

НЕДОЛІКИ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ЗРІЛОСТІ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВ ТА НАПРЯМИ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

Михайло Ганчук

кафедра фінансів та інноваційного менеджменту, Факультет менеджменту та інформаційної безпеки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна
ORCID 0009-0001-8617-839X

Анотація: У статті систематизовано сім груп моделей оцінювання зрілості систем управління енергоефективністю підприємств (CMMI, DOE/SEP, ISO 50001, Industry 4.0, Smart Manufacturing, Digital Maturity, ESG), виявлено їхні спільні недоліки та запропоновано напрями створення інтегрованої моделі.

Ключові слова: енергоефективність, енергоменеджмент, модель зрілості, ISO 50001, Industry 4.0, цифрова зрілість, ESG.

Зростання вартості енергоресурсів, посилення вимог декарбонізації економіки, зобов'язання України щодо гармонізації національного законодавства з енергетичним асписом Європейського Союзу та інтеграція вітчизняного енергетичного ринку до європейського простору роблять управління енергоефективністю одним із ключових чинників конкурентоспроможності підприємства. Додатковим і вкрай актуальним чинником для українських підприємств є необхідність підвищення енергетичної стійкості (резильєнтності) в умовах пошкодження об'єктів генерації та передачі електроенергії, що переводить питання енергоменеджменту з площини суто економічної доцільності в площину операційної безперервності бізнесу.

Впровадження системи енергетичного менеджменту вже не є суто технічним питанням: воно охоплює організаційну культуру, цифрові технології, стратегічне планування, ланцюги постачання та звітність перед стейкхолдерами, інвесторами й регуляторами. Водночас практика свідчить, що саме лише впровадження стандарту чи окремої технології не гарантує сталого підвищення енергоефективності — визначальним є рівень зрілості системи управління, тобто ступінь системності, керованості, вимірюваності та вбудованості енергетичних практик у загальний контур менеджменту підприємства. Підприємство може формально відповідати вимогам стандарту, водночас маючи низький фактичний рівень зрілості управлінських практик, і навпаки — мати розвинені практики енергоменеджменту без формальної сертифікації.

Для оцінювання цього рівня в науковій літературі та бізнес-практиці розроблено значну кількість моделей зрілості, які виникли в різних предметних областях, різними колективами розробників (академічні дослідницькі групи, державні агентства, консалтингові компанії, галузеві асоціації) і з різною метою. У межах цього дослідження зазначені моделі згруповано у сім категорій: (1) моделі, похідні від Capability Maturity Model Integration (CMMI); (2) моделі, розроблені в межах програм Департаменту енергетики США (DOE), зокрема Superior Energy Performance (SEP); (3) мінімальні вимоги стандарту ISO 50001; (4) моделі зрілості Industry 4.0; (5) моделі зрілості Smart Manufacturing; (6) моделі цифрової зрілості (Digital Maturity) підприємств, зокрема енергетичного сектору; (7) моделі ESG-зрілості, що дедалі частіше включають енергоефективність як складову екологічного виміру. Кожна з цих моделей має власну логіку побудови, критерії та рівні, що ускладнює їх порівняння та практичне застосування, особливо для підприємств трансформаційних економік, включно з Україною, де інституційна інфраструктура підтримки енергоменеджменту (акредитовані аудитори, консультаційні мережі, державні програми стимулювання) перебуває на стадії формування.

Актуальність систематизації цих моделей посилюється тим, що, як зазначають дослідники, значна частина наукового доробку в галузі промислового енергетичного

менеджменту має теоретичний або концептуальний характер, тоді як практики енергетичного менеджменту вивчаються переважно емпірично, здебільшого фрагментарно, без спроби синтезу в єдину методологічну рамку. Це створює розрив між академічними напрацюваннями та практичними потребами підприємств, яким потрібен не окремий науковий концепт, а придатний до застосування діагностичний інструмент.

Метою статті є систематизація існуючих моделей оцінювання зрілості систем управління енергоефективністю підприємств, виявлення їхніх спільних методологічних і практичних недоліків та обґрунтування напрямів удосконалення в напрямі створення інтегрованої моделі, придатної для застосування на підприємствах різного розміру та галузевої належності, зокрема в умовах трансформаційної економіки.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження: систематизувати теоретичні засади концепції організаційної зрілості та її застосування до сфери енергетичного менеджменту; здійснити структурований огляд моделей за сімома зазначеними категоріями з акцентом на їхню архітектуру, критерії оцінювання та емпіричну апробацію; провести порівняльний аналіз моделей за спільним набором критеріїв (походження, кількість рівнів зрілості, предметний фокус, наявність кількісних енергетичних індикаторів, ступінь валідації, орієнтація на розмір підприємства); узагальнити недоліки, притаманні більшості моделей; окреслити конкретні напрями формування інтегрованої моделі оцінювання зрілості енергоменеджменту, придатної до практичного застосування на українських підприємствах.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання зрілості систем управління енергоефективністю промислових підприємств, предметом — сукупність теоретико-методичних підходів, моделей та інструментів, що використовуються для такого оцінювання.

Методологічну основу дослідження становлять загальнонаукові методи системного аналізу — для виявлення структурних елементів моделей зрілості; порівняння та класифікації — для групування моделей за спільними ознаками й побудови порівняльної таблиці; синтезу та узагальнення наукових публікацій, розміщених у визнаних міжнародних наукометричних базах (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore), а також офіційних документах міжнародних організацій (ISO, IEA, DOE) і національних регуляторів України. Джерельну базу дослідження становлять статті провідних міжнародних наукових видань у галузі енергетики та менеджменту (Journal of Cleaner Production, Energy Policy, International Journal of Production Economics, Energies, IEEE Access), офіційні матеріали Міжнародного енергетичного агентства (IEA) та Департаменту енергетики США (DOE), міжнародний стандарт ISO 50001 та його національний відповідник ДСТУ ISO 50001, а також матеріали технічної допомоги, розроблені в межах проєкту UNIDO/GEF для промисловості України.

Поняття «зрілості» в менеджменті організацій бере початок від Capability Maturity Model (CMM), розробленої в Software Engineering Institute Університету Карнегі — Меллона на замовлення Міністерства оборони США наприкінці 1980-х — на початку 1990-х років для оцінювання здатності підрядників якісно й передбачувано розробляти програмне забезпечення [8]. В основі моделі лежить теза про те, що якість кінцевого продукту визначається насамперед якістю та керованістю процесів, за допомогою яких цей продукт створюється, а отже, оцінювати варто саме зрілість процесів, а не лише характеристики результату.

Пізніше модель була розширена до Capability Maturity Model Integration (CMMI), яка нині адмініструється CMMI Institute (підрозділ ISACA) і визначає п'ять рівнів зрілості процесів: початковий (Initial) — процеси є непередбачуваними, слабо контрольованими та реактивними; керований (Managed) — процеси плануються, виконуються, вимірюються та контролюються на рівні окремих проєктів; визначений (Defined) — процеси стандартизовані та задокументовані на рівні всієї організації; кількісно керований (Quantitatively Managed) — процеси вимірюються й контролюються за допомогою статистичних та інших кількісних методів; оптимізований (Optimizing) — фокус зміщується на безперервне вдосконалення процесів на основі кількісного розуміння варіативності [9]. Кожен рівень характеризується специфічним набором «ключових областей процесу» (process areas), яких у різних доменах

СММІ налічується від 16 до 20-25, залежно від сфери застосування — розробки, надання послуг, управління постачальниками, а з версії 3.0, представленої в 2023 році, також даних, персоналу та віртуальних робочих середовищ.

Оцінювання відповідності певному рівню зрілості за методологією СММІ здійснюється за допомогою формалізованого методу SCAMPI (Standard CMMI Appraisal Method for Process Improvement), що передбачає структуроване оцінювання організаційних процесів акредитованими оцінювачами. Саме ця комбінація — чіткі рівні, поведінкові дескриптори для кожного рівня та формалізована методика оцінювання — і робить СММІ придатним прототипом для побудови галузевих моделей зрілості, зокрема в енергетичному менеджменті.

Ідея вимірювання зрілості за дискретними, ієрархічно впорядкованими рівнями виявилася настільки продуктивною, що була екстрапольована на десятки предметних областей — від управління проєктами, юзабіліті та інформаційної безпеки до гірничодобувної галузі, охорони здоров'я, екодизайну, управління активами та, зокрема, енергетичного менеджменту [6]. У науковій літературі із розробки моделей зрілості (maturity model engineering) сформувалися й методологічні рекомендації щодо їх індуктивної розробки, зокрема з використанням статистичних підходів на кшталт моделі Раша для узгодження складності дескрипторів з емпіричними даними, що, утім, застосовується в моделях енергоменеджменту вкрай рідко.

Узагальнюючи наукову літературу, дослідники енергетичного менеджменту виокремлюють щонайменше чотири основні підходи (потоки) до оцінювання практик управління енергією на підприємстві: (1) моделі мінімальних вимог, до яких належить, зокрема, стандарт ISO 50001, що встановлює обов'язковий перелік елементів системи енергоменеджменту без градації якості їх виконання; (2) моделі зрілості (maturity models) у власному розумінні терміна, які пропонують багаторівневу шкалу розвитку системи енергоменеджменту; (3) матриці енергоменеджменту (energy management matrices), що поєднують риси перших двох підходів, пропонуючи як перелік практик, так і елементи градації; (4) моделі характеристики заходів з енергоефективності (energy efficiency measures characterization frameworks), які фокусуються не на системі управління загалом, а на властивостях окремих технічних та організаційних заходів з енергозбереження [1]. У межах цієї статті основну увагу зосереджено саме на другому потоці — моделях зрілості, — водночас із розглядом моделі мінімальних вимог (ISO 50001) як методологічної точки відліку, від якої відштовхується більшість моделей зрілості.

Типова архітектура моделі зрілості енергоменеджменту включає чотири взаємопов'язані елементи: (а) набір вимірів або доменів оцінювання (наприклад, лідерство та відповідальність вищого керівництва, енергетична політика, моніторинг та вимірювання, компетентність персоналу, технології та обладнання, інтеграція з виробничими процесами); (б) шкалу рівнів зрілості, яка в переважній більшості моделей налічує від трьох до п'яти градацій; (в) описові критерії (дескриптори) для кожного поєднання «вимір × рівень», які визначають спостережувані ознаки, за якими підприємство відносить до того чи іншого рівня; (г) інструментарій діагностики — анкетування, самооцінювання, зовнішній аудит, індекси та бальні шкали, що застосовуються для практичного визначення поточного рівня. Саме варіативність цих чотирьох складових — від кількості вимірів (від трьох у мінімалістичних моделях до понад двадцяти в деталізованих) до способу верифікації заявленого рівня (від суб'єктивного самооцінювання до формалізованого зовнішнього аудиту) — і зумовлює істотні розбіжності між моделями, розглянутими в наступному розділі.

Найбільш розроблений науковий доробок з оцінювання зрілості енергоменеджменту становлять моделі, які прямо запозичують логіку СММІ, поєднуючи її з вимогами ISO 50001 та циклом Plan-Do-Check-Act (PDCA). До ключових належать щонайменше шість моделей.

Energy and Utility Management Maturity Model (EUMMM), запропонована Ngai та співавторами на основі дослідження виробничих підприємств, побудована на п'яти рівнях зрілості поведінкових характеристик організації, визначених через досягнення конкретних ключових областей процесу за аналогією з класичним СММІ [3]. Автори наголошують, що модель дозволяє не лише оцінити поточний стан, а й окреслити конкретні наступні кроки для

переходу на вищий рівень, що є однією з ключових практичних переваг підходу порівняно з бінарною сертифікацією.

Energy Management Maturity Model (EMMM), розроблена Introna та співавторами, є організаційним інструментом для стимулювання неперервного зниження споживання енергії, що охоплює п'ять вимірів, які характеризуються через ідентифікацію необхідних елементів у сегменті споживання енергії на підприємстві, і передбачає процедуру самооцінювання [4]. Особливістю цієї моделі, на яку звертають увагу критичні огляди, є відсутність явного включення до дескрипторів фігури виділеного енергетичного менеджера, що дещо обмежує її діагностичну повноту порівняно з моделями, які таку роль враховують.

Модель Antunes, Carreira та Mira da Silva спирається на PDCA-цикл як організаційну основу побудови дескрипторів і була валідована на кількох організаціях різних галузей, що дало змогу авторам підтвердити практичну відтворюваність усіх передбачених рівнів зрілості в реальних умовах [5]. Водночас ця модель також не інтегрує явно позицію енергетичного менеджера, натомість наголошуючи на підтримці з боку вищого керівництва як ключовому фактору просування підприємства щаблями зрілості.

Energy Management Maturity Model, побудована на основі ISO 50001 (EMMM50001), яку запропонували Jovanović та Filipović, поєднує процеси ISO 50001, фази PDCA та критерії СММІ в єдину базу знань, що, за твердженням авторів, становить методологічну новизну дослідження [6]. Це дало змогу диференціювати підприємства, які вже формально сертифіковані за ISO 50001, за фактичним рівнем досконалості практик — тобто модель безпосередньо усуває один із ключових недоліків самого стандарту ISO 50001, який окреслено в підрозділі 2.3. Модель встановлює співвідношення між рівнями EUMMM, специфікаціями ISO 50001 та фазами PDCA, а також, на відміну від низки інших моделей, явно враховує роль підтримки з боку вищого керівництва в поєднанні з фігурою енергетичного менеджера.

Модель для багатоплощадкових міжнародних організацій, розроблена Finnerty та співавторами, додатково враховує специфіку компаній із глобальною присутністю, для яких характерна необхідність узгодження практик енергоменеджменту між територіально розосередженими виробничими майданчиками з різним вихідним рівнем зрілості та різним регуляторним середовищем [7]. Ця модель, як і EMMM50001, явно враховує поєднання підтримки вищого керівництва та наявності відповідального за енергоменеджмент персоналу.

Нарешті, Energy Efficiency Maturity (EEM) framework, запропонований Прашаром, розроблено спеціально для енергоємних малих і середніх підприємств (МСП); автор аргументує, що узагальнені моделі, розраховані на великі компанії, — зокрема EUMMM, EM3, EMMM та EMMM50001 — погано застосовні до МСП через відмінності в ресурсній забезпеченості, організаційній структурі та доступі до кваліфікованого персоналу, а тому потребують окремого, спеціально адаптованого підходу [2]. Апробація моделі здійснена на прикладі сектору переробки сталі (steel re-rolling) в Індії.

Спільною рисою всієї цієї групи моделей є використання п'ятирівневої шкали зрілості за аналогією з СММІ та фокус на управлінських, а не суто технічних характеристиках енергоменеджменту, зокрема таких, як розподіл відповідальності, документування процесів, моніторинг показників та залученість вищого керівництва. Водночас, як зазначають Nasan і Trianni у своєму систематичному огляді моделей оцінювання енергетичного менеджменту, більшість цих моделей мають обмежену емпіричну валідацію: апробація нерідко здійснюється на одному підприємстві, в межах одного пілотного дослідження або одного галузевого сектору, що ставить під сумнів узагальнюваність висновків і можливість прямого перенесення дескрипторів на підприємства інших галузей чи країн [1].

Другий напрям становлять моделі, розроблені в межах державних програм підвищення енергоефективності промисловості США. Найбільш показовою є програма Superior Energy Performance (SEP), розроблена Департаментом енергетики США (DOE) спільно з U.S. Council for Energy-Efficient Manufacturing на основі стандарту ISO 50001 [10]. Програма передбачає незалежний аудит підприємства третьою стороною та присвоєння одного з трьох рівнів досягнутих результатів — Silver, Gold або Platinum — залежно від документально

підтвердженого поліпшення енергетичної результативності [10]. Розробка програми, розпочата ще в межах ініціативи «Management System for Energy 2000», реалізовувалася як партнерство промисловості, органів стандартизації (ANSI), кількох федеральних агентств, національних лабораторій, університетів і галузевих технічних експертів, а метою програми на національному рівні визначено сприяння досягненню цілі зниження енергоємності промисловості на 25% протягом десятиліття.

За оцінками дослідників національної лабораторії імені Лоуренса в Берклі, які проаналізували перші 17 сертифікованих підприємств демонстраційної програми SEP (з понад 40 підприємств, що брали участь у національній демонстраційній програмі), середній термін окупності інвестицій, пов'язаних із впровадженням системи енергоменеджменту в межах SEP, становив приблизно 1,7 року [11]. Практичні кейси, зокрема підприємства General Dynamics у штаті Пенсільванія, підтверджують можливість досягнення поліпшення енергетичної результативності майже на 12% завдяки поєднанню вимог SEP та ISO 50001, включно з моделюванням енергоємності окремих виробничих процесів, зокрема системи виробництва пари, що дало змогу обґрунтувати заміну котельного обладнання на енергоефективніше [12]. У межах програми фахівці підприємства наголошують на доцільності виходу за рамки мінімально необхідних заходів («не варто робити лише мінімум для підвищення енергоефективності») як умови отримання суттєвіших результатів.

Модель SEP фактично поєднує риси сертифікаційної системи (аналогічно ISO 50001) із елементами градації результату (рівні Silver/Gold/Platinum), що наближає її до моделі зрілості; однак принципова відмінність полягає в тому, що ця градація базується передусім на кількісному показнику досягнутого поліпшення енергетичної результативності за визначений період, а не на якісній оцінці зрілості управлінських процесів як таких, на відміну від CMMI-похідних моделей, розглянутих у попередньому підрозділі. Це робить SEP більш об'єктивною (оскільки результат верифікується незалежним аудитором на основі вимірюваних даних), але водночас менш придатною для діагностики конкретних управлінських прогалин, які підприємству варто усунути для подальшого прогресу.

Істотним обмеженням моделі SEP є її контекстна прив'язка до нормативного середовища й інфраструктури підтримки США — акредитовані аудитори ANSI, мережа національних лабораторій, галузеві асоціації енергоефективного виробництва, — що ускладнює її пряме перенесення на підприємства інших країн без істотної інституційної адаптації. Крім того, необхідність залучення незалежного зовнішнього аудитора третьої сторони робить проходження повного циклу оцінювання SEP відносно витратним порівняно з моделями самооцінювання, розглянутими в підрозділі 2.1, що обмежує доступність цього інструменту саме для малих і середніх підприємств.

Міжнародний стандарт ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту — Вимоги та настанова щодо використання» є найбільш поширеною формалізованою основою для впровадження енергоменеджменту у світі. Стандарт побудований на циклі Plan-Do-Check-Act і встановлює вимоги до енергетичної політики, енергетичного планування, впровадження та функціонування, перевіряння показників результативності та аналізування системи з боку вищого керівництва, забезпечуючи сумісність з іншими стандартами систем управління ISO [13]. Чинна редакція стандарту, ISO 50001:2018, розроблена технічним комітетом ISO/TC 301 «Енергетичний менеджмент та енергозбереження», переглянута й підтверджена у 2024 році без внесення змін до основного тексту, що засвідчує стабільність закладеної в ній методології [13].

В Україні стандарт імплементовано як національний — ДСТУ ISO 50001:2014, що є ідентичним перекладом ISO 50001:2011 і містить вимоги, узгоджені з чинним законодавством України, а відповідальним за стандарт визначено технічний комітет ТК 48 «Енергозбереження» [14]. Практичне впровадження стандарту на промислових підприємствах активно підтримується міжнародними технічними проектами, зокрема спільним проектом UNIDO/GEF «Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України», метою якого визначено поширення концепції індустріальної енергетичної

результативності через впровадження систем енергоменеджменту відповідно до серії стандартів ISO 50000 та оптимізацію енерговикористання в промисловості [15]. У межах проєкту розроблено практичне керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту згідно зі стандартом ISO 50001:2018, а також організовано дводенні навчальні тренінги користувачького рівня (User-Level EnMS Training) для фахівців промислових підприємств у кількох містах України, а для консультантів, які надають послуги з енергоменеджменту, — низку модульних навчальних раундів [15]. Родина стандартів ISO 50000 при цьому продовжує розвиватися: зокрема, стандарт ISO 50005 пропонує поетапний підхід до впровадження системи енергоменеджменту, застосовний до організацій будь-якого розміру, у межах якого зрілість системи наприкінці кожної з послідовних фаз впровадження характеризується за допомогою п'ятирівневої матриці зрілості, що є прямим свідченням визнання самим міжнародним органом стандартизації потреби в градації рівня зрілості системи, а не лише в бінарній констатації її наявності чи відповідності.

Разом з тим, як зазначають Hasan та Trianni, стандарт ISO 50001 за своєю природою є моделлю мінімальних вимог: він встановлює перелік обов'язкових елементів системи енергоменеджменту, структурований у десять розділів з гомологічною архітектурою, однак у своїй базовій (сертифікаційній) формі не передбачає критичного оцінювання якісного рівня ефективності впровадження цих елементів на підприємстві [1]. Сертифікація за ISO 50001 має здебільшого бінарний характер (система або відповідає вимогам стандарту, або ні), тоді як фактичний рівень зрілості практик у сертифікованих організаціях може суттєво відрізнятись — від формального виконання мінімально необхідних процедур до глибоко інтегрованої в бізнес-процеси культури енергоефективності. Це підтверджують і сучасні дослідження бар'єрів впровадження ISO 50001: систематичний аналіз наукових публікацій, що охопив 14 відібраних досліджень і виявив 30 окремих бар'єрів, згрупованих у 13 категорій, засвідчує типові проблеми — обмежену прозорість даних, неструктуровані процеси, нечіткий розподіл відповідальності, недостатній подальший контроль за виконанням заходів з поліпшення та брак сформованої культури енергоменеджменту навіть у формально сертифікованих організаціях [18]. Крім того, дослідження на основі контент-аналізу кейсів впровадження ISO 50001 засвідчує, що підтримка з боку вищого керівництва є критичним фактором успіху, тоді як головним бар'єром практики залишається саме відсутність сформованої культури енергетичного менеджменту, а не технічні обмеження як такі. Ці спостереження безпосередньо підтверджують тезу про те, що самої формальної відповідності стандарту недостатньо для гарантії високого рівня фактичної зрілості системи управління.

Концепція четвертої промислової революції породила значну кількість моделей зрілості, спрямованих на оцінювання готовності підприємства до впровадження кіберфізичних систем, Інтернету речей, великих даних, хмарних обчислень та інших цифрових технологій у виробництві. У ґрунтовному порівняльному дослідженні Шумахер і Гронау проаналізували десять найбільш значущих моделей зрілості Industry 4.0, зокрема з погляду повноти охоплення таких вимірів, як енергоефективність, лідерство, бізнес-моделі, інновації, орієнтація на МСП, управлінська складова, захист інтелектуальної власності («product piracy»), ресурсна ефективність, стратегія та прибутковість [16]. Автори доходять висновку, що жодна з розглянутих моделей не охоплює всі релевантні аспекти однаковою мірою, а рівень практичної застосовності моделей істотно варіюється залежно від галузі та розміру підприємства, для якого вони розроблялися.

Систематичний огляд моделей зрілості Industry 4.0 також свідчить, що більшість моделей розроблялися для широкого кола виробничих підприємств без урахування галузевої специфіки та не завжди пройшли повноцінну емпіричну валідацію — валідація нерідко обмежується суб'єктивною експертною оцінкою невеликої кількості респондентів з обмеженої кількості підприємств, а критерії повноти охоплення вимірів, придатності для мети використання, об'єктивності та рівня деталізації часто не витримуються одночасно жодною з розглянутих моделей. Дослідження, присвячені застосовності моделей зрілості Industry 4.0 у специфічних галузях, зокрема нафтогазовому секторі upstream, додатково підтверджують, що жодна з

наявних моделей не пройшла валідацію безпосередньо в цій галузі, а розбіжності в поглядах різних авторів на виміри та рівні зрілості моделей ускладнюють вибір придатного інструменту для конкретного галузевого контексту.

Що стосується енергетичного виміру, дослідження, присвячені впливу технологій Industry 4.0 на практики енергоменеджменту, зокрема на прикладі шведських підприємств автомобільної та машинобудівної галузей, показують, що ці технології найбільш відчутно впливають на такі складові, як обізнаність (awareness), підключеність та інтеграція систем (connectivity & integration) і візуалізація даних, тоді як безпосередня інтеграція енергетичного менеджменту у виробничий процес у більшості моделей Industry 4.0 залишається фрагментарною й недостатньо опрацьованою, оскільки автори таких моделей здебільшого класифікують технології Industry 4.0 за кластерами (система, інфраструктура, сервіс, процес) без наскрізного зв'язку з конкретними енергетичними індикаторами результативності.

Окремий, хоча й тісно пов'язаний з Industry 4.0, напрям становлять моделі зрілості «розумного виробництва» (Smart Manufacturing). Показовим прикладом є Smart Manufacturing Maturity Model для малих і середніх підприємств (SM3E), запропонована Mittal, Romero та Wuest, яка побудована як тривимірна модель: організаційні виміри (фінанси, персонал, стратегія, процеси, продукт) становлять вісь X, набір із семи взаємодоповнюваних інструментальних «скриньок» (toolboxes) — вісь Y, а п'ять рівнів зрілості для кожного організаційного виміру — вісь Z [17]. Модель розроблялася на основі критичного огляду літератури та інтерв'ю з представниками МСП, проведених під час візитів на підприємства, і спрямована на подолання специфічної проблеми — брак самостійних методів оцінювання цифрової трансформації, доступних малим підприємствам без залучення дорогих зовнішніх консультантів; за задумом авторів, застосування моделі дозволяє підприємству самостійно визначити свій рівень зрілості за кожним організаційним виміром і виявити, які інструментальні «скриньки» необхідні для переходу на наступний рівень [17].

Узагальнювальний огляд моделей зрілості розумного виробництва, підготовлений дослідниками Університету Теннессі та Окриджської національної лабораторії Департаменту енергетики США, мав на меті проаналізувати виміри та рівні зрілості наявних моделей Smart Manufacturing для оцінювання їх застосовності та недоліків [18]. Результати огляду показали, що, попри значну кількість запропонованих моделей, багато з них не пройшли належної валідації або не забезпечують практичного інструментарію застосування, що створює потребу в подальшому критичному аналізі їх застосовності для конкретних виробничих контекстів [18]. Ще одне дослідження, підготовлене в межах ініціативи NIST (National Institute of Standards and Technology), присвячене концепціям моделей зрілості сталого виробництва, окремо звертає увагу на те, що низка авторів пропонували об'ємні набори (до 24) матриць зрілості, орієнтованих на широкий спектр організаційних спроможностей — безпеку, енергетику, дослідження й розробки, управління проектами, командну роботу, — однак ці розробки здебільшого не деталізують специфіку окремих вузлів у ланцюгах постачання, що обмежує їх пряму застосовність до промислового енергоменеджменту.

Це узгоджується із загальним висновком щодо моделей Industry 4.0: технологічна орієнтованість моделей Smart Manufacturing часто випереджає розвиток їхньої управлінської складової, тоді як саме управлінська зрілість — розподіл відповідальності, компетентність персоналу, регулярність моніторингу — визначає стійкість здобутих поліпшень енергоефективності. Технологічно розвинене, але управлінськи незріле підприємство ризикує отримати короткостроковий ефект від впровадження цифрових інструментів без довгострокової трансформації культури енергоспоживання.

Моделі цифрової зрілості акцентують увагу на готовності підприємства функціонувати в умовах цифрової економіки загалом, не обмежуючись виробничими технологіями, а охоплюючи стратегію, організаційну структуру, персонал, культуру та маркетинг. Показовим є дослідження Полянської та співавторів, у якому на прикладі енергетичних підприємств України розроблено авторську модель оцінювання цифрової зрілості за такими дескрипторами системи управління підприємством, як стратегія, персонал, організаційна культура, технології,

структура та маркетинг, із застосуванням методів теорії нечітких множин та інтервальних шкал [19]. На основі опитування, проведеного на українських енергетичних підприємствах, автори визначили як інтегральний рівень цифрової зрілості, так і рівень зрілості за окремими складовими, що дало змогу сформулювати орієнтовані рекомендації щодо пріоритетних напрямів цифрової трансформації для конкретних підприємств [19]. Пов'язане дослідження впливу цифрової зрілості на ефекти сталого розвитку в енергетичному секторі України, що спирається на статистичний та макроекономічний аналіз передумов цифровізації українських енергетичних компаній і застосовує метод бенчмаркінгу для виокремлення кращих зразків цифрових змін закордонних енергокомпаній у сфері сталого розвитку, обґрунтовує ефективність підприємств завдяки впровадженню цифрової трансформації, яка дає змогу досягти екологічного, економічного та соціального ефекту сталого розвитку.

У міжнародному контексті значний внесок становить огляд Carvalhosa та співавторів, опублікований у виданні IEEE Access, який пропонує комплексний огляд цифрових сервісів і продуктів в енергетичному секторі із фокусом на технологіях штучного інтелекту та об'єднаних просторів даних (Connected Data Spaces) та оцінює рівні зрілості й адаптації цих рішень за допомогою методів нечіткої логіки, що дало змогу компенсувати брак деталізованої інформації в наявній літературі й пояснити причини розбіжностей між високим рівнем зрілості окремих цифрових рішень та їх низьким рівнем практичного застосування (і навпаки) [20]. Дослідження компанії Strategy&PwC фіксує, що частка цифрових бізнес-моделей енергетичних компаній зросла з 17% у 2019 році до 24% у 2023 році, однак досі відстає від власних амбіцій компаній сектору, що свідчить про повільність практичної цифрової трансформації навіть за наявності відповідних стратегічних намірів і достатнього усвідомлення необхідності диверсифікації доходів за межі традиційного продажу кіловат-годин [21].

Спільним недоліком моделей цифрової зрілості є відсутність єдиного концептуального розуміння самого поняття «цифрова зрілість»: різні автори по-різному визначають набір вимірів і рівнів (від технологічно орієнтованих індексів до моделей, побудованих переважно на управлінських і культурних дескрипторах), що ускладнює порівняння результатів між дослідженнями та підприємствами різних країн. Крім того, більшість моделей цифрової зрілості не мають безпосереднього кількісного зв'язку з показниками енергетичної результативності (EnPI), тобто високий рівень цифрової зрілості не гарантує автоматичного поліпшення енергоефективності, якщо цифрові інструменти не інтегровані в контур управління енергією підприємства, а залишаються ізольованими ІТ-ініціативами.

Останніми роками зростання вимог до нефінансової звітності, зокрема в контексті європейської Директиви щодо звітності про сталий розвиток компаній (CSRD), зумовило поширення моделей ESG-зрілості (Environmental, Social, Governance), які оцінюють ступінь інтеграції екологічних, соціальних та управлінських факторів у бізнес-процеси підприємства. Такі моделі, як правило, включають кілька стадій — від початкового усвідомлення (awareness) через послідовне узгодження стратегії з вимірюваними цілями до повної інтеграції ESG-цілей у щоденну операційну діяльність, включаючи постачання, управління ланцюгом поставок і навчання персоналу [22]. На найвищому рівні зрілості організація має чітку ESG-стратегію, що є не статичним дороговказом, а динамічним інструментом, який постійно оновлюється відповідно до перегляду цілей та очікувань стейкхолдерів [22]. Серед типових метрик, які використовуються в моделях ESG-зрілості, окремо виділяється зниження споживання енергії як один з базових індикаторів екологічного виміру [22].

На вищих рівнях ESG-зрілості дані про сталий розвиток інтегруються в режимі реального часу в процес прийняття управлінських рішень на рівні вищого керівництва, а сама компанія отримує операційні переваги, зокрема зниження витрат, пов'язаних зі споживанням енергії, відходами та логістикою ланцюга постачання, розширений доступ до капіталу через зниження вартості залучення фінансування та підвищену регуляторну стійкість [23]. Водночас останні тенденції свідчать про певну раціоналізацію ESG-порядку денного компаній: у контексті посилення уваги європейських інституцій до пропорційності регуляторного навантаження та

адміністративного спрощення частина організацій скорочує периферійні ESG-ініціативи на користь проєктів із прямим операційним ефектом, зокрема заходів з підвищення енергоефективності активів, а самі підрозділи сталого розвитку дедалі щільніше інтегруються в ключові операційні функції — виробництво, фінанси, промислову стратегію [24]. За даними Міжнародного енергетичного агентства, на які посилаються дослідники сталого розвитку, понад 70% глобальних викидів CO₂ наразі покриваються тими чи іншими зобов'язаннями про досягнення нульового рівня викидів, а кількість організацій, які звітують відповідно до стандартів Global Reporting Initiative (GRI), у 2024 році перевищила 13 тисяч у майже 100 країнах світу, що на понад 20% більше порівняно з попереднім періодом [24].

Принциповим недоліком моделей ESG-зрілості з погляду завдань енергетичного менеджменту є те, що енергоефективність у них постає лише одним з багатьох індикаторів екологічного виміру серед десятків інших (викиди парникових газів, водокористування, поводження з відходами, біорізноманіття, а також соціальні та управлінські показники), а самі моделі здебільшого мають якісний, консультативний характер, розроблений консалтинговими компаніями для власних клієнтів, без чіткої методологічної прив'язки до технічних показників енергетичної результативності або визнаних інженерних стандартів на кшталт ISO 50001. Це принципово відрізняє ESG-моделі від технічно орієнтованих CMMI-похідних та DOE-моделей, розглянутих вище, і робить їх радше стратегічним, ніж операційним інструментом управління енергоефективністю.

Узагальнення розглянутих моделей за низкою спільних критеріїв — походженням і розробником, кількістю рівнів зрілості, предметним фокусом, наявністю кількісних енергетичних індикаторів, орієнтацією на розмір підприємства та ступенем емпіричної валідації — представлено в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика моделей оцінювання зрілості систем управління енергоефективністю

Модель / джерело	Розробник, рік	К-сть рівнів	Предметний фокус	Кількісн і EnPI	Валідація
EUMMM	Ngai et al., 2013 [3]	5	Управлінські процеси, CMMI-логіка	Опосередковано	1 виробниче підприємство
EMMM	Introna et al., 2014 [4]	5	Самооцінювання, скорочення споживання	Ні	Обмежена, пілотна
EMMM50001	Jovanović, Filipović, 2016 [6]	5	Інтеграція ISO 50001 + PDCA + CMMI	Так (непрямо)	Промислова апробація
Модель Antunes et al.	Antunes et al., 2014 [5]	5	PDCA-цикл, кілька галузей	Ні	Кілька організацій
ЕЕМ (для МСП)	Prashar, 2017 [2]	5	МСП, енергоємні галузі	Частково	1 галузь (сталь, Індія)
Superior Energy Performance (SEP)	DOE / US CEEM [10–12]	3 (Silver/Gold/Platinum)	Кількісна результативність + ISO 50001	Так	Незалежний аудит 3-ї сторони
ISO 50001:2018	ISO/TC 301 [13, 14]	0 (бінарна відповідність)	Мінімальні вимоги, PDCA	Так (EnPI)	Сертифікаційний аудит
Моделі Industry 4.0 (10 моделей)	Schumacher, Gronau, 2025 [16]	3–6 (варіюється)	Технологічна готовність	Рідко	Здебільшого експертна
SM3E	Mittal, Romero, Wuest, 2018 [17]	5	Розумне виробництво, МСП	Ні	Інтерв'ю на підприємствах
Digital Maturity (енергетика)	Polyanska et al., 2022 [19]	Індекс (нечітка логіка)	Стратегія, персонал, культура, технології	Ні	Опитування укр. енергопідприємств

ESG Maturity	CrossCountry, Novisto [22, 23]	3–5 (авторські)	Екологічний/соц./управлінський вимір	Ні (якісно)	Консультаційна, без формальної валідації
--------------	--------------------------------	-----------------	--------------------------------------	-------------	--

Джерело даних: складено автором на основі [1–24].

Порівняльний аналіз, узагальнений у таблиці 1, засвідчує, що жодна з розглянутих груп моделей не поєднує одночасно: (а) детальну управлінську діагностику на кшталт CMMI-похідних моделей, здатну вказати підприємству конкретні наступні кроки розвитку; (б) кількісні, незалежно верифіковані енергетичні показники результативності на кшталт SEP та вимог ISO 50001; (в) технологічний вимір готовності до цифрового виробництва на кшталт Industry 4.0 і Smart Manufacturing; (г) організаційно-культурний цифровий вимір на кшталт Digital Maturity; (д) інтеграцію в ширший стратегічний контур сталого розвитку та нефінансової звітності на кшталт ESG. Кожна модель є оптимізованою під конкретну предметну область і конкретного розробника (науковий колектив, державне агентство, консалтингову компанію), що зумовлює її обмежену придатність для комплексного, наскрізного оцінювання підприємства й змушує практиків обирати або поєднувати кілька моделей одночасно, що на практиці рідко відбувається через ресурсомісткість такого поєднання.

Показово, що моделі також суттєво різняться за орієнтацією на розмір підприємства: класичні CMMI-похідні моделі (EUMMM, EMMM, EMMM50001) та SEP розроблялися переважно для великих промислових підприємств з виділеним персоналом енергоменеджменту, тоді як лише окремі моделі — ЕЕМ Прашара [2] та SM3E [17] — спеціально адаптовані для МСП. Моделі цифрової та ESG-зрілості здебільшого декларують універсальну застосовність, однак фактична апробація в обох випадках здійснювалася переважно на середніх і великих організаціях з достатніми ресурсами для проведення структурованого опитування чи консультаційного аудиту.

На основі проведеного огляду можна виокремити сім спільних методологічних та практичних недоліків, притаманних більшості розглянутих моделей оцінювання зрілості систем управління енергоефективністю.

По-перше, фрагментарність предметного охоплення. Кожна з розглянутих груп моделей охоплює лише частину релевантних аспектів управління енергоефективністю: CMMI-похідні моделі концентруються на управлінських процесах, DOE/SEP та ISO 50001 — на формальній відповідності вимогам і кількісній результативності, Industry 4.0 та Smart Manufacturing — на технологічній готовності, Digital Maturity — на цифровій інфраструктурі та організаційній культурі, ESG — на нефінансовій звітності та стратегічній інтеграції. Жодна з розглянутих моделей не інтегрує всі ці виміри в єдину систему оцінювання, що змушує підприємство, зацікавлене в комплексній діагностиці, самостійно поєднувати результати кількох незалежних оцінювань без методологічно обґрунтованого механізму їх зведення в єдиний показник.

По-друге, відсутність єдиної шкали та термінологічної узгодженості. Кількість рівнів зрілості варіюється від трьох до шести залежно від моделі, а самі назви й змістове наповнення рівнів (наприклад, «початковий — керований — визначений — кількісно керований — оптимізований» у CMMI-похідних моделей проти «Silver — Gold — Platinum» у SEP, довільних авторських шкал у моделях цифрової та ESG-зрілості, або описових позначень на кшталт «прихильники» та «новатори» у деяких консалтингових ESG-моделей) не є взаємно порівнянними, що унеможливує пряме зіставлення результатів оцінювання, здійснених за різними моделями, і, як наслідок, унеможливує формування єдиного галузевого бенчмарку зрілості енергоменеджменту.

По-третє, слабка емпірична валідація. Як зазначають Hasan і Trianni, значна частина моделей енергетичного менеджменту апробована на обмеженій вибірці — часто на одному підприємстві, в межах одного пілотного дослідження чи одного галузевого сектору [1], що ставить під сумнів статистичну надійність і узагальнюваність запропонованих рівнів і дескрипторів. Аналогічний висновок роблять дослідники моделей зрілості Smart Manufacturing [18] та Industry 4.0 [16], вказуючи на брак чіткого опису методології розробки

та валідації в переважній більшості публікацій, а також на суб'єктивність і невелику кількість респондентів, залучених до підтвердження запропонованих моделей.

По-четверте, орієнтація на великі підприємства та недостатня адаптованість для МСП. Більшість класичних моделей CMMI-похідного типу, а також модель SEP розроблялися й тестувалися на великих промислових підприємствах з розвинутою організаційною структурою та виділеним персоналом з енергоменеджменту, тоді як малі та середні підприємства, на які, за оцінками дослідників, припадає істотна частка сукупного промислового енергоспоживання, потребують суттєво спрощених, менш ресурсомістких і менш витратних інструментів самооцінювання; станом на сьогодні лише поодинокі моделі (EEM, SM3E) враховують цю специфіку належним чином [2, 17].

Розрив між технологічним і управлінським вимірами. Моделі Industry 4.0 та Smart Manufacturing акцентують увагу передусім на технологічній готовності (наявність сенсорів, IoT-платформ, систем аналітики даних, кіберфізичних систем), тоді як фактична трансформація цих технологічних можливостей у стійке зниження енергоспоживання залежить від управлінської зрілості — наявності енергетичної політики, чіткого розподілу відповідальності, компетентного персоналу, регулярного моніторингу показників, — що є предметом CMMI-похідних та ISO 50001-моделей. Роз'єднане, а не інтегроване застосування цих двох груп моделей знижує практичну цінність кожної з них окремо: підприємство може мати високий рівень технологічної готовності за оцінкою моделі Industry 4.0, водночас демонструючи низький рівень управлінської зрілості за CMMI-похідною моделлю, і в такому разі інвестиції в цифрові технології не транслюються в стійке підвищення енергоефективності.

По-шосте, брак кількісного зв'язку «м'яких» моделей з енергетичними індикаторами. Моделі цифрової та ESG-зрілості здебільшого оперують якісними, суб'єктивними або експертними оцінками (анкетування, бали, категорійні шкали, оцінювання методами нечіткої логіки) без прямого узгодження з визнаними технічними показниками енергетичної результативності (Energy Performance Indicators, EnPI), що передбачені стандартом ISO 50001 [13]. Водночас для універсального застосування кількісні показники результативності мають визначатися з урахуванням виду діяльності підприємства, оскільки показник енергоспоживання на одиницю продукції не є придатним для підприємств, діяльність яких не пов'язана з виробництвом матеріальної продукції.

Недостатнє врахування специфіки трансформаційних економік. Переважна більшість розглянутих моделей розроблена та валідована на матеріалах підприємств розвинених країн (США, країни ЄС, Швеція, Італія, Сербія, Індія), тоді як для підприємств трансформаційних економік, включно з українськими, характерні специфічні обмеження — волатильність тарифів на енергоносії, обмежений доступ до пільгового фінансування енергоефективних проєктів, неповна інституційна інфраструктура підтримки (обмежена кількість сертифікованих аудиторів, консультантів з енергоменеджменту), а в умовах повномасштабної збройної агресії — і фізичні пошкодження об'єктів енергетичної інфраструктури, дефіцит потужностей та необхідність адаптації режимів роботи підприємства до графіків обмежень електропостачання, що істотно змінює пріоритети та можливості впровадження заходів з енергоефективності порівняно з умовами мирного часу в розвинених країнах. Дослідження цифрової зрілості українських енергетичних підприємств [19] та впливу цифрової зрілості на ефекти сталого розвитку в енергетичному секторі України залишаються одними з нечисленних виключень, що підтверджує актуальність системної адаптації існуючих

Виявлені сім груп недоліків дають підстави сформулювати п'ять взаємопов'язаних напрямів подальшого розвитку існуючих підходів до оцінювання зрілості систем управління енергоефективністю підприємств.

Перший напрям — формування багатовимірного інтегрованого підходу, який забезпечував би комплексне оцінювання основних складових системи управління енергоефективністю в межах єдиної архітектури та узгодженої шкали. Такий підхід має поєднувати сильні сторони управлінських, енергетичних, технологічних, цифрових та ESG-моделей, не обмежуючись наперед визначеним набором їхніх доменів. Важливою вимогою є

можливість оцінювати не лише рівень розвитку окремих складових, а й збалансованість їх розвитку, оскільки високий рівень одних напрямів може поєднуватися з критичним відставанням інших.

Другий напрям — розвиток кількісного представлення результатів оцінювання та їх зв'язку з фактичними показниками діяльності підприємства. Показники енергетичної результативності (EnPI, за методологією ISO 50001 та ISO 50006) доцільно використовувати як важливе джерело об'єктивних даних, однак їх конкретний склад має відповідати виду діяльності підприємства. Кількісне оцінювання повинно забезпечувати можливість порівняння, повторного вимірювання та відстеження динаміки без обов'язкової прив'язки до одного універсального показника, наприклад енергоспоживання на одиницю продукції.

Третій напрям — забезпечення універсальності та практичності інструменту для підприємств різного розміру й галузевої належності. З урахуванням підходу Прашара для енергоємних МСП [2] та SM3E для розумного виробництва на МСП [17] процедура оцінювання має бути достатньо простою для самостійного застосування, не вимагати обов'язкового залучення зовнішнього аудитора та оцінювати насамперед фактичне виконання відповідних управлінських функцій, а не формальну наявність спеціалізованих підрозділів чи складних інформаційних систем.

Четвертий напрям — методологічна валідація та забезпечення повторюваності оцінювання на вибірці підприємств різних галузей і розмірних категорій. Повторне застосування методики має дозволяти не лише визначати поточний стан системи, а й відстежувати динаміку її розвитку та перевіряти, наскільки реалізовані управлінські заходи впливають на результати наступного оцінювання. Це дозволить подолати характерну для значної частини наявних моделей проблему обмеженої емпіричної апробації.

П'ятий напрям — адаптація підходу до специфічних умов функціонування підприємств, зокрема трансформаційних економік та України, з урахуванням волатильності тарифів на енергоносії, доступності фінансування, стану інституційної інфраструктури підтримки енергоменеджменту та безпекових факторів. Енергетична стійкість, резервне живлення, диверсифікація джерел енергопостачання, гнучкість навантаження та готовність до перебоїв доцільно враховувати в межах відповідних складових системи управління, не виділяючи резильєнтність як обов'язковий окремий вимір універсальної моделі.

Реалізація зазначених напрямів у перспективі дозволить сформувати практично застосовний комплексний інструмент, який поєднуватиме сильні сторони класичних CMMI-похідних моделей, кількісну орієнтацію SEP і стандарту ISO 50001, технологічні можливості моделей Industry 4.0 та Smart Manufacturing, інформаційно-аналітичні можливості моделей цифрової зрілості й стратегічну орієнтованість ESG-підходів. При цьому результатом оцінювання має бути не лише визначення поточного рівня зрілості, а й виявлення диспропорцій між складовими та формування пріоритетних напрямів подальшого розвитку системи управління енергоефективністю підприємства.

У результаті систематизації семи груп моделей оцінювання зрілості систем управління енергоефективністю підприємств — CMMI-похідних (EUMMM, EMMM, EMMM50001, моделі Antunes та Finnerty, EEM Прашара), DOE/SEP, ISO 50001, Industry 4.0, Smart Manufacturing (зокрема SM3E), Digital Maturity та ESG — встановлено, що кожна з них вирішує лише частину завдання комплексної діагностики енергетичного менеджменту, будучи оптимізованою під конкретний предметний контекст, галузь застосування та аудиторію розробників (академічні дослідницькі колективи, державні агентства, консалтингові компанії).

Спільними для більшості моделей недоліками є: фрагментарність предметного охоплення; відсутність єдиної узгодженої шкали зрілості та термінологічна неузгодженість; слабка емпірична валідація на обмежених вибірках; орієнтація переважно на великі підприємства розвинених країн за недостатньої адаптованості до потреб малих і середніх підприємств; розрив між технологічним і управлінським вимірами оцінювання; брак кількісного зв'язку «м'яких» моделей (цифрової та ESG-зрілості) з верифікованими енергетичними показниками

результативності; недостатнє врахування специфіки трансформаційних економік, зокрема безпекових факторів функціонування енергетичної інфраструктури в умовах, актуальних для сучасної України.

Подолання виявлених обмежень потребує подальшого розвитку інтегрованих підходів до оцінювання зрілості систем управління енергоефективністю, які забезпечують комплексне та кількісне оцінювання основних складових системи, враховують збалансованість їх розвитку, є придатними для підприємств різного розміру та виду діяльності й дозволяють пов'язати результати оцінювання з визначенням пріоритетних управлінських дій. Перспективи подальших досліджень пов'язані з формуванням критеріїв і шкали такого оцінювання, розробленням механізму узагальнення результатів, його апробацією на підприємствах різних галузей та повторним застосуванням для оцінювання динаміки розвитку системи.

Список літератури:

- 1) Hasan, A. S. M. M., & Trianni, A. (2020). A review of energy management assessment models for industrial energy efficiency. *Energies*, 13(21), 5713. <https://doi.org/10.3390/en13215713>
- 2) Prashar, A. (2017). Energy efficiency maturity (EEM) assessment framework for energy-intensive SMEs: Proposal and evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1187–1201. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.116>
- 3) Ngai, E. W. T., Chau, D. C. K., Poon, J. K. L., & To, C. K. M. (2013). Energy and utility management maturity model for sustainable manufacturing process. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 453–464. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.12.018>
- 4) Introna, V., Cesarotti, V., Benedetti, M., Biagiotti, S., & Rotunno, R. (2014). Energy Management Maturity Model: An organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies. *Journal of Cleaner Production*, 83, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.001>
- 5) Antunes, P., Carreira, P., & Mira da Silva, M. (2014). Towards an energy management maturity model. *Energy Policy*, 73, 803–814. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.011>
- 6) Jovanović, B., & Filipović, J. (2016). ISO 50001 standard-based energy management maturity model – proposal and validation in industry. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2744–2755. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.023>
- 7) Finnerty, N., Sterling, R., Coakley, D., & Keane, M. M. (2017). An energy management maturity model for multi-site industrial organisations with a global presence. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1232–1250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.192>
- 8) Weber, C. V., Curtis, B., & Chrissis, M. B. (1993). Capability Maturity Model, Version 1.1. *IEEE Software*, 10(4), 18–27. <https://doi.org/10.1109/52.219617>
- 9) Capability Maturity Model Integration. (n.d.). In Wikipedia. Retrieved August 30, 2026, from https://en.wikipedia.org/wiki/Capability_Maturity_Model_Integration
- 10) International Energy Agency. (n.d.). Superior Energy Performance (SEP) – Policies. IEA. <https://www.iea.org/policies/830-superior-energy-performance-sep>
- 11) Therkelsen, P., McKane, A., Sabouni, R., & Evans, T. (2014). Superior Energy Performance program demonstrates 1.7-year payback. Lawrence Berkeley National Laboratory, Energy Technologies Area. <https://eta.lbl.gov/news/57582/superior-energy-performance-pro>
- 12) U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (2025). U.S. manufacturer going above and beyond with Superior Energy Performance. <https://www.energy.gov/cmei/amo/articles/us-manufacturer-going-above-and-beyond-superior-energy-performance>
- 13) International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001:2018 — Energy management systems — Requirements with guidance for use. <https://www.iso.org/standard/69426.html>
- 14) Мінекономрозвитку України. (2014). ДСТУ ISO 50001:2014. Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2011, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60876

- 15) Проект UNIDO/GEF «Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України». (2021). Керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту згідно стандарту ISO 50001:2018. http://www.ukriee.org.ua/wp-content/uploads/2021/03/EnMS-Practical-Guide-2021_Ukraine_ukr.pdf
- 16) Schumacher, J., & Gronau, N. (2025). Comparing Industry 4.0 maturity models. Industry-Science.com. <https://industry-science.com/en/articles/industry-4-0-maturity-models/>
- 17) Mittal, S., Romero, D., & Wuest, T. (2018). Towards a smart manufacturing maturity model for SMEs (SM3E). In IFIP Advances in Information and Communication Technology (Vol. 536, pp. 155–163). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99707-0_20
- 18) Price, C., & Nimbalkar, S. U. (2023). Smart manufacturing maturity models and their applicability: A review. Journal of Manufacturing Technology Management. <https://doi.org/10.1108/jmtm-03-2022-0103>
- 19) Polyanska, A., Savchuk, S., Zapukhliak, I., Zaiachuk, Y., & Stankovska, I. (2022). Digital maturity of the enterprise as an assessment of its ability to function in Industry 4.0. In Advances in Manufacturing III (pp. 209–227). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99310-8_17
- 20) Carvalhosa, S., Lucas, A., Neumann, C., & Turk, A. (2024). Review of digital transformation in the energy sector: Assessing maturity and adoption levels of digital services and products via fuzzy logic. IEEE Access, 12, 60513–60531. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3393610>
- 21) Strategy& / PwC. (2023). Digital business maturity in the energy and utilities sector. <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/energy-utilities/digital-business-maturity.html>
- 22) CrossCountry Consulting. (2023). ESG maturity model: Making progress on your ESG journey. <https://www.crosscountry-consulting.com/insights/blog/esg-maturity-model/>
- 23) Novisto. (2026). What is ESG maturity? Stages, assessment & framework. <https://novisto.com/knowledge-base/what-is-esg-maturity>
- 24) Moeve Global. (2026). The sustainability maturity cycle: ESG and strategy. <https://www.moeveglobal.com/en/planet-energy/2030-goals/sustainability-maturity-cycle-esg-strategy>