком енергетики має ґрунтуватися на синергетично-кібернетичному підході, враховуючи, що траєкторії функціонування і розвитку енергетики притаманні синтез еволюційного (лінійного, впорядкованого) та хаотичного (нелінійного) процесів.

Використання методологічного інструментарію лінійної парадигми класичної і неокласичної економічних теорій, які слугують базисом кібернетичного підходу до управління енергетикою є достатньо логічним в задачах розробки державної політики забезпечення стійкого, безпечного функціонування енергетики.

Основним напрямом кібернетичного управління енергетичною системою є пошук та реалізація таких керуючих впливів, які за наявності зовнішніх і внутрішніх збурень (флуктуацій) забезпечать стійкий, безпечний, гомеостатичний режим функціонування системи, у якому вона досягне максимуму своєї ефективності.

Основними групами методів дослідження у межах кібернетичного підходу є: балансові, економетричні та дослідження операцій (методи оптимізації та математичного моделювання). Але проблема гомеостазу (стійкості) в кібернетичі розглядається з чисто функціональної точки зору, і тому в ній (на відміну від синергетики) не аналізуються конкретні механізми самоорганізації. Саме синергетика досліджує нелінійні процеси самоускладнення систем, виник-

нення «порядку із хаосу» (і навпаки) та вивчає процеси, коли можуть виникати біфуркаційні зрушення, декілька станів рівноваги (атрактору) і коли керуючі впливи не регулюють безпосередньо поведінку системи, а через використання інструментів "м'якої сили", здатні "підштовхнути систему" до формування внутрішніх механізм її самоорганізації.

Синергетично-кібернетичний підхід до управління сталим розвитком енергетики необхідно розглядати як міждисциплінарний, що ґрунтується на широкому застосуванні апарату синергетичного моделювання (нечітка логіка, нейронні мережі, еволюційні алгоритми, фрактали, елементи теорії хаосу тощо), економіко-математичних, балансових, енергетичних, соціо-психологічних та й інших моделей та методів.

Список літератури

1. UNGA resolution 67/215. 'Promotion of new and renewable sources of energy' UN doc. A/RES/67/215, of 21 December 2012. URL: https://archive.unescwa.org/sites/www.unescwa.org/files/un_resolutions/a_res_67_215_e.pdf (assessed 10 March 2023).
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc (дата звернення 10.03. 2023).
3. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the UN General Assembly (2015). URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (assessed 10 March 2023).
4. Paris Agreement on Climate Change. – UN (2015). URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (assessed 10 March 2023).
5. World stumbling into a new era of risk, concludes SIPRI report / Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). 2022. 23 May. URL: <https://www.sipri.org/media/press-release/2022/world-stumbling-new-era-...> (assessed 10 March 2023).
6. Global operational risk review. How war is fuelling geopolitical uncertainty / Economist Intelligence Unit (EIU), 2022. URL: <https://www.eiu.com/n/campaigns/operational-risk-review-2022> (assessed 10 March 2023).
7. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про утворення Міжвідомчої координаційної ради з питань розроблення енергетичного балансу держави» від 1 березня 2006 року № 121-р. URL: <http://kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=30531237> (дата звернення 10.03. 2023).
8. Рубан-Максимець О. О. Оптимізаційні моделі прогнозування потреби в енергоресурсах на основі синтезу методів формування перспективного міжгалузевого та паливно-енергетичного балансів з урахуванням екологічних обмежень. *Проблеми загальної енергетики*, 2010. № 2 (22). С. 12–17.
9. Довгострокове енергетичне моделювання та прогнозування в Україні: сценарії для плану дій реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2035 року. Київ-Копенгаген 2019. URL: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/long-term_energy_modelling_and_forecasting_in_ukraine_ukrainian.pdf.
10. Подолець Р. З., Дячук О. А. Стратегічне планування у паливно-енергетичному комплексі на базі моделі «TIMES-Україна»: наук. доп. / НАН України; ІЕП. Київ, 2011. 150 с.

Received (Надійшла) 24.02.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.05.2023

Methodological principles of management of sustainable energy development in the conditions of global risks and bifurcation shifts

Nataliia Karaieva, Larysa Levchenko

Abstract. The problem of ensuring the sustainable energy development in the conditions of global risks, the growth of global uncertainty, unpredictability and bifurcation shifts associating with the Fourth Industrial Revolution and the green "energy" transition is analyzed. The necessity of consider modern energy as complex emergent system in conditions of multivariate and non-linear development vectors of the global economy, energy is proven. Based on the analysis of the methodological provisions of the theories of linear and non-linear (synergistic) paradigms, the expediency of synergistic-cybernetic approach using for sustainable energy development managing is substantiated, taking into account that the energy trajectories of functioning and development is inherent in the synthesis of evolutionary (linear, orderly) and chaotic (non-linear) processes. It is determined that the main direction of cybernetic management of the energy system is the search and implementation of such controlling influences that, in the presence of external and internal fluctuations, will ensure a stable, safe, homeostatic mode of functioning of the system, in which it reaches its maximum efficiency. It is noted that the problem of homeostasis (stability) in cybernetics is considered from a purely functional point of view, and therefore (unlike synergetic) it does not analyze specific mechanisms of self-organization. Synergetic investigates non-linear processes of self-complexity of systems, the emergence of "order from chaos" (and vice versa) and studies processes when bifurcation shifts, several states of equilibrium (attractor) can occur, and when controlling influences does not directly regulate the system behavior. It is proved that the synergistic-cybernetic approach for managing the sustainable energy development must be considered as interdisciplinary, based on the wide application of the apparatus of synergistic modeling (fuzzy logic, neural networks, evolutionary algorithms, fractals, elements of chaos theory, etc.), economic-mathematical, balance, socio-psychological and other models and methods.

Keywords: sustainable energy development, global risks, linear paradigm, non-linear paradigm, bifurcation, synergistic-cybernetic approach.