

Ігор ОНОФРІЙЧУК,
аспірант кафедри економіки будівництва
ORCID: 0000-0002-2363-4896
Андрій РОСИНСЬКИЙ,
доктор філософії, доцент
ORCID: 0000-0003-4119-7463

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ОБҐРУНТУВАННЯ ІНДИКАТОРІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В СИСТЕМІ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті розв'язано науково-прикладне завдання щодо формування організаційно-економічного інструментарію оцінювання ефективності енергоменеджменту будівельного виробництва. З огляду на домінування ресурсного методу ціноутворення, обґрунтування енергоефективності потребує глибокого аналізу чинних нормативів витрачання ресурсів. Оскільки левова частка енергоспоживання на будівельному майданчику акумулюється в процесі механізованого вертикального переміщення вантажів, фокус дослідження спрямовано на експлуатаційну ресурсомісткість підйомних механізмів. Доведено, що релевантні індикатори енергоефективності повинні охоплювати не лише прямі витрати енергоносіїв на безпосередню роботу техніки, а й супутні загальновиробничі витрати, зумовлені додатковими трудовитратами на управління, перебазування та технічне обслуговування засобів механізації.

Методологічним підґрунтям дослідження слугує трансляція методів статистичного аналізу, економетричного моделювання та теорії «м'яких обчислень» у площину економіки будівництва. На основі масиву даних ресурсних кошторисних норм експлуатації будівельних машин та механізмів проаналізовано дві агреговані вибірки: підйомні крани з дизельним двигуном та крани з електроприводом. За допомогою вибірових t-критеріїв Стьюдента емпірично підтверджено статистично значимі розбіжності їх експлуатаційних параметрів, зокрема сумарних трудовитрат, потреб у паливно-мастильних матеріалах та зарплато-коефіцієнтів витрат праці.

Науковою новизною дослідження є розроблення статистико-економетричних двофакторних мультиплікативних моделей, які формалізують нелінійну ступеневу залежність максимальної вантажопідйомності кранів від обсягів витрат праці та енергоносіїв. Встановлено, що для дизельних кранів ефект масштабу діє класично: заміна техніки на потужнішу зумовлює уповільнення зростання витрат палива та супутніх організаційних витрат. Натомість виявлено діаметрально протилежну закономірність для електрокранів: інтенсифікація їх потужності спричиняє прискорене зростання витрат праці обслуговуючої ланки, що експоненціально збільшує енергоспоживання в загальновиробничих цілях.



Для імплементації одержаних моделей у контур управління будівельним підприємством запропоновано авторський підхід на базі теорії нечітких множин. Розроблено інтервальні оцінки міри зростання або економії витрат у вигляді параметрів нечітких чисел 2-го типу, що компенсують стохастичність відхилень фактичних даних від теоретичних. Запропоновано графічно-аналітичний інструментарій для прийняття предиктивних управлінських рішень щодо оптимізації орендних відносин, вибору будівельної техніки та виявлення прихованих резервів ресурсозбереження під час реалізації будівельних контрактів.

Ключові слова: *енергоменеджмент, енергоефективність, енергозбереження, енергоспоживання, діджиталізація, підйомні крани, витрати дизпалива, витрати електричної енергії, загальновиробничі витрати, економетричне моделювання, теорія нечітких множин, кошторисна вартість будівництва, організація будівництва, управління ресурсами.*

Вступ і постановка проблеми. Менеджмент енергоефективності охоплює усі процеси діяльності підприємства, починаючи від підготовки до виробництва. Тому пошук резервів зменшення енергоспоживання має враховувати технологічні аспекти будівельних процесів, а саме: вибір способів виконання робіт, обґрунтування потреби у трудових та матеріально-технічних ресурсах, оцінювання ефективності взаємозаміни факторів виробництва. Оскільки визначення вартості будівництва в Україні, для фінансування якого залучаються державні кошти, здійснюється на основі ресурсного методу, обґрунтування заходів із енергоефективності має враховувати чинні нормативи витрачання ресурсів. Подібний підхід до обґрунтування собівартості будівництва, що ґрунтується на підрахунку суми всіх понесених витрат, забезпечує мінімально можливу собівартість будівельної продукції. З цих причин переважна більшість приватних компаній також керується настановами із визначення вартості будівництва під час встановлення доцільності здійснення інвестицій, виконання тих чи інших проектних рішень, укладанні договорів і проведення взаєморозрахунків за виконані роботи. У зв'язку із зазначеним потреба поглибленого аналізу чинних будівельних норм в процесі обґрунтування показників енергоефективності будівництва є беззаперечно актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблемі енергоефективного будівництва присвячена численна кількість праць, втім більшість авторів фокусує увагу на необхідності удосконалення проектних рішень [1, 2, 4, 9–11, 14]. Поряд із цим, сучасні дослідження розглядають інтеграційні підходи та організаційні засади забезпечення енергоефективності об'єктів різного цільового призначення, зокрема у житловому [16] та готельно-ресторанному будівництві [17]. Меншою мірою висвітлено механізми фінансування енергоефективних проєктів [3, 13]. Серед усього розмаїття праць, присвячених енергоефективності будівельних процесів особливої уваги заслуговує робота [5], у якій узагальнено дані безпосередніх спостережень за виконанням будівельних процесів та понесених при цьому матеріальних, часових та енергетичних витрат. Також варто відзначити праці [6, 12], у яких запропоновано науково-прикладні розробки для покращення управління ризиками, які супроводжують реалізацію енергоефективних проєктів.

Окреме місце у вирішенні цієї проблематики посідають попередні напрацювання авторів даного дослідження, у яких доведено роль енергоефективності будівельного виробництва як дієвого інструменту розвитку

економічного потенціалу девелоперських компаній [15], а також обґрунтовано складові цифровізованого інструментарію для контролю енергоспоживання підприємствами [18].

Однак загалом наукові праці, присвячені проблематиці енергоефективності безпосередньо технологічних процесів будівельного виробництва, майже відсутні. Попри наявні здобутки, і досі **невирішеною є частина проблеми** із вдосконалення організації та управління будівельними процесами, результати яких сприятимуть покращенню фінансового стану будівельного підприємства у середньо- та довгостроковій перспективі.

Мета статті, таким чином, полягає у встановленні кількісних значень показників технологічної та економічної ефективності менеджменту будівельного виробництва.

Виклад основного матеріалу. Будівельна діяльність пов'язана із переміщенням в просторі та укладанням у необхідне положенням чималої кількості матеріальних ресурсів. Разом із величезними обсягами опрацьовуваних матеріальних ресурсів і, відповідно, підвищеною матеріаломісткістю, необхідним є здійснення значних витрат праці. І досі переважна більшість робіт у будівництві виконуються вручну, споживаючи при цьому чималі витрати живої праці, а отже і безкоштовної енергії трудових зусиль. Однак певна частина робіт майже непридатна для «ручного» виконання, тому залучення засобів механізації є об'єктивно необхідним та економічно виправданим, навіть зважаючи на вищу енергомісткість, оскільки механізація робіт забезпечує значне прискорення виконання робіт у часі. Мова йде про таку неодмінну складову будівельного виробництва, як вертикальне переміщення вантажів, з метою здійснення якого необхідно використовувати підйомні крани. Зазвичай поняття «будівництво» асоціюється у більшості людей із підйомними кранами, і саме ця піктограма набула широкого вжитку в системах будівельної інфографіки. Втім, на вибір технологічного рішення щодо залучення кранів вирішальне значення має витратна складова, а саме: під час розроблення проєктів організації будівництва, проєктів виконання робіт, нарешті визначення цін тендерних пропозицій чільну роль відіграє витратна складова. У якій мірі вигідно застосувати більш потужне підйомне устаткування для забезпечення безперерійності будівельного виробництва? Чи буде при цьому досягнуто настільки значне скорочення тривалості виконання робіт, що достроковий ввід в експлуатацію об'єкт дозволить отримати додаткові доходи, вищі за здороження будівництва? Чи вдасться забезпечити конкурентну ціну на будівельні роботи, залучивши до робіт орендовані крани? Або ж вартість кожної машино-години експлуатації власного підйомного механізму буде нижчою за усереднену вартість роботи аналогічної техніки? Обґрунтована відповідь на дані питання інвестора, девелопера, забудовника, проєктувальника чи підрядника дає змогу отримати економічні вигоди. Натомість хибне, інтуїтивне, миттєве рішення може виявитись причиною фатальних помилок, що можуть призвести до безперспективної недобудови чи збитковості, а то й банкрутства будівельного підприємства. Вищезазначене зумовило вибір у якості предмета дослідження енергомісткість експлуатації будівельних кранів, а джерелом інформації щодо нормативних витрат енергоресурсів насамперед є «Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів» [8].

Під час вивчення змін енергомосткості будівельного виробництва необхідно враховувати такі чинники потреби в енергетичних ресурсах, як, по-перше, експлуатація будівельних машин та механізмів під час виконання конкретних операцій, по-друге, витрати енергетичних ресурсів, необхідні для організації будівельного виробництва. Так, розглядаючи енергомосткість вантажопідйомних робіт, потрібно не лише встановити потреби в енергоносіях безпосередньо на будівельні роботи, але й разом із ними обчислити енергомосткість загальнопромислових витрат. У відповідності із чинними настановами з визначення вартості будівництва [7, 8], енергоресурси, необхідні для організації виробничої діяльності, забезпечення дотримання технологічних та якісних вимог до виконуваних робіт, а також техніки безпеки відображаються спеціальним вартісним показником – коефіцієнтом для III блоку загальнопромислових витрат, який являє собою показник пропорційності до нормативно-розрахункової трудомосткості. Це означає, що кожна година експлуатації будівельної техніки вимагає одночасного здійснення трудовитрат, які визначають додаткові енерговитрати на організацію будівництва. Варто врахувати, що кожна машино-година роботи техніки відповідає витратам праці, більшим за 1 людино-годину, тому що слід врахувати додаткові трудозатрати на перебазування та технічне обслуговування засобів праці, потрібне для збереження можливості належної експлуатації. Відповідно за сумою таких основних і додаткових витрат праці, власне, і визначається трудомосткість в експлуатації будівельних машин, а її зміни призведуть до необхідності коректувань кошторисної документації в частині загальнопромислових витрат, III блок яких містить також суми витрат підрядного підприємства на енергоресурси для загальнопромислових цілей. Отже, індикатори менеджменту енергоефективності у будівельному виробництві мають враховувати граничні обсяги споживання енергоресурсів, які гарантовано будуть відшкодовані підрядником замовником будівельних робіт. При цьому не доцільно обмежуватись виключно потребою в енергоносіях для забезпечення роботи певної машини, натомість слід брати до уваги й енергоспоживання для загальнопромислових потреб, а отже і витрати праці на управління та обслуговування техніки.

Згідно вищезазначених складових енерговитрат на роботу будівельної техніки нами було проаналізовано таблиці норм витрачання ресурсів «Ресурсних кошторисних норм експлуатації будівельних машин та механізмів» [8], частина I, розділ 02 «Крани». Як свідчать систематизовані у ній дані, у будівництві використовується велике розмаїття підйомних машин, що відображається складом цифр у шифрах ресурсів. Зокрема, поряд із різною вантажопідйомністю, крани розподілено за такими типами: крани баштові, крани баштові бетоноукладальні, крани баштові приставні, крани козлові, крани на автомобільному ході, крани на гусеничному ході, крани на пневмоколісному ході та інші, які використовуються на будівництві надпотужних і технологічно складних об'єктів. Тому увага даного дослідження була зосереджена саме на перерахованих машинах як найбільш затребуваних у сучасних будівельних процесах.

Усі вищезазначені крани відрізняються своєю ресурсомосткістю, а отже й потребами в енергоносіях, залежно від виду будівництва, а саме: при монтажі технологічного устаткування, гідроенергетичному будівництві, будівництві теплових та атомних електростанцій, спорудженні мостів, магістральних трубопроводів, інших видів будівництва. Внаслідок воєнних дій пошкоджень та руйнувань зазнали численні промислові та цивільні об'єкти, а тому гостра потреба

їх якнайскорішої відбудови призводить до того, що для розроблення індикаторів енергоефективності варті уваги всі види будівництва. Серед аналізованих будівельних машин наявні лише деякі окремі види, що працюють на бензині – це крани на автомобільному ході, які мають вантажопідйомність 6,3 т, причому потреба в цьому енергоносії однакова і для монтажу технологічного устаткування і для інших видів будівництва. Вона дещо зменшується на будівництві мостів (до 10%) і зростає на об'єктах гідроенергетичного будівництва (до 10,5%). Через нетиповість вказаних машин подібні варіанти енергоспоживання було вилучено із досліджуваної вибірки. Таким чином, для обґрунтування енергомісткості будівельного виробництва розглядалися тільки два агрегованих типи підйомних механізмів: крани, які працюють на дизпаливі, та крани, енергоносієм для роботи яких є електроенергія. До першої групи кранів увійшли машини на пневмоколісному, гусеничному та автомобільному ході, другу групу представлено козловими та баштовим кранами. Такий апріорний розподіл будівельних машин за типами енергоспоживання виявив високу статистичну значимість розбіжностей економічних показників їх експлуатації (табл.1).

Таблиця 1

Результати вивчення усереднених витрат на машино-годину експлуатації підйомних кранів для двох незалежних вибірок*

Показник	Крани із електроприводом		Крани із дизельним двигуном		t-критерій	р-імовірність помилки
	Середнє значення	Стандартне відхилення	Середнє значення	Стандартне відхилення		
Розділ 1. Усі види будівництва, t*(0,05;91=35 електричних+58 дизельних-2)=1,986						
1. Зарплато-коефіцієнт витрат праці	3,17389	1,28123	6,25721	4,96045	-3,59844	0,000520
2. Розряд ланки робітників, задіяних на управлінні й обслуговуванні машини	5,48000	0,61107	5,84483	0,30846	-3,81982	0,000244
3. Сумарні трудовитрати на керування, перебазування, ремонт і технічне обслуговування, люд.-год.	1,86457	0,56444	3,67983	2,73367	-3,87105	0,000204
4. Потреба у мастильних матеріалах, кг	0,06000	0,03804	0,53086	0,30943	-8,94287	0,000000
5. Потреба у гідравлічній рідині, кг	0,00600	0,02476	0,06310	0,14337	-2,33058	0,021986
6. Витрати праці робітників, зайнятих на ремонті і технічному обслуговуванні, люд.-год.	0,46257	0,25280	1,33586	1,41884	-3,59949	0,000519
7. Витрати праці робітників, зайнятих на перебазуванні, люд.-год.	0,25914	0,17971	0,93879	1,08702	-3,66122	0,000421
8. Вантажопідйомність крану, т	41,1714	49,4208	61,9052	60,4276	-1,71248	0,090213

Продовження табл. 1

Показник	Крани із електроприводом		Крани із дизельним двигуном		t-критерій	р-імовірність помилки
	Середнє значення	Стандартне відхилення	Середнє значення	Стандартне відхилення		
Розділ 2. Монтаж технологічного устаткування, t*(0,05;27=11 електричних+18 дизельних-2)=2,052						
1. Зарплато-коефіцієнт витрат праці	3,42028	1,73362	7,47515	6,15845	-2,11935	0,043402
2. Розряд ланки робітників, задіяних на управлінні й обслуговуванні машини	5,50909	0,69348	5,83333	0,27008	-1,78995	0,084685
3. Сумарні трудовитрати на керування, перебазування, ремонт і технічне обслуговування, люд.-год.	1,98000	0,76750	4,62111	3,51709	-2,43891	0,021587
4. Потреба у мастильних матеріалах, кг	0,05818	0,02483	0,53944	0,27033	-5,84804	0,000003
5. Потреба у гідравлічній рідині, кг	0,00000	0,00000	0,09056	0,17648	-1,68966	0,102609
6. Витрати праці робітників, зайнятих на ремонті і технічному обслуговуванні, люд.-год.	0,48909	0,31236	1,98056	1,95299	-2,49610	0,018962
7. Витрати праці робітників, зайнятих на перебазуванні, люд.-год.	0,35455	0,28420	1,22389	1,28452	-2,19723	0,036765
8. Вантажопідйомність крану, т	45,0000	60,9717	65,5278	62,2808	-0,86795	0,393073
Розділ 3. Інші види будівництва, t*(0,05;20=5 електричних+17 дизельних-2)=2,086						
1. Зарплато-коефіцієнт витрат праці	2,47275	0,36741	5,94499	3,46142	-2,20140	0,039616
2. Розряд ланки робітників, задіяних на управлінні й обслуговуванні машини	4,90000	0,22361	5,91765	0,32832	-6,44805	0,000003
3. Сумарні трудовитрати на керування, перебазування, ремонт і технічне обслуговування, люд.-год.	1,6180	0,19254	3,42824	1,77332	-2,24007	0,036603
4. Потреба у мастильних матеріалах, кг	0,04000	0,01414	0,58647	0,35711	-3,36231	0,003099
5. Потреба у гідравлічній рідині, кг	0,0000	0,00000	0,08235	0,18092	-1,00034	0,329095
6. Витрати праці робітників, зайнятих на ремонті і технічному обслуговуванні, люд.-год.	0,3380	0,13572	0,97529	0,61274	-2,27179	0,034290
7. Витрати праці робітників, зайнятих на перебазуванні, люд.-год.	0,2800	0,05745	1,04118	0,88491	-1,88935	0,073431
8. Вантажопідйомність крану, т	12,1000	7,71687	67,9118	63,3453	-1,93268	0,067562

Показник	Крани із електроприводом		Крани із дизельним двигуном		t-критерій	Р-імовірність помилки
	Середнє значення	Стандартне відхилення	Середнє значення	Стандартне відхилення		
Розділ 4. Гідроенергетичне будівництво, $t^*(0,05;24=1 \text{ електричних} + 15 \text{ дизельних} - 2) = 2,064$						
1. Зарплато-коефіцієнт витрат праці	3,43741	1,27029	6,56215	5,79981	-1,74735	0,093362
2. Розряд ланки робітників, задіяних на управлінні й обслуговуванні машини	5,90000	0,53852	5,90000	0,33806	0,00000	1,000000
3. Сумарні трудовитрати на керування, перебезування, ремонт і технічне обслуговування, люд.-год.	1,90455	0,54246	3,66600	2,99982	-1,91452	0,067548
4. Потреба у мастильних матеріалах, кг	0,06909	0,02343	0,55533	0,35835	-4,46873	0,000160
5. Потреба у гідравлічній рідині, кг	0,00000	0,00000	0,02000	0,05904	-1,11733	0,274915
6. Витрати праці робітників, зайнятих на ремонті і технічному обслуговуванні, люд.-год.	0,53909	0,27873	1,34200	1,45936	-1,79150	0,085833
7. Витрати праці робітників, зайнятих на перебезуванні, люд.-год.	0,18364	0,06531	0,89067	1,20598	-1,93171	0,065286
8. Вантажопідйомність крану, т	63,5909	54,2894	69,9333	67,4118	-0,25654	0,799720

Джерело: розроблено авторами

**Примітка: Напівжирним шрифтом виділено статистично значимі розбіжності у середніх значеннях.*

У відповідності із розрахунками вибірових t-критеріїв Стьюдента для таких показників, як: середній розряд ланки робітників, що здійснюють управління й обслуговування кранів, додаткові витрати праці на перебезування, а також ремонт і ТО, витрат мастильних матеріалів, гідравлічної речовини, тобто для всіх, окрім вантажопідйомності механізмів, – усереднених по всіх підвбірках, виявлено значимі розбіжності (табл. 1), адже вибірові значення t-Стьюдента виявились більшими за критичне $t^*(0,05;91)=1,986$. Поряд із витратами праці на загальне забезпечення роботи машин, тобто трудовитратами усієї ланки робітників: і машиніста, і ремонтників, і перебезувальників, – досліджувався і показник витратомісткості підйомної техніки за витратами на оплату праці. Проте, замість грошової суми оплати праці досліджувався інший показник, позбавлений інфляційного впливу, – зарплато-коефіцієнт витрат праці, визначений як добуток усіх трудовитрат і тарифного коефіцієнту, що відповідає розряду складності робіт для певної машини (1-й рядок кожного із розділів табл. 1). Втім, розбіжності у витратомісткості дизельних та електричних кранів нівелюються, залежно від важкості робіт на конкретному виді будівництва, а саме: під час монтажу технологічного устаткування складність та відповідальність управління машиною призводить до згладжування розбіжностей у розрядах ланки робітників, незалежно

від типу енергоносія, втрачаються і розбіжності у витратах гідравлічної речовини. Звичайно причина втрат розбіжностей зумовлена чималою масою переміщуваною вантажів, оскільки до роботи залучаються тільки крани із високою вантажопідйомністю. Звідси й істотне зменшення обсягів підвибірок, а за рахунок усунення різноманітності варіантів трудомісткості та рівня кваліфікації й відбувається згладжування у розрядах робітників. Втім, розбіжності витрат праці, а разом із ними і годино-коефіцієнтів залишаються статистично значимими (табл. 1, розділ 2), впливаючи і на розбіжності енерговитрат для організації будівництва. Згідно обчислень, більш витратомісткою виявляється експлуатація кранів із дизельним двигуном.

На інших видах будівництва, із меншими обсягами підвибірок, спостерігається подальше згладжування розбіжностей, оскільки придатними для виробничого використання виявляється менше варіантів кранів, проте чимала варіація вантажопідйомності й витрат на перебазування при цьому не усувається, тому призводить до невисоких показників t-Стюдента. Однак, витрати праці у розрахунку на 1 машино-годину все ще суттєво відрізняються – у кранів із дизельним двигуном вони більше, ніж удвічі, перевищують аналогічні витрати на експлуатацію електрокранів (табл. 1). Відповідні розбіжності виявлятимуться й у енерговитратах на організацію будівництва.

Нарешті, для гідроенергетичного будівництва (табл. 1, розділ 4) статистично значимо відрізняються тільки витрати змашувальних матеріалів, причому більш економними виявляються крани із дизельним двигуном.

Проте у подальших статистичних розрахунках вплив видів будівництва на енергомісткість експлуатації підйомних кранів виявився незначним. Тому пропорції у змінах витрат на енергозабезпечення будівельних процесів та їх організації надалі було встановлено лише за типами машин.

На нашу думку, відносні індикатори енергоефективності будівельного виробництва мають беззаперечну перевагу перед абсолютними. По-перше, різні типи будівельних машин вимагають принципово різних енергоносіїв із різними одиницями виміру. Тому порівнювати обсяги витрачених кіловат-годин із кілограмами просто неможливо. Для таких ситуацій більш прийнятними є варіанти первинного опрацювання вхідних даних, а саме: центрування, логарифмування, масштабування співвідношень енергоспоживання, проте ускладнення аналітичних моделей становитиме додаткове джерело ускладнень під час практичного впровадження наукових розробок. По-друге, вартість одиниць спожитих енергоносіїв також не зівставна, ані за грошовими сумами, які слід сплатити на певну дату, ані за темпами зміни таких витрат у часі: підвищення вартості дизпалива і електроенергії зазвичай відбувається із деяким часовим лагом, який важко передбачити за допомогою аналітичних залежностей. По-третє, досить часто обґрунтування технологічних рішень спорудження проєктованого об'єкту передбачає вибір тільки в межах одного типу кранів, проте із різною вантажопідйомністю і габаритами стріли.

На підтвердження вищеподаної аргументації наведемо конкретні показники вартості енергоносіїв, як от: у цінах на 01.01.2024 (це останні офіційні дані на момент дослідження) усереднена вартість без ПДВ однієї кВт-години електроенергії становила 5,754 грн., а кілограму дизпалива – 49,28 грн. Враховуючі усереднені по типах машин витрати енергоносіїв для забезпечення 1 машино-години роботи, а саме $5,19 \pm 1,11$ кг і $7,27 \pm 2,65$ кВт•год, можна зробити висновок про цілковиту

недоцільність використання кранів із дизельним двигуном. Адже при цьому тільки вартість енергоносіїв у 6 разів перевищить витрати на використання електричних кранів: $255,77 \pm 54,7$ грн. проти $41,84 \pm 15,24$ грн. Проте і витрати інших ресурсів на забезпечення роботи одної машини-години кранів із дизельним двигуном (табл. 1) також значимо вищі, аніж у електричних кранів.

Втім подібний висновок є хибним, зважаючи на обмеження електропостачання економічними суб'єктами, ширшу розповсюдженість моделей кранів із дизельним двигуном та їх технологічну пристосованість для виконання різноманітних будівельних робіт.

Все вищевикладене доводить необхідність обґрунтування деяких відносних, безрозмірних індикаторів достатності чи надмірності понесених енерговитрат проти мінімально припустимих. Відносні показники енергоефективності будівельних процесів вважаємо за доцільне встановити у вигляді безрозмірних коефіцієнтів, подібних до коефіцієнту гальмування вартості, що здобув розповсюдження в процедурах оцінки майна. Адже зростання вантажопідйомності крану вимагає більших експлуатаційних витрат: і складності робіт, і робочого часу на забезпечення експлуатаційної придатності техніки, і, звичайно енергоносіїв. Проте зростання витратних складових через ефект економії масштабу і конструктивних рішень для потужніших машин відбуватиметься не у прямо пропорційній залежності, а із деяким «уповільненням». Тобто пропорція зростання витрат енергоносіїв буде зіставною не із співвідношенням параметрів потужності крану, а із деяким коректуванням цього співвідношення. Науковою гіпотезою в цьому випадку буде припущення про пропорційність зміни енерговитрат до деякої, меншої за одиницю, ступені співвідношення параметрів потужності крану. Саме цей ступеневий коефіцієнт і має назву «коефіцієнт гальмування».

Оскільки для виконання будівельних робіт, пов'язаних із вертикальним переміщенням вантажів, потрібні й додаткові витрати на організацію будівельних процесів, то варто дослідити коефіцієнти гальмування у співвідношенні витрат праці усієї ланки робітників задіяних на управлінні та обслуговуванні кранів.

Таким чином, важливим етапом обґрунтування індикатору ефективності будівельного виробництва є побудова статистико-економетричної двофакторної мультиплікативної моделі та аналіз коефіцієнтів при її незалежних факторах – витратах енергоносіїв (x_1) і витратах праці (x_2), що є передумовою для збільшення енергоспоживання у загальнопромислових цілях. Залежна змінна – продуктивність крану, тобто максимальна вантажопідйомність, яку можна досягти за даного бюджету витрат на енергетичні ресурси. У загальному вигляді формалізована модель енергопотреб крану буде записана так:

$$\hat{y} = a_0 \cdot x_1^{a_1} \cdot x_2^{a_2}, \quad (1)$$

де a_0, a_1, a_2 – емпіричні константи-параметри, які обчислюються внаслідок статистичного моделювання. При цьому особливої уваги заслуговують два останніх, оскільки вони, власне і є коефіцієнтами гальмування. Адже, порівнюючи теоретичні значення максимальної вантажопідйомності для двох варіантів витрат енергоносія та трудозатрат машиністів, одержимо розбіжності у темпах зміни витрат та результативного показника. Наприклад, «економний варіант» виконання робіт передбачає використання менш потужного крану із вантажопідйомністю y_1 т, для чого потрібно енергоносіїв у кількості x_{1_1} та витрат праці в обсязі x_{2_1} людино-годин. Вища вантажопідйомність більш потужної моделі крану y_2 т зумовлює і інші обсяги виробничих ресурсів, відповідно x_{1_2} та x_{2_2} .

Співвідношення, тобто індекс, теоретичних показників продуктивності, встановлених згідно (1) має наступний вигляд, якщо $a_1, a_2 \neq 1$:

$$I_y = \frac{\widehat{y}_2}{\widehat{y}_1} = \frac{a_0 \cdot \widehat{x}_{1,2}^{a_1} \cdot \widehat{x}_{2,2}^{a_2}}{a_0 \cdot \widehat{x}_{1,1}^{a_1} \cdot \widehat{x}_{2,1}^{a_2}} = \left(\frac{\widehat{x}_{1,2}}{\widehat{x}_{1,1}}\right)^{a_1} \cdot \left(\frac{\widehat{x}_{2,2}}{\widehat{x}_{2,1}}\right)^{a_2} = I_{x_1}^{a_1} \cdot I_{x_2}^{a_2} \neq I_{x_1} \cdot I_{x_2} \quad (2)$$

Вільна константа моделі (1) a_0 відображає вплив на максимально досягну вантажопідйомність інших факторів, аніж енерговитрати чи трудозатрати, і у контексті даного дослідження не несе суттєвого інформаційного навантаження, оскільки у (2) цей коефіцієнт скорочується.

У табл. 2 наведено статистичні характеристики нелінійних моделей енергоспоживання в залежності від типу будівельної машини.

Таблиця 2

Результати моделювання функціональної залежності вантажопідйомності кранів від обсягів витрат енергоносіїв та трудозатрат на управління й обслуговування*

Позначення	Коефіцієнт моделі	Стандартна помилка	t-Стюдента коефіцієнтів	p-значимість коефіцієнта	Довірчий інтервал	
					Нижня межа	Верхня межа
Крани з дизельним двигуном: $y=4,436 \cdot x_1^{0,573} \cdot x_2^{0,750}$, $F_{\text{моделі}}=204,6356$, $R^2=0,964$						
a0	4.436048	0.650083	6.82382	0.000000	3.135235	5.736861
a1	0.573378	0.072637	7.89374	0.000000	0.428032	0.718725
a2	0.749877	0.057499	13.04154	0.000000	0.634821	0.864932
Крани з електроприводом: $y=2,116 \cdot x_1^{0,285} \cdot x_2^{1,718}$, $F_{\text{моделі}}=162,8377$, $R^2=0,939$						
a0	2.115965	0.749348	2.823740	0.008101	0.589592	3.642338
a1	0.285249	0.155673	1.832365	0.076218	0.031846	0.602344
a2	1.717891	0.228141	7.529941	0.000000	1.253182	2.182600

Джерело: розроблено авторами

**Примітка: Навіс жирним шрифтом виділено статистично значимі параметри моделей.*

Як свідчать розрахунки, модель (1) виявилась статистично значимою для контролю витрат енергоносіїв під час експлуатації кранів із дизельним двигуном. Не випадковий характер мають і параметри нелінійної залежності, оскільки всі коефіцієнти мають співвідношення t-Стюдента, вищі за критичне значення ($t^*_{(2\text{стор}, 0,05; 59-62-3)}=2,000$). Натомість коефіцієнт гальмування витрат енергоносіїв для кранів на електричному приводі не здолав межу статистичної значимості, адже його t-Стюдента виявився меншим, ніж критичне значення ($t^*_{(2\text{стор}, 0,05; 32-35-3)}=2,037$). Крім того, особливої уваги заслуговує коефіцієнт гальмування зміни трудовитрат, що опосередковано свідчить про додаткове збільшення енергоспоживання у загальнопромислових витратах у випадку заміни будівельної техніки більш потужною. Для кранів, які приводяться в дію за допомогою електричної енергії, виявляється залежність, діаметрально протилежна науковій гіпотезі дослідження: попри збереження нелінійного характеру зв'язку динаміки витрат праці і продуктивності техніки, замість гальмування ресурсного фактору, спостерігається майже двократне його прискорення, адже показник ступеня при змінній x_2 складає 1,72 рази. У той час, як надання переваги більш потужному крану із дизельним

двигуном спричинить уповільнення витрат праці і енергоспоживання у загальновиробничих цілях із коефіцієнтом гальмування 0,75 (табл. 2).

Іншими словами, заміна крану іншим, більш потужним, внаслідок якої максимальна вантажопідйомність зростає на чверть, тобто 25%, призведе до зростання витрат енергоносіїв для безпосереднього виконання робіт на об'єкті, а також для організації виробничих процесів. При цьому зростання вказаних витрат буде дещо меншим, ніж 25%, за винятком баштових і козових кранів. Адже останні працюють на електроприводі, і закономірним буде, замість економії, чимале зростання енергозатрат на управління й організацію будівництва. Кількісна міра гальмування чи випередження за 25%-го зростання потужності механізму передбачається наступною:

- **кран із дизельним двигуном:** витрати дизпалива – зростання на 14% ($\approx 0,25 \cdot 0,573$); енергозатрати на управління й організацію будівництва 18,7% ($\approx 0,25 \cdot 0,750$), для обох напрямків енергоспоживання виявлено гальмування зростання;

- **кран із електричним приводом:** витрати електроенергії – зростання на 7% ($\approx 0,25 \cdot 0,285$); енергозатрати на управління й організацію будівництва 42,9% ($\approx 0,25 \cdot 1,718$), остання складова енергомісткості зростає більше, ніж продуктивність техніки, що спричиняє сумніви щодо доцільності подібних замін у технології будівельних робіт.

Остаточні індикатори енергоефективності будівельного виробництва пропонується встановити у вигляді інтервальних оцінок міри зростання чи економії витрат на енергоносії для виробничих операцій та організації будівельних процесів, спричинених заміною використовуваних підйомних кранів. Інтервальні оцінки розроблено за підходом, дещо відмінним від традиційної методики визначення надійного інтервалу, оскільки, замість табличних коефіцієнтів довіри, нами використано значно менші значення. Їх обґрунтовано наступними міркуваннями: по-перше, точкова оцінка, визначена коефіцієнтом моделі (1) є не зовсім коректною, оскільки використаний при її обґрунтуванні метод найменших квадратів допускає розбіжності теоретичних оцінок і фактичних значень залежного показника. По-друге, діапазон коливань енерговитрат має бути досить вузьким, щоб виконувати регулюючу функцію, але при цьому бути досяжним, щоб зберігати стимулюючий вплив. Тому інтервальна оцінка має бути представлена нечітким числом 2-го типу, внутрішнє, «регулююче» розтягнення якого 0,253 сигм коефіцієнту (табл. 2), а зовнішнє «стимулююче» 0,333 сигми. З огляду на «традиційний» аналіз нормально розподілених величин зазначені межі відповідають 1/5 та 1/3 спостережень нормальної сукупності, які варто визнати як «еталонні» ознаки ефективного енергоменеджменту. Тобто оцінку управління енерговитратами будівельного підприємства як «прийнятну» можна надати лише для 33% реалізації будівельних контрактів, а насправді «ефективними» варто визнати ще меншу частку спостережень – 20% усіх випадків. Вказані межі дещо подібні до Закону Парето, коли 80% ефективності забезпечує 20% активів, а також його уточненню під час класифікації запасів за системою А-В-С аналізу, оскільки досить часто ліву частку доходу, понад 50%, забезпечує реалізація не 20, а 30 – 35% запасів.

У табл. 3 представлено інтервальні оцінки динаміки витрат енергетичних ресурсів, пов'язаної із змінами потужності будівельних кранів, а також подано функції належності дзвоноподібних нечітких чисел, на основі вивчення яких і слід

здійснювати оцінювання результатів енергоменеджменту будівельних підприємств.

Таблиця 3

Обґрунтування індикаторів енергоефективності будівельного виробництва за допомогою нечітких чисел 2-типу

Складові експлуатаційних витрат	Оцінка коефіцієнту гальмування, c	Розтягнення		Межі припустимих значень коефіцієнту гальмування		Дзвоноподібне нечітке число, міра прийняття якості енергоменеджменту будівельних процесів	
		внутрішнє, a_1	зовнішнє, a_2	ефективні	припустимі	ефективна	припустима
Крани з дизельним двигуном							
Дизельне паливо	0.573	0.0184	0.2471	0.555– 0.592	0.326– 0.821	$\mu_e = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-0,573}{0,0184}\right)^{2*2}}$	$\mu_n = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-0,573}{0,2471}\right)^{2*2}}$
Витрати труда на управлінні та обслуговуванні	0.750	0.0145	0.3232	0.735– 0.764	0.427– 1.073	$\mu_e = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-0,750}{0,0145}\right)^{2*2}}$	$\mu_n = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-0,750}{0,3232}\right)^{2*2}}$
Крани з електроприводом							
Електроенергія	0.285	0.0394	0.1229	0.246– 0.325	0.162– 0.408	$\mu_e = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-0,285}{0,0394}\right)^{2*2}}$	$\mu_n = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-0,285}{0,1229}\right)^{2*2}}$
Витрати труда на управлінні та обслуговуванні	1.718	0.0577	0.7404	1.66– 1.776	0.977– 2.458	$\mu_e = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-1,718}{0,0577}\right)^{2*2}}$	$\mu_n = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-1,718}{0,7404}\right)^{2*2}}$

Джерело: розроблено авторами

Графічна інтерпретація індикатору ефективного споживання дизпалива при використанні різних за вантажопідйомністю кранів наведена на рис. 1. Як видно із графіку, для цілей контролю енерговитрат потрібно брати до уваги тільки праве розтягнення нечіткого числа на позначення коефіцієнту гальмування енерговитрат. Адже надмірне зростання споживання енергоносіїв негативно позначається на фінансовому становищі будівельного бізнесу, у той час, як зростання у значно меншій мірі, аніж коефіцієнт гальмування, не призводить до фатальних наслідків, – навпаки це явище відображає ефективність управління енергоспоживанням.

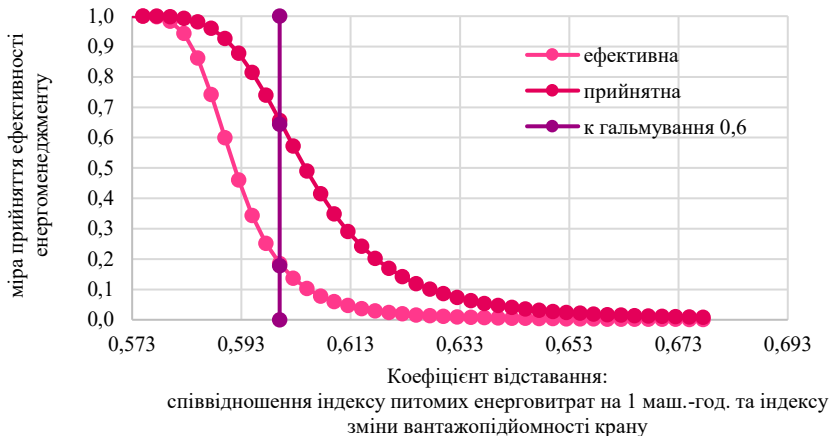


Рис. 1. Графічна інтерпретація системи індикаторів енергоефективності будівельного виробництва і методичного підходу до оцінювання результативності енергоменеджменту на підприємстві (розроблено авторами)

Розглянемо приклад використання пропонованого підходу до оцінювання ефективності менеджменту енергоспоживання. Будівельна компанія на різних об'єктах орендує різні крани із дизельним двигуном і при цьому спостерігається зростання енерговитрат на організацію будівельного виробництва. Передусім потрібно визначити зіставний для різних об'єктів питомий обсяг енерговитрат, тобто вторинний показник енергомисткості. Зокрема, загальну кількість спожитих кіловат, або витрати на оплату електроенергії та інших енергоносіїв варто поділити на кількість відпрацьованих кранами машино-годин. Надалі потрібно знайти співвідношення між вторинними показниками енерговитрат – питомої витратами на 1 машино-годину для різних варіантів підйомних кранів. Зіставленням отриманого індексу зростання енерговитрат із співвідношенням вантажопідйомності кранів, встановлюють коефіцієнт гальмування. Для прикладу його величина склала 0,60. Щоб оцінити якість енергоменеджменту, потрібно встановити міру відповідності цього числа обґрунтованому у дослідженні показникові $a_2=0,57$ для дизельних кранів. Це можна здійснити графічно, шляхом побудови вертикалі із абсцисою 0,60 та встановлення ординат її перетину із зовнішнім та внутрішнім графіками нечіткого числа «біля 0,57» (рис. 1). Міру відповідності наявних результатів енергоменеджменту еталонним також можна обґрунтувати аналітично, оскільки нечітке число (рис. 1) розроблено нами на основі дзвоноподібної функції належності (табл.3).

Її мода 0,573 ($c=0,573$) відповідає коефіцієнту моделі, розтягнення внутрішнє 0,0184 ($a_1=0,253 \cdot 0,0726$), зовнішнє 0,0313 ($a_2=0,431 \cdot 0,073$), внаслідок чого розрахунки будуть наступні:

- міра прийняття енергоменеджменту як «високоєфективний» вельми низька, не досягає 20%:

$$\mu_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c}{a_1}\right)^{2 \cdot b}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0,60-0,573}{0,0184}\right)^{2 \cdot 2}} = \frac{1}{1 + 1,4674^4} = 0,177$$

• міра прийняття енергоменеджменту як такого, ефективність якого «прийнятна», значно вища, проте і не абсолютна:

$$\mu_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c}{a_2}\right)^{2 \cdot b}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0,60-0,573}{0,0313}\right)^{2 \cdot 2}} = \frac{1}{1 + 0,8626^4} = 0,64$$

Отже, аналізоване підприємство має посилити контроль за енерговитратами на організацію будівельних процесів, оскільки його результати не збігаються із «еталонними», розрахованими на основі чинних настанов із визначення вартості будівництва, відповідно до яких більшість замовників визначає максимально прийнятну для себе ціну виконаних робіт. Формули для оцінки системи енергоменеджменту будівельного виробництва не втрачають актуальності за будь-яких варіантів оренди крану – разом із машиністом чи без нього. Оскільки у першому випадку підприємцю доведеться відобразити у кошторисах зменшений показник нормативно-розрахункової трудомісткості будівництва із подальшим зменшенням загальновиробничих та інших витрат, що розраховуються на її базі, зменшення витрат енергоресурсів за всіма напрямками набуває особливої гостроти. При цьому міра відповідності понесених енерговитрат критеріальним показникам вимагає підвищеної уваги кожної відповідальної особи.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Технологічний спосіб спорудження будівельних об'єктів статистично значимо впливає на витрати будівельного підприємства, оскільки виявлено істотні розбіжності у витратах праці, матеріальних та енергетичних ресурсів для варіантів здійснення робіт із використанням баштових, козових кранів, або ж кранів на автомобільному, гусеничному чи пневмоколісному ході. Проте, розбіжності у витратах значною мірою нівелюються в залежності від складності споруджуваного об'єкта.

В процесі виконаного дослідження було встановлено, що більш енергоефективними є крани, які працюють на електроенергії, проте їх екстенсивне завантаження призводить до прискореного зростання енерговитрат на організацію і управління будівництвом. У разі заміни такого механізму іншим, із вищою вантажопідйомністю, зростання спожитої електроенергії відставатиме від динаміки потужності. Натомість стрімко, в 1,72 рази, зростатимуть витрати труда ланки робітників, задіяних на управлінні та обслуговуванні крану, а разом із ними й загальновиробничі витрати, серед яких і енергетичні. Для кранів, що працюють на дизпаливі, спостерігається більш ефективна динаміка: заміна крану більш потужним супроводжується відставанням динаміки експлуатаційних та організаційних витрат: коефіцієнти гальмування витрат дизпалива 0,573, витрат праці й відповідно загальновиробничих 0,750.

Перспективами подальших досліджень насамперед вважаємо здійснення подібних розробок для контролю експлуатаційної енергомісткості іншої будівельної техніки.

Список літератури:

1. Балан О.С. Енергоефективне будівництво в Україні та Франції. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 2. С. 7–12. <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.270421.7.745>.
2. Бахтін Д.С. Впровадження енергоефективних технологій при будівництві нової комерційної нерухомості в Україні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: «Архітектура». 2020. № 2 (4). С. 8–18. <https://doi.org/10.23939/sa2020.02.008>.
3. Брунько П. Фінансування енергоефективного будівництва. *Схід*. 2016. № 1(141). С. 5–13. [https://doi.org/10.21847/1728-9343.2016.1\(141\).61374](https://doi.org/10.21847/1728-9343.2016.1(141).61374).
4. Височанська М.Я., Білотіл В.Ю. Забезпечення енергоефективності в будівлях як одна з переваг "зеленого" будівництва. *Агросвіт*. 2023. № 15. С. 29–42. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2023.15.29>.
5. Книш О.І., Беспалова А.В., Дашковська О.П., Файзуліна О.А. Удосконалення систем управління будівельним підприємством із використанням показників енергоефективності. *Інноваційні енерготехнології*: Зб. пр. VI Міжнар. науково-практ. конф., м. Одеса, 4–8 вересня 2017 р. Одеська національна академія харчових технологій, 2017. С. 72–77.
6. Козик В.В., Марущак У.Д., Марко О.Й. Оцінка енергоефективності в життєвому циклі об'єктів житлового будівництва. *Бізнес Інформ*. 2024. № 5. С. 201–207. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-5-201-207>.
7. Кошторисні норми України. Настанова з визначення вартості будівництва. Затверджено наказом Міністерства розвитку громад та територій України № 281 від 01.11.2021 р.
8. Кошторисні норми України. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів. Затверджено наказом Міністерства розвитку громад та територій України № 156 від 15.06.2021 р.
9. Кривомаз Т.І., Варавін Д.В. Підвищення рівня екологічної безпеки в процесі екоенергоефективної реконструкції житлового фонду в м. Києві. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2017. № 2. С. 78–85.
10. Куцевич Б. Досвід проєктування та будівництва енергоефективних офісних будівель в Україні (друга половина ХХ ст. – перші десятиліття ХХІ ст.). *Українська академія мистецтва*. 2023. № 33. С. 70–78. <https://doi.org/10.32782/2411-3034-2023-33-8>.
11. Ладо Бениайдзе, Хараторська Ю. О. Розвиток енергоефективного житлового будівництва середньої поверховості. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2018. № 50. С. 394–402.
12. Микитась М. В., Теренчук С. А. Оптимізаційна задача управління потокорозподілом ресурсів кластерних організаційних структур енергоефективного будівництва. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2018. № 10. С. 77–84. <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2018.10.77-84>
13. Павлов К., Коротя М. Шляхи забезпечення енергоефективного будівництва на регіональних ринках нерухомості. *Економічний часопис Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки*. 2017. № 1. С. 109–116.
14. Соболева Г.Г., Прижкова О.Ю. Системи управління ризиками енергоефективних проєктів у будівництві. *Економіка. Управління. Інновації*. 2016. № 2 (17). С. 329–341.

15. Росинський А.В., Онофрійчук І.І. Енергоефективність будівельного виробництва як інструмент розвитку економічного потенціалу девелоперської компанії. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2020. № 44. С. 31–39. <https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.44.31-39>.

16. Козик В.В., Марко О.Й. Організаційні засади формування енергоефективності об'єктів житлового будівництва. *Сталий розвиток економіки*. 2025. № 4(51). С. 435–440. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-62>.

17. Погребняк А. В., Кучер М. М., Сабіров О. В., Гриценко А. В., Зінченко Г. К. Інтеграційний підхід до енергоефективності у проєктуванні та будівництві об'єктів готельно-ресторанного бізнесу. *Системи та технології*. 2024. № 68(2). С. 190–196. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.23>.

18. Онофрійчук І.І., Росинський А.В. Обґрунтування складових цифровізованого інструментарію контролю енергоспоживання підприємствами. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. № 55(1). С. 259–272. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).259-272](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).259-272).

Ihor ONOFRIICHUK, Andrii ROSYNSKYI

Justification of energy efficiency indicators in the energy management system of construction production

The article solves a scientific and applied problem of forming organizational and economic tools for evaluating the efficiency of construction production energy management. Given the dominance of the resource-based pricing method, the justification of energy efficiency requires an in-depth analysis of the current resource consumption standards. Since the vast majority of energy consumption on a construction site is accumulated in the process of mechanized vertical movement of loads, the focus of the study is directed at the operational resource intensity of lifting mechanisms. It is proved that relevant energy efficiency indicators should cover not only direct energy carrier costs for the immediate operation of equipment but also associated overhead costs caused by additional labor costs for the management, relocation, and maintenance of mechanization means.

The methodological basis of the research is the translation of statistical analysis methods, econometric modeling, and the theory of “soft computing” into the field of construction economics. Based on the dataset of resource estimating standards for the operation of construction machines and mechanisms, two aggregated samples are analyzed: diesel-engine cranes and electrically driven cranes. Using sample Student's t-tests, statistically significant differences in their operational parameters are empirically confirmed, in particular, total labor costs, needs for fuels and lubricants, and salary-coefficients of labor costs.

The scientific novelty of the research is the development of statistical-econometric two-factor multiplicative models that formalize the nonlinear power-law dependence of the maximum lifting capacity of cranes on the volumes of labor and energy carrier costs. It is established that for diesel cranes, the economies of scale act classically: the replacement of equipment with more powerful ones causes a slowdown in the growth of fuel costs and associated organizational costs. Instead, a diametrically opposite pattern was revealed for electric cranes: the intensification of their capacity causes an accelerated growth in the labor costs of the maintenance team, which exponentially increases energy consumption for general production purposes.

To implement the obtained models into the management contour of a construction enterprise, an author's approach based on the fuzzy set theory is proposed. Interval estimates of the degree of cost growth or savings are developed in the form of parameters of type-2 fuzzy numbers, which compensate for the stochasticity of deviations of actual data from theoretical ones. A graphical-analytical toolset is proposed for making predictive management decisions regarding the optimization of lease relations, the choice of construction equipment, and the identification of hidden resource-saving reserves during the implementation of construction contracts.

Keywords: *energy management, energy efficiency, energy saving, energy consumption, digitalization, lifting cranes, diesel fuel costs, electrical energy costs, general production costs, econometric modeling, fuzzy set theory, estimated construction cost, construction organization, resource management.*

Дата надходження статті: 21.01.2026

Дата прийняття статті: 25.02.2026