

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ.

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.314.1

DOI 10.20535/1813-5420.3.2025.339783

В.С. Бойко¹, д-р техн. наук, ORCID 0000-0003-1018-0642

О.В. Шкардун¹, аспірант, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМУТАЦІЙНИЙ ПРОЦЕС У ТРИФАЗНОМУ ДВОМОСТОВОМУ КОМПЕНСАЦІЙНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ОДНІЄЮ КОМУТУЮЧОЮ ЛАНКОЮ

Наведені результати аналізу енергетичних процесів у досліджуваному трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Досліджуються режими роботи, за яких комутаційний процес у силових електричних вентилях починається в інтервалі роботи транзистора своєї фази. Виявлено вплив моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки на струм фази конденсаторної батареї, величину і форму комутуючої напруги та основні енергетичні показники перетворювача, якими є кут комутації та випереджаючий кут регулювання. Висновки аналітичних досліджень підтверджують результати схематехнічного моделювання, проведеного к пакеті Micro Cap. Описана методика моделювання, наведені її результати, проведено аналіз результатів. Остаточний висновок по роботі зроблено виходячи з величини кутів комутації і регулювання. Найбільш енергоефективними є режими роботи, при яких комутація струму силовими електричними вентилями компенсаційної частини перетворювача відбувається в межах роботи транзисторів комутуючої ланки наступної фази. Бібл. 6, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: конденсаторна батарея, схематехнічна модель, комутуюча напруга, електричний вентиль, кут комутації, кут регулювання.

Вступ. Стаття є продовженням публікації [1] результатів дослідження електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі. Згідно наведеної на рис. 1 схеми, він живиться через трифазний трансформатор з двома вторинними вентильними обмотками, з'єднаними за прямою та зворотною зіркою. Дві трифазні групи силових електричних вентилів (VD1 – VD3 та VD4 – VD6) працюють у компенсаційному режимі. Інші дві трифазні групи силових електричних вентилів (VD7 – VD9 та VD10 – VD12) відносяться до некомпенсаційної частини. Комутуюча ланка перетворювача складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи повністю керованих приладів (типів GTO, IGCT або IGBT). Також до складу перетворювача входить двофазний зрівноважувальний реактор і навантаження R_d та L_d .

Результати дослідження електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі опубліковані також в [2] та інших публікаціях, присвячених пристроям силовій електроніки з конденсаторами у силових колах. Розробка і дослідження таких пристроїв проводиться як у нашій країні [3,4], так і за її межами [5,6].

У публікації [1] ставилося за мету визначення впливу керування транзисторами комутуючої ланки імпульсами чотирикратної частоти на закономірність зміни струму комутації силовими електричними вентилями, величину кутів регулювання і комутації, та визначення енергоефективних режимів роботи. Обсяг досліджень був обмежений режимами роботи, при яких комутаційний процес у силових електричних вентилях компенсаційної частини збігався у часі з інтервалом роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази. Особливості електромагнітних процесів залежали від моменту подачі імпульсів на транзистори комутуючої ланки. Тож було досліджено декілька випадків. Коли початок

комутації силового електричного вентиля VD1 починається в інтервалі роботи VT2, а закінчується – коли VT2 виходить з роботи. Коли комутація силового електричного вентиля VD1 починається і закінчується в інтервалі роботи VT2. Коли початок комутації силового електричного вентиля VD1 збігається з моментом вступу в роботу транзистора VT2.

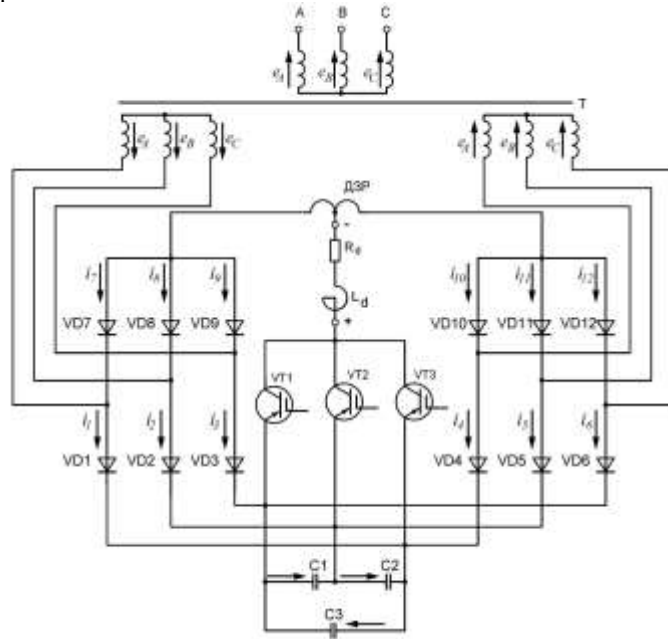


Рисунок 1 - Схема трифазного двомостового компенсаційного перетворювача

З погляду можливості генерування максимальних обсягів реактивної енергії, тобто, досягнення високих показників енергоефективності, найкращим є останній випадок. За його умов випереджаючий кут регулювання має найбільше значення, а кут регулювання у всіх випадках – однаковий.

У всіх зазначених вище випадках, в інтервалі комутації струм фази конденсаторної батареї змінюється за законом

$$i_c = \frac{1}{3} I_d - \frac{2}{3} i_k \quad (1)$$

Однак, опубліковані матеріали є лише частиною досліджень електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки.

Мета роботи. Узагальнити результати досліджень електромагнітних процесів при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, та спираючись на його основні енергетичні характеристики зробити висновок щодо найбільш енергоефективних режимів роботи.

Результати досліджень. Система вхідної ЕРС трифазного перетворювального трансформатора схеми рис. 1 є стандартною трифазною системою прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 6 + \psi); \\ e_B &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 2 + \psi); \\ e_C &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6 + \psi), \end{aligned} \quad (2)$$

де E_m - амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора; ϑ – поточна змінна; ψ – початкова фаза напруги при включенні вентиля.

Режим роботи з випереджаючим кутом регулювання α (компенсаційний режим) мають силові електричні вентиля катодної групи VD1 – VD6. Послідовність їх вступу в роботу буде такою: VD1 → VD2 → VD3 та VD4 → VD5 → VD6. Це відповідає системі прямого чергування фаз трифазних ЕРС перетворювального трансформатора. Між моментами вступу в роботу зазначених трійок силових електричних вентилів має місце зсув за фазою, що дорівнює половині періоду, відповідно до схеми з'єднання вентильних обмоток.

Чотирикратна частота імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки також відповідає прямому чергуванню фаз. Відповідно, послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки VT1 → VT2 → VT3. Тобто, стосовно алгоритму комутації силових електричних вентилів та транзисторів

комутуючої ланки, режим роботи перетворювача, досліджений у [1], та той, результати якого представляє поточна публікація – абсолютно однакові.

Але у поточному дослідженні затримка подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки менша, ніж у попередньому. І якщо у попередньому дослідженні комутаційний процес у силовому електричному вентилі проходив у межах роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, то у поточному дослідженні він проходить у межах роботи своєї фази. Зрозуміло, що кінець попереднього робочого режиму є початком наступного.

Ураховуючи викладені вище фактори, здійснено графічну побудову кривих струму фази конденсаторної батареї для усіх можливих варіантів досліджуваного режиму роботи перетворювача. Крива половини періоду струму фази конденсаторної батареї представлена на рис. 2 у вигляді чотирьох графіків. Графічна побудова здійснена якісно, без урахування величини випереджаючого кута регулювання силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача.

На рис. 2,а зображено випадок, який є межею між попереднім режимом роботи перетворювача і наступним. Результати його дослідження викладено у [1].

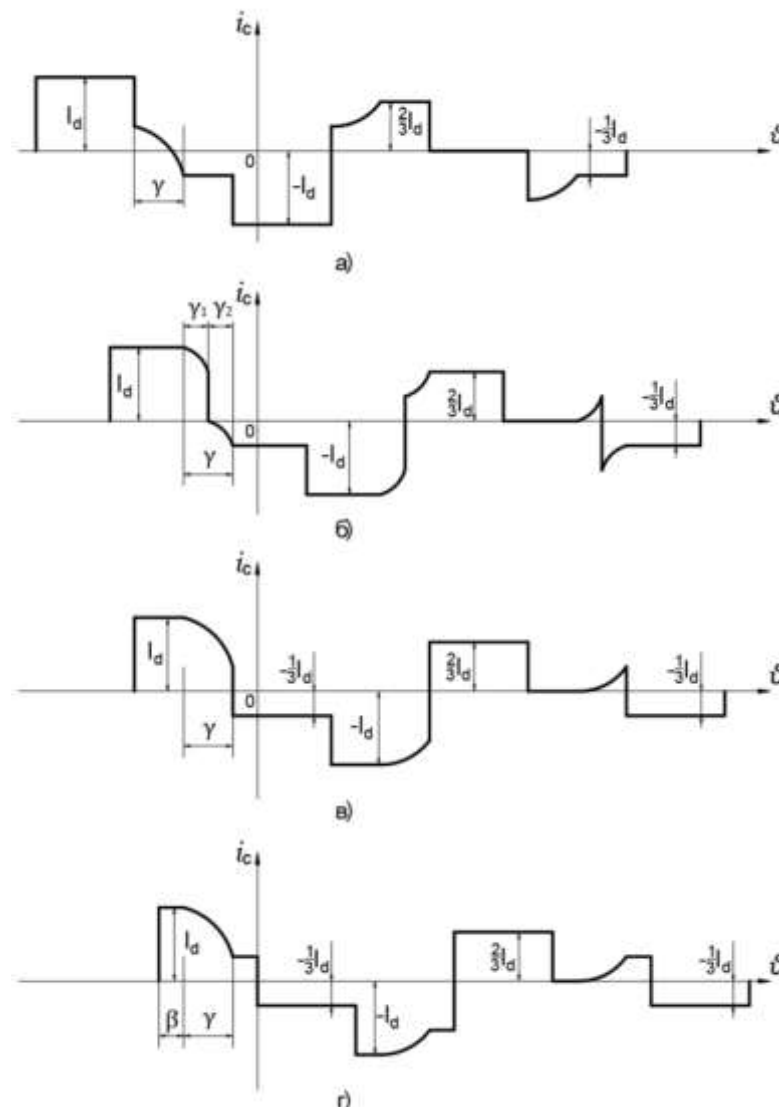


Рисунок 2 – Форма струму фази конденсаторної батареї

Якщо затримку подачі імпульсу керування транзисторами комутуючої ланки дещо зменшити, таким чином, щоб інтервал комутації (γ) силового електричного вентиля VD1 проходив через момент перемикання з транзистора VT1 на VT2, струм фази конденсаторної батареї поділяється на дві частини. Їх протяжність (γ_1) та (γ_2) у сумі дорівнює куту комутації (γ). Для однозначності введемо у розгляд коефіцієнт n , який визначатиме частку кута комутації (γ_1) відносно усього кута комутації ($\gamma_1 = n\gamma$). При цьому частка кута комутації ($\gamma_2 = (1 - n)\gamma$ чи $\gamma_2 = \gamma - \gamma_1$). Що і зображено на рис. 2,б.

Режим роботи перетворювача у такому випадку буде продовжуватись, допоки зміна моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки не зменшить частку кута комутації (γ_2) до нуля. Цей випадок, зображений на рис. 2,в, є межею з наступним.

Наступний випадок, зображений на рис. 2,г. Він відповідає подальшому зменшенню затримки подачі імпульсів керування. При аналітичному дослідженні цю величину позначимо через β , що також показано на рис. 2,г.

Спільним для усіх трьох випадків робочого режиму перетворювача, який досліджується у поточній роботі, є вираз струму фази конденсаторної батареї в інтервалі комутації:

$$i_c = I_d - \frac{2}{3}i_k \quad (3)$$

Для розрахунку конденсаторної напруги (комутуючої напруги), застосуємо співвідношення:

$$u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_c(0) \quad (4)$$

З викладеного вище випливає, що дослідженню підлягають два випадки, струм фази конденсаторної батареї яких зображено на рис. 2,б та рис. 2,г. Випадок робочого режиму перетворювача, зображений на рис. 2,в, є межею двох згаданих вище випадків і його дані мають впливати з результатів аналізу випадку 1 та випадку 2.

Оскільки подальше дослідження проводитиметься із застосуванням нормованих співвідношень, наведемо застосовану при цьому систему базисних величин:

базисна напруга $U_{\bar{o}} = \sqrt{3}E_m$;

базисний струм: $I_{\bar{o}} = \sqrt{3}E_m / 2x_{\gamma}$, де x_{γ} - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведене до його вторинної обмотки;

базисна частота $\omega_{\bar{o}} = \omega = 314$;

базисна реактивність кола змінного струму: $x_{\bar{o}} = \sqrt{3}E_m / 2I_d$.

При цьому нормовані вираз співвідношень (3) та (4) набудуть вигляду:

- струм фази конденсаторної батареї в інтервалі комутації

$$i_{C^*} = 1 - \frac{2}{3}i_{k^*} \quad (5)$$

- комутуюча напруга при з'єднанні конденсаторної батареї трикутником

$$u_{C\Delta^*} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta + u_{C^*}(0) \quad (6)$$

Спільний розв'язок (5) та (6) дає змогу отримати закономірність зміни комутуючої напруги у досліджуваному режимі роботи перетворювача. Розрахунок проведено за окремими інтервалами.

Випадок 1.

I інтервал: $i_{C^*} = 1 - n \frac{2}{3}i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_1$;

$$u_{C\Delta^*(1)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\vartheta}{2} - n \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_1$, $u_{C\Delta^*(1)k} = x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\gamma_1}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$.

II інтервал: $i_{C^*} = -(1-n) \frac{2}{3}i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_2$;

$$u_{C\Delta^*(2)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(1)k} = -x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \left((1-n) \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\gamma_1}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_2$, $u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\gamma_1}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$.

III інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_2)$;

$$u_{C\Delta^*(3)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(\frac{3\gamma_1}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інт. при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma_2)$, $u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{12} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$

IV інтервал: $i_{C^*} = -1$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_1)$;

$$u_{C\Delta^*(4)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{12} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інт. при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma_1)$, $u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + 3\gamma_1 + \frac{\gamma_2}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$

V інтервал: $i_{C^*} = -1 + n \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_1$;

$$u_{C\Delta^*(5)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2} + \frac{n}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + 3\gamma_1 + \frac{\gamma_2}{2} - n \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_1$, $u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{2} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$.

VI інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{2} + (1-n) \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_2$;

$$u_{C\Delta^*(6)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(\frac{3\vartheta}{4} + (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) +$$

$$+ x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{2} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_2$, $u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{5\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$

VII інтервал: $i_{C^*} = 2/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_2)$;

$$u_{C\Delta^*(7)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \vartheta + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{5\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інт. при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma_2)$, $u_{C\Delta^*(7)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{1\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$

VIII інтервал: $i_{C^*} = 0$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_1)$;

$$u_{C\Delta^*(8)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(7)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - \frac{1-n}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0) = u_{C\Delta^*(8)k}$$

IX інтервал: $i_{C^*} = n \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_1$;

$$u_{C\Delta^*(9)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(8)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(\frac{n}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{4} - \frac{n}{2} \int_0^{\gamma_1} i_{k^*} d\vartheta - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_1$, $u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{4} - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$.

X інтервал: $i_{C^*} = -\frac{1}{2} + (1-n) \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma_2$;

$$u_{C\Delta^*(10)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{4} + \frac{1-n}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) + x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} + \frac{\gamma_2}{4} - (1-n) \frac{1}{2} \int_0^{\gamma_2} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma_2$, $u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} - \frac{\gamma_2}{2}\right) + u_{C^*}(0)$.

XI інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_2)$;

$$u_{C\Delta^*(11)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2} - \frac{\gamma_2}{2}\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6 - \gamma_2$, $u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{4} + \frac{3\gamma_1}{2}\right) + u_{C^*}(0)$

XII інтервал: $i_{C^*} = 1$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma_1)$;

$$u_{C\Delta^*(12)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{3\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{3\gamma_1}{2}\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma_1)$, $u_{C\Delta^*(12)k} = u_{C^*}(0)$.

Визначимо початкове значення комутуючої напруги, виходячи з умови, що крива комутуючої напруги, не має постійної складової, тобто, її середнє значення за період дорівнює нулю. Виконавши розрахунок, подробиці якого тут не наведено, отримаємо:

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{(5n+1)\gamma}{4} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right) \quad (7)$$

Випадок 2.

I інтервал: $i_{C^*} = 1 - \frac{2}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma$;

$$u_{C\Delta^*(1)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\vartheta}{2} - \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(1)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\gamma}{2} - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0)$.

II інтервал: $i_{C^*} = 1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(2)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(1)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{3\gamma}{2} - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{12} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta/2\right) + u_{C^*}(0)$.

III інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(3)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{12} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta/2\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta/2\right) + u_{C^*}(0)$.

IV інтервал: $i_{C^*} = -1$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(4)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta/2\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \beta$, $u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - 2\beta\right) + u_{C^*}(0)$.

V інтервал: $i_{C^*} = -1 + \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma$;

$$u_{C\Delta^*(5)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - 2\beta\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - 2\beta\right) + u_{C^*}(0)$.

VI інтервал: $i_{C^*} = -2/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(6)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(5)k} = -x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \vartheta + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - 2\beta\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

VII інтервал: $i_{C^*} = 2/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(7)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \vartheta + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(7)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

VIII інтервал: $i_{C^*} = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(8)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(7)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0) = u_{C\Delta^*(8)k}.$$

IX інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3} i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma$;

$$u_{C\Delta^*(9)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(8)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

X інтервал: $i_{C^*} = 1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(10)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{12} - \frac{3\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0)$.

XI інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(11)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{12} - \frac{3\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{3\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0)$.

XII інтервал: $i_{C^*} = 1$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(12)k} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{3\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{3\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \beta$, $u_{C\Delta^*(12)k} = u_{C^*}(0)$.

Визначимо початкове значення комутуючої напруги, виходячи з тих же умов, що і раніше. При цьому отримаємо:

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\beta - \frac{\gamma}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) \quad (8)$$

Проаналізуємо вирази (7) та (8). Якщо у випадку 1 затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки буде такою, що частина кута комутації $\gamma_2 = 0$. Іншими словами, при цьому $n = 1$. За цієї умови з виразу (7) отримуємо:

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{3\gamma}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) \quad (9)$$

Останнє співвідношення відповідає межі першого випадку робочого режиму перетворювача, який досліджується. Він представлений на рис. 2,в.

Якщо цю ж саму межу отримати з виразу (8), у нього потрібно підставити $\beta = (\pi/6 - \gamma)$. В результаті отримаємо те ж саме співвідношення (9).

Останні висновки є досить важливими. З одного боку вони підтверджують правомірність теоретичних міркувань щодо досліджуваного робочого режиму та справедливості співвідношень (7) і (8). З іншого – дають підстави для твердження, що поділ на частини стуму фази конденсаторної батареї в

інтервалі комутації не є результатом поділу на частини кривої струму комутації силових електричних вентилів.

Підтвердімо отримані висновки шляхом застосування моделювання у системі Micro Cap 12. Відповідно до схеми рис. 1 досліджуваного трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, на рис. 3 наведена його схематехнічна модель, на якій зазначені параметри елементів моделі і струми її віток.

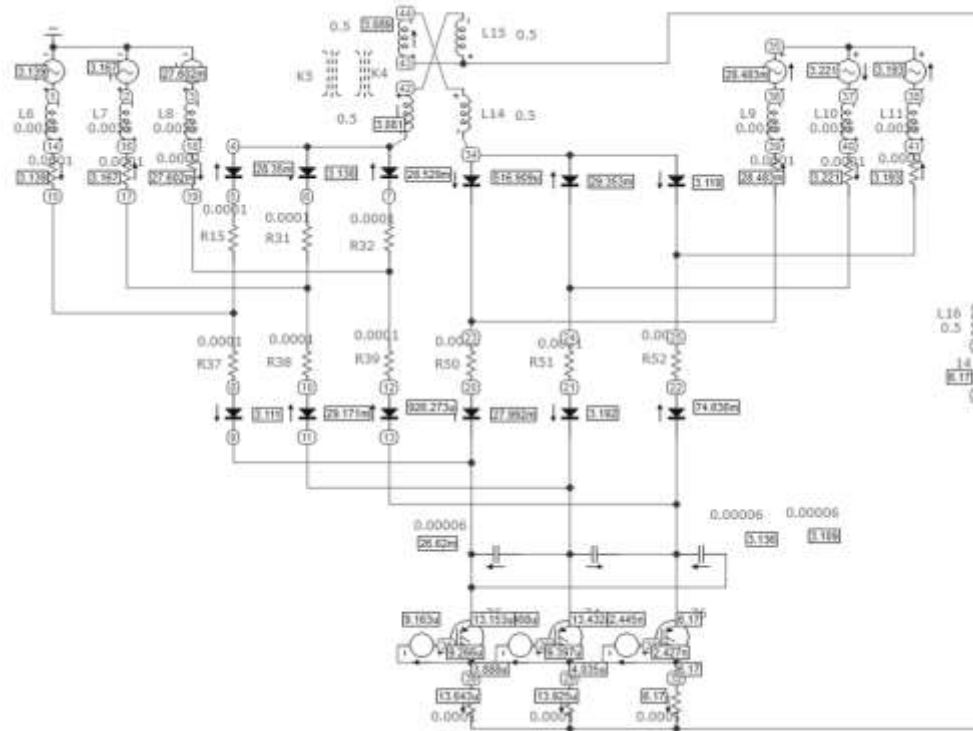


Рисунок 3 – Схематехнічна модель трифазного двомостового компенсаційного перетворювача

На рис. 3 відсутні дані щодо характеристики джерела живлення. Змодельована трифазна система ЕРС прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= 57.8\sin(\vartheta + 0.523); \\ e_B &= 57.8\sin(\vartheta - 1.57); \\ e_C &= 57.8\sin(\vartheta + 2.618). \end{aligned} \quad (10)$$

Як бачимо, амплітудне значення фазної ЕРС трансформатора дорівнює 57.8 В.

Змодельуємо усі випадки робочого режиму перетворювача, які досліджувались аналітично. Мова йде про випадок 1, випадок 2 та їх межу. Результати моделювання представимо у графічній формі. Для аналізу необхідно мати криву лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора u_{CA} , оскільки точка переходу її через нульове значення є моментом природної комутації. Також у роздруківці результатів схематехнічного моделювання має бути крива комутуючої напруги u_C , напруги на транзисторі комутуючої ланки u_{VT1} і струму силового електричного вентиліа i_{VD1} .

Дані результатів схематехнічного моделювання наведені на рис. 4.

Числові дані режимів роботи перетворювача, які моделюються, знаходяться у колонках даних під Left та Right. Відлік часу здійснюється у мілісекундах. Значення цього моменту – нижній рядок T(Secs) колонки даних. Інші числові дані:

R(12)*10 – величина струму силового електричного вентиліа VD1 (A), помножена на 10;

I(13,9)(V)*10 – струм фази конденсаторної батареї (A);

V(3,1)(V) – лінійна напруга u_{CA} вторинної обмотки трансформатора(B);

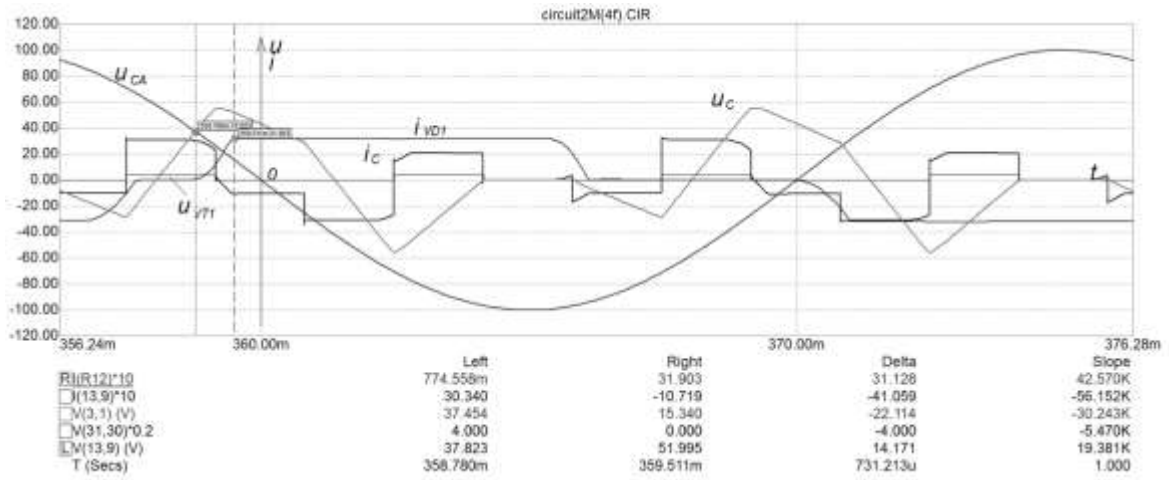
V(13,9)(V) – величина комутуючої напруги конденсаторів u_C (B);

V(31,30)(V) – імпульс керування транзистором VT1 комутуючої ланки.

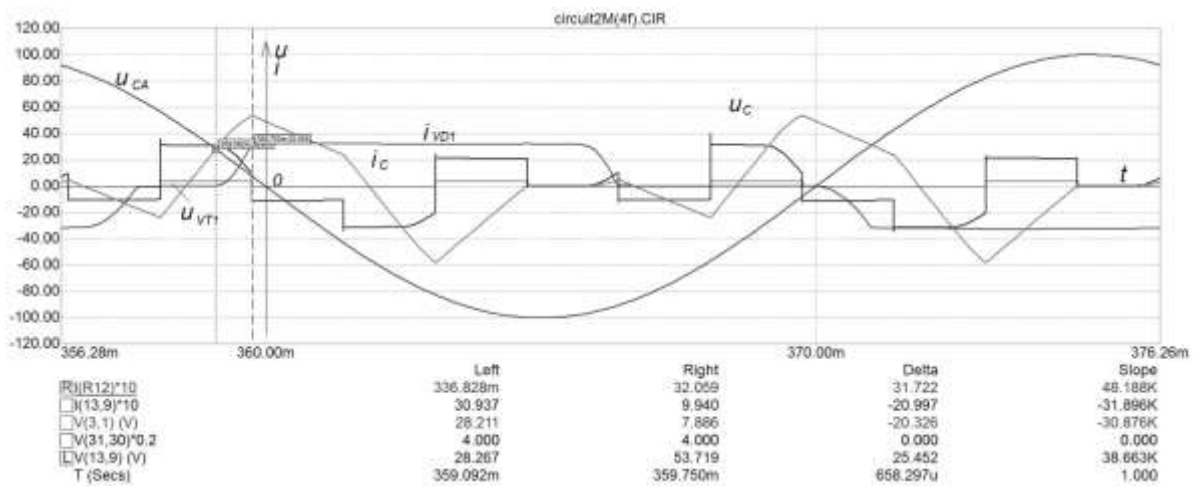
На рис. 4 ліва суцільна вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу. У цей момент лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівнюється з комутуючою напругою. За цим показником розраховуємо випереджаючий кут регулювання $\alpha = \arcsin[u_{C^*}(0)]$.

У кінці комутаційного процесу струм комутації досягає свого максимального значення. Цей момент часу позначений правою пунктирною вертикальною лінією. Числова характеристика моменту знаходиться під Right. Різниця часу між початком комутаційного процесу і його закінченням – Delta. Ураховавши, що одній мілісекунді на рис.4 відповідають 18° , є можливість розрахувати кут комутації у градусах, домноживши числове значення Delta на 18.

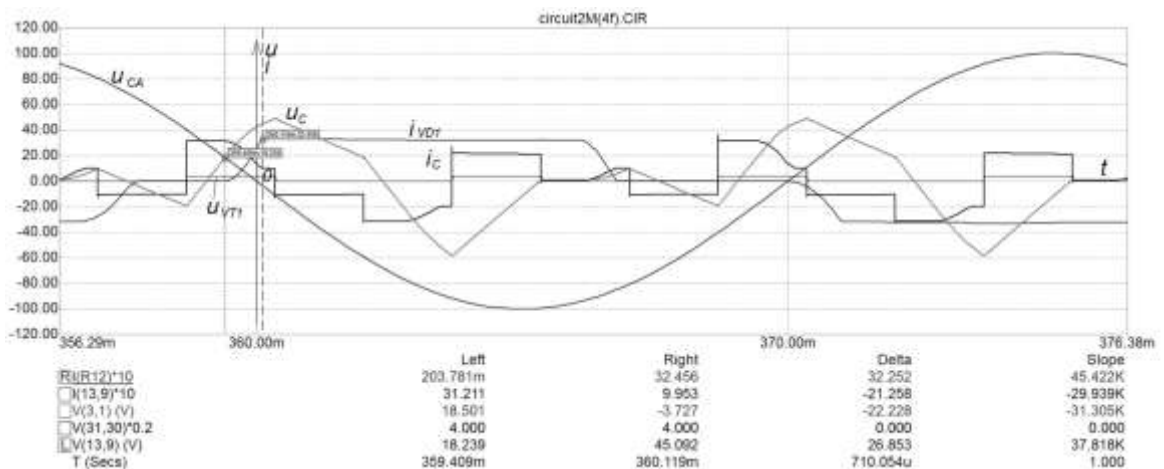
Основні характеристики енергетичного процесу трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, визначені і розраховані за результатами схемотехнічного моделювання, занесені у табл. 1.



а – випадок 1



б – межа випадку 1 і випадку 2



в – випадок 2

Рисунок 4 – Результати моделювання

Аналіз результатів числового розрахунку на основі даних схемотехнічного моделювання, показує стійку тенденцію до зменшення величини комутуючої напруги, у разі регулювання моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки, шляхом зменшення величини затримки. Також звернімо увагу, що в усіх досліджуваних випадках робочого режиму перетворювача, початок комутації струму силовими електричними вентилями припадає на інтервал роботи транзистора комутуючої ланки своєї фази. Це є принциповою відмінністю щодо умов комутаційного процесу, дослідженого у [1].

Таблиця 1 – Результати схемотехнічного моделювання

Режим роботи	Числова енергетична характеристика		
	u_C [В]	α [°]	γ [°]
Випадок 1	37.6	22.1	13.16
Межа випадків 1 і 2	28.2	16.4	11.84
Випадок 2	18.4	10.6	12.78

За інших однакових умов, зменшення величини комутаційної напруги однозначно призводить до зменшення випереджаючого кута регулювання α . Що ж стосується величини кута комутації γ , то у його зміні будь-якої стійкої тенденції не спостерігається. Тим не менше, отримані у дослідженні результати є досить обнадійливими. Тому що у компенсаційних перетворювачах, навіть при закономірності зміни форми струму комутації силових електричних вентилів близькою до квадратичної, зсув першої гармоніки вхідного струму перетворювального трансформатора не перевищує двох третин кута комутації. Ураховуючи останнє, робота перетворювача у режимі, який підпадає під випадок 2, є також ефективною. У такому випадку перетворювач не здатний генерувати у мережу реактивну енергію, але власну реактивну енергію компенсує.

Висновки. Матеріали вступу до статті та результати досліджень поточної публікації дозволяють зробити узагальнюючі висновки щодо енергетичних спроможностей трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, у випадку регулювання його робочого режиму подачею на транзистори комутуючої ланки імпульсів керування чотирикратної частоти.

1. Якщо комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, основні величини енергетичного процесу не залежать від затримки подачі імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Але випереджаючий кут регулювання набуває найбільших значень. Тому такий режим роботи є енергоефективним і рекомендується для застосування у випадках стабільного навантаження перетворювача.

2. Якщо комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки своєї фази, основні величини енергетичного процесу залежать від затримки подачі імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Причому, при зменшенні величини затримки спостерігається стійка тенденція до зменшення величини випереджаючого кута регулювання. У цьому режимі робота перетворювача також є ефективною, але спроможність генерувати у мережу реактивну енергію – менша.

3. Підтверджено адекватність і прийнятність застосованої методики аналізу роботи компенсаційного перетворювача шляхом схемотехнічного моделювання.

4. Енергетична характеристика досліджуваного перетворювача при регулюванні режимів його роботи подачею імпульсів керування чотирикратної частоти на транзистори комутуючої ланки, є ефективною при живленні споживачів з різними характеристиками. Це обумовлено особливостями схемотехнічної побудови досліджуваного перетворювача та широкими можливостями щодо регулювання процесу живлення споживачів постійного струму.

Список використаної літератури

1. В.С. Бойко, О.В. Шкардун, 2025. Комутаційний процес у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 1, С. 96-105, DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324269>.

2. Бойко, В. 2024. Комутуюча напруга трифазного двомостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 3 (Трав 2024), 025. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. с.25-35.

3. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019, p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.

4. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В., Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. Технічна електродинаміка. 2018. №6. С. 62-68.

5. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.

6. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.

V. Boiko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1018-0642

O. Shkardun¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

COMMUTATING PROCESS IN A THREE-PHASE TWO-BRIDGE COMPENSATION CONVERTER WITH A SINGLE COMMUTING LINK

The article presents the results of the analysis of energy processes in the investigated three-phase two-bridge compensating converter at a four-fold frequency of control pulses of the transistors of the commutating link. The operating modes are investigated, in which the commutating process in the power electrical valves begins in the operating interval of the transistor of its phase. The influence of the moment of supplying control pulses to the transistors of the commutating link on the phase current of the capacitor battery, the magnitude and shape of the commutating voltage and the main energy indicators of the converter, which are the commutating angle and the leading angle of regulation, is revealed. The conclusions of the analytical studies confirm the results of the circuit simulation carried out in the Micro Cap package. The modeling technique is described, its results are presented, and the analysis of the results is carried out. The final conclusion on the work is made based on the magnitude of the commutating and regulation angles. The most energy efficient operating modes are those in which the current commutating by the power electrical valves of the compensating part of the converter occurs within the operating limits of the transistors of the commutating link of the next phase. Refer. 6, fig. 4, table. 1.

Keywords: capacitor battery, circuit model, commutating voltage, electric valve, commutating angle, regulation angle.

References

1. V.S. Boiko, O.V. Shkardun, 2025. Commutating process in a three-phase two-bridge compensation converter. *Energy: economics, technologies, ecology*, No. 1, pp. 96-105, DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324269>

2. Boiko, V. 2024. Commutating voltage of the three-phase double-bridge compensating converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 3 (May, 2024), 025. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. c.25-35.

3. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2019, p. p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>. (Ukr).

4. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V., Influence of FACTS on the electric network mode during direct start of a powerful asynchronous machine as part of a complex load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. pp. 62-68.

5. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.

6. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.

Надійшла: 23.04.2025

Received: 23.04.2025

ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМІВ MPPT

У представленому дослідженні проаналізовано динамічну поведінку гібридної енергетичної системи (PV-BESS-Grid), розробленої для забезпечення надійного живлення критичних навантажень, зокрема насосних агрегатів. Система інтегрує фотоелектричний масив, акумуляторний накопичувач енергії та підключення до централізованої електромережі, що є ключовим для підвищення енергетичної стійкості в умовах нестабільного централізованого постачання. Центральним аспектом даної роботи є порівняльний аналіз та кількісна оцінка ефективності двох фундаментальних алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT): класичного Perturb & Observe (P&O) та вдосконаленого Incremental Conductance (INC). Методологія базується на комплексному динамічному моделюванні в середовищі MATLAB/Simulink, що відтворює роботу системи за трьома характерними сценаріями: автономна денна генерація, нічний режим роботи від батареї та гібридний режим з підтримкою від мережі. Результати підтверджують здатність гібридної топології підтримувати виняткову стабільність напруги на шині постійного струму (в межах 620–640 В) та забезпечувати безшовний перехід між джерелами енергії. Дослідження кількісно доводить, що вибір MPPT-алгоритму має вирішальний вплив не лише на енергетичну ефективність системи (яка для INC оцінюється на 1–3% вищою), але й на її загальну стабільність, надійність та довговічність компонентів. Робота обґрунтовує доцільність застосування алгоритму Incremental Conductance як критично важливого елемента при проектуванні робастних гібридних систем для застосувань, що вимагають гарантованого та якісного електропостачання.

Ключові слова: гібридна система, насосна установка, алгоритми MPPT, динамічне моделювання, управління енергією.

Вступ.

Агресивні дії росії спрямовані на знищення та дезорганізацію енергетичних об'єктів та систем України, чинять негативний вплив на економіку, безпеку та побут її громадян. Руїнування енергетичних підприємств, електромереж та енергоблоків веде до перебоїв у енергопостачанні, зниженню рівня комфорту життя населення та загрози для національної безпеки.

Використання сонячних фотоелектричних систем для живлення насосів гарячого водопостачання та теплових житлових будинків має низку значущих переваг, які роблять цей підхід актуальним і стратегічно важливим [1]. Це особливо важливо в умовах нестабільного або відсутнього постачання електроенергії через пошкодження інфраструктури. Використання сонячної енергії знижує залежність від викопного палива та електромереж, що дозволяє суттєво скоротити витрати на експлуатацію систем опалення і гарячого водопостачання. Однак головною перешкодою використання цих систем є нестабільний характер генерації енергії, спричинений добовими та погодними змінами сонячної інсоляції, що обмежує їх застосування для живлення критичних навантажень [2]. Для вирішення цієї проблеми все частіше впроваджуються гібридні системи, які поєднують фотоелектричне генерування (PV) з акумуляторними системами зберігання енергії (BESS). Такі системи здатні забезпечити автономність та підвищити надійність електропостачання. Інтеграція третього компонента - підключення до централізованої електромережі (grid-tied) - створює ще більшу гнучку та надійну конфігурацію, здатну працювати як в автономному, так і в мережевому режимі. Для максимально ефективного використання потенціалу фотоелектричних модулів у складі гібридних систем критично важливе впровадження алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT) [3-5]. Ці алгоритми дозволяють системі автоматично знаходити оптимальну точку роботи сонячної панелі незалежно від умов освітлення та навантаження, мінімізуючи втрати енергії через неефективну роботу.

Мета та завдання.

Мета дослідження полягає у порівняльному аналізі динамічної поведінки та ефективності керування гібридної фотоелектричної системи (PV-BESS-Grid), що живить критичне навантаження. Дослідження сфокусоване на кількісній оцінці переваг алгоритму відстеження точки максимальної потужності (MPPT) Incremental Conductance (INC) над класичним Perturb & Observe (P&O) за умов різких змін сонячної

інсоляції з метою визначення оптимальної стратегії для забезпечення максимальної надійності та енергетичної ефективності системи.

Матеріал і результати досліджень.

У дослідженні розглядається гібридна фотоелектрична система для забезпечення автономного і надійного електропостачання багатоповерхового житлового будинку в м. Київ, обладнаного двома індивідуальними тепловими пунктами (ТП), кожен з яких оснащений сучасними насосними агрегатами Grundfos для опалення та гарячого водопостачання [6]. Основні техніко-економічні показники будівлі включають 16 поверхів, 260 квартир і понад 29 тисяч м² загальної площі.

Досліджувана система (рис. 1) складається з двох ідентичних фотоелектричних масивів (по 330 модулів SunPower SPR-305 кожен, з'єднаних за послідовно-паралельною схемою), що підключені до шини постійного струму через підвищувальні DC/DC-перетворювачі з MPPT-контролерами; до тієї ж шини підключена акумуляторна батарея, яка виконує функцію енергетичного буфера. Трифазний інвертор перетворює напругу з DC Bus на змінну для живлення трифазного відцентрового насоса (Grundfos TP65-190/2 N), а система може бути підключена до зовнішньої мережі через трансформатор і вимикач для забезпечення резервного живлення та зарядки батареї.

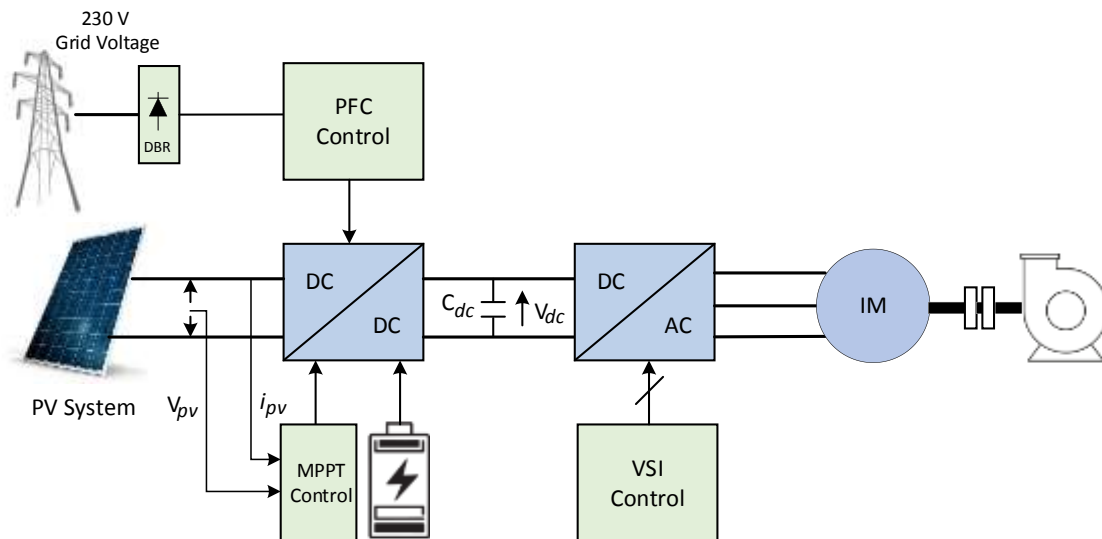


Рисунок 1 - Функціональна схема живлення насоса від фотоелектричних модулів

Для відстеження точки максимальної потужності сонячної панелі було використано два методи.

Алгоритм INC базується на фундаментальній математичній властивості вольт-амперної характеристики фотоелектричної панелі, згідно з якою в точці максимальної потужності (MPPT) похідна потужності по напрузі дорівнює нулю ($dP/dV = 0$) [7-9]. Алгоритм INC порівнює миттєву провідність (I/V) зі зміною провідності (dI/dV), визначаючи положення робочої точки відносно ТМП. Це дозволяє йому точно ідентифікувати досягнення максимуму і припинити збурення, що теоретично усуває проблему усталених коливань. Однак цей метод є більш вимогливим до обчислювальних ресурсів та чутливим до точності вимірювань сенсорів.

На відміну від нього, класичний метод P&O базується на ітераційному підході: система вносить невелике збурення (зміну робочої напруги) і спостерігає за зміною вихідної потужності [10, 11]. Якщо потужність зростає, збурення в тому ж напрямку продовжується; якщо впала - напрямок змінюється на протилежний. Ця простота є перевагою, однак вона обумовлює і головний недолік: для того, щоб переконатися, що система знаходиться в точці максимальної потужності, алгоритм змушений постійно "коливатися" навколо неї, що неминуче призводить до втрат енергії в усталеному режимі.

З метою об'єктивної оцінки ефективності алгоритмів максимального відстеження потужності (MPPT) доцільно зосередити увагу на динамічних характеристиках акумуляторної системи накопичення енергії (BESS), а не лише на показниках насосного агрегату [12]. Такий підхід обґрунтований тим, що BESS виступає чутливим індикатором енергетичного балансу в гібридній системі: усі небаланси потужності, спричинені коливаннями генерації фотоелектричного масиву внаслідок недосконалості роботи MPPT-контролерів, оперативно компенсуються або акумулюються акумулятором. Тому аналіз струму та напруги BESS дає змогу отримати високочастотну спектральну характеристику роботи системи та з високою точністю відстежувати відгук алгоритму на зміни вхідних параметрів.

Для проведення порівняльного аналізу ефективності двох алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT) було застосовано ідентичний 10-секундний сценарій динамічного моделювання в середовищі Matlab Simulink (рис. 2).

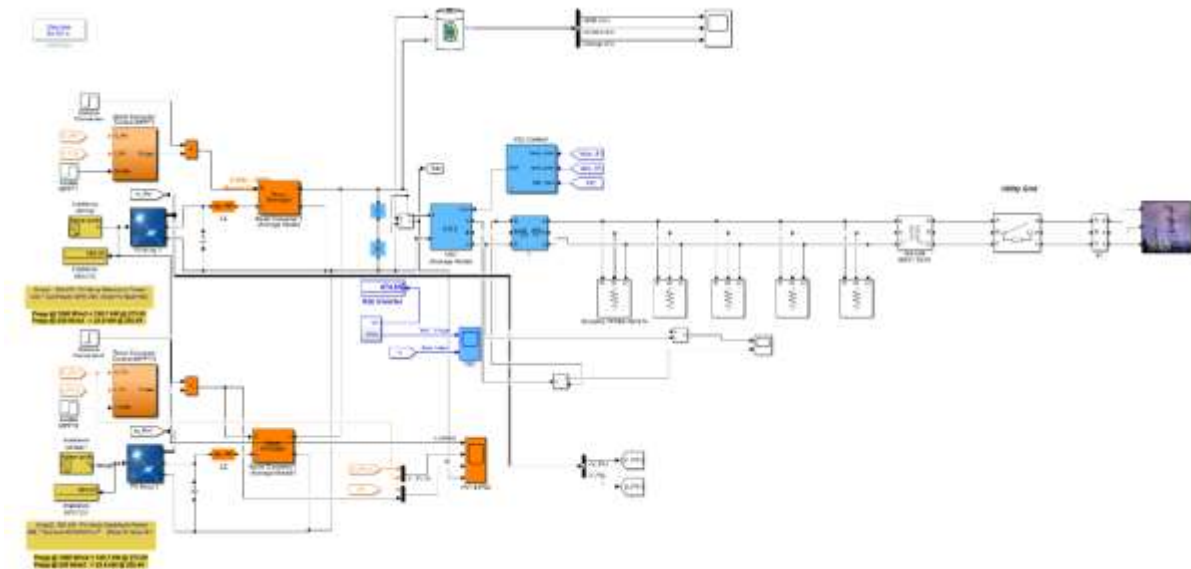


Рисунок 2 - Структурна схема гібридної системи в середовищі Matlab Simulink

Цей сценарій, що складається з трьох характерних режимів роботи, дозволяє оцінити як усталену, так і динамічну поведінку системи за умов різких змін інсоляції:

Режим 1. Автономна робота від PV з зарядкою BESS ($t = 0-3$ с). Рівень інсоляції становить ~ 990 Вт/м². Система відключена від мережі. Надлишок енергії від PV-масиву використовується для зарядки BESS.

Режим 2. Автономна робота від BESS ($t = 3-7$ с). Рівень інсоляції різко падає до 0 Вт/м² (імітація ночі/затіннення). Живлення насоса повністю забезпечується за рахунок розряду BESS.

Режим 3. Гібридна робота від PV та мережі з зарядкою BESS ($t = 7-10$ с). Інсоляція відновлюється до 1000 Вт/м², і система підключається до мережі. PV-масив та мережа спільно живлять навантаження та забезпечують інтенсивну зарядку BESS.

Симуляція проводилася послідовно для кожного з MPPT - алгоритмів за абсолютно однакових вхідних умов (рис. 3, 4). Оцінка ефективності кожного алгоритму проводилася шляхом аналізу ключових системних показників, де основним індикатором стабільності виступала напруга на шині постійного струму (Vdc).

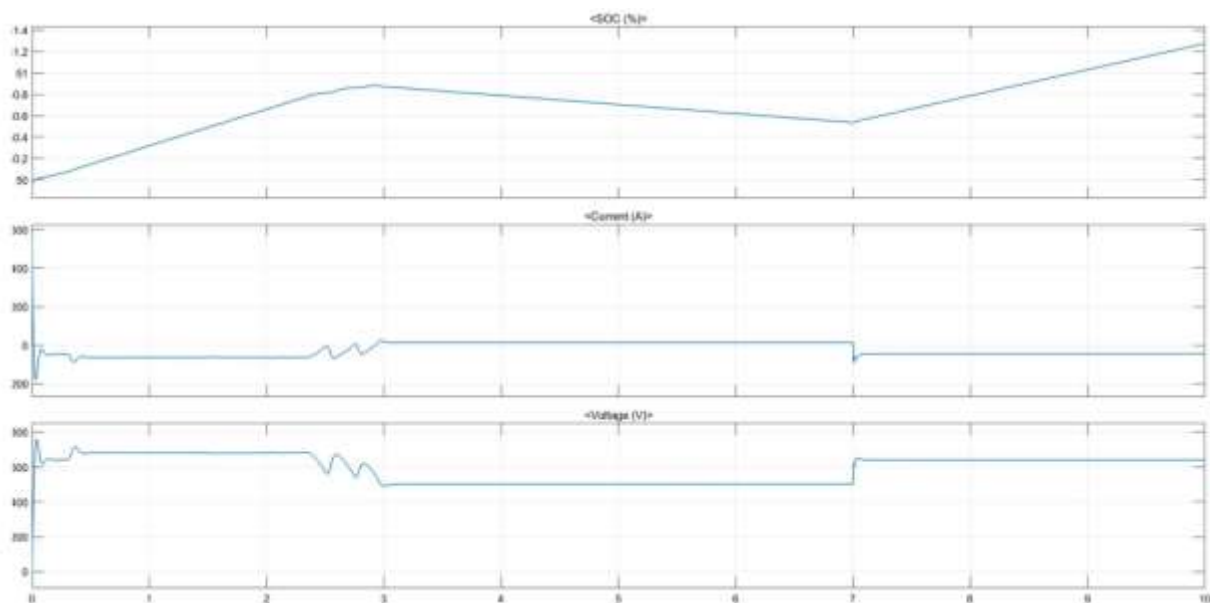


Рисунок 3 - Динамічні характеристики системи при роботі з MPPT-алгоритмом P&O

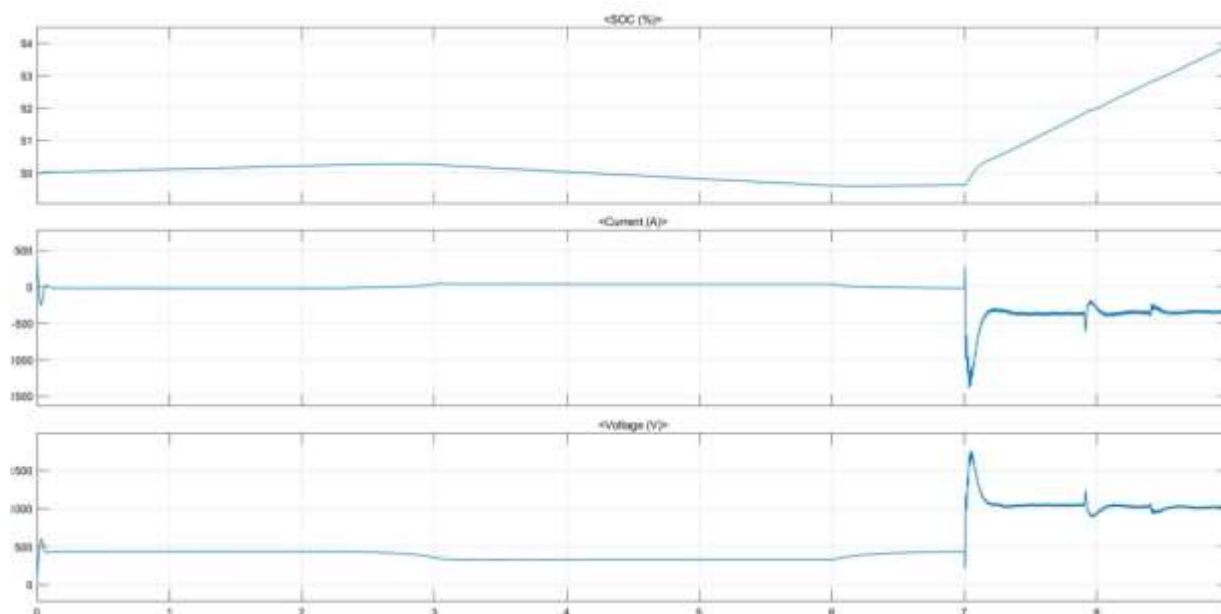


Рисунок 4 – Динамічні характеристики системи при роботі системи з MPPT-алгоритмом INC

Порівняння алгоритмів MPPT проводилося за трьома ключовими критеріями: стабільність у сталому режимі, динамічна реакція на зміну умов та інтегральна енергетична ефективність.

У сталому режимі за високої інсоляції класичний P&O демонструє помітні коливання струму та напруги, що створює додаткове навантаження на акумулятор і призводить до втрат енергії. На графіках видно, що амплітуда пульсацій струму батареї сягає 40 А, а напруги - 30 В. Натомість INC забезпечує значно вищу стабільність: пульсації струму не перевищують 10 А, а напруга на шині DC залишається практично незмінною.

Динамічна реакція системи оцінювалася під час різких змін інсоляції. P&O потребує до 0,5 секунди для стабілізації, причому спостерігаються значні просідання напруги. Алгоритм INC реагує швидше - менш ніж за 0,3 секунди - і забезпечує кращу стабільність напруги на шині DC, що особливо важливо при різких переходах між режимами роботи.

Загалом INC демонструє значно менші втрати як у сталому, так і у динамічному режимах порівняно з P&O. Це дозволяє системі довше працювати поблизу точки максимальної потужності, забезпечуючи вищу ефективність та надійність електропостачання навіть при нестабільних умовах освітлення.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця кількісних показників

Метрика	Алгоритм P&O	Алгоритм INC	Перевага INC
Пульсації струму (усталений режим)	~40 А	< 10 А	~4 рази менше
Колівання напруги DC (усталений режим)	~30 В	< 5 В	~6 разів менше
Час встановлення (динаміка)	~0.5 с	~0.2 с	~2.5 рази швидше
Просідання напруги DC ($t=3с$)	до ~550 В	до ~570 В	На 20 В менше
Інтегральна ефективність (оцінка)	Базова	Вища на 1–3%	Суттєва

Висновки

Отримані кількісні дані дозволяють зробити глибокі висновки щодо практичного значення вибору MPPT-алгоритму. Зменшення пульсацій струму в 4 рази при використанні INC не лише мінімізує втрати енергії, але й суттєво знижує циклічне навантаження на акумуляторну батарею, що безпосередньо впливає

на її деградацію та може подовжити термін служби. Аналогічно, у 6 разів стабільніша напруга на шині DC створює сприятливіші умови роботи для чутливої електроніки інвертора та зменшує рівень електромагнітних завад у системі. Особливо варто наголосити на перевазі INC в динамічних режимах: скорочення часу реакції на зміну інсоляції з 0,5 с до 0,2 с означає, що протягом 0,3 с, коли Р&О все ще "шукає" нову точку максимуму, INC вже працює з оптимальною ефективністю. В умовах українського клімату з частою мінливою хмарністю, сумарний виграш в енергії за день може стати вельми суттєвим, що напряму впливає на економічну доцільність проекту та рівень енергетичної автономності об'єкта. Таким чином, хоча алгоритм INC і є більш складним у реалізації, його переваги в надійності, ефективності та довговічності обладнання повністю виправдовують його застосування в критично важливих гібридних системах.

Список використаної літератури

1. Возняк, О. М., Штуць, А. А., & Булига, А. І. Дослідження роботи електромеханічної системи автономної фотоелектричної насосної станції. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2 (121). С. 139-148. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-15.
2. Босак, А.В., Боднарук, О.Ю., Дубовик, В.Г., & Кулаковський, Л.Я. Гібридний підхід до відстеження точки максимальної потужності у фотоелектричних системах. *Відновлена енергетика*. 2025. №2 (81). С. 114-125. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).114-125](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).114-125).
3. Якушкін, Т., Єршов, Р., & Степенко, С. Порівняльний аналіз топологій та алгоритмів для відстежувачів точки максимальної потужності у фотоелектричних системах. *Технічні науки та технології*. 2023. №2 (32). С. 321–339. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-321-339](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-321-339).
4. Sadick, A. (2023). Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111632>.
5. Jalal, D., & Niroomand, M. (2021). Optimization methods of MPPT parameters for PV systems: review, classification, and comparison. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(2), 225–236. <https://doi.org/10.35833/MPSE.2019.000379>.
6. Боднарук О. Ю., Босак А. В. Комплексна оцінка використання фотоелектричних станцій для живлення насосів у багатоповерхових будівлях. *Системні дослідження в енергетиці*. 2025. №2 (82). С. 77-90. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.02.077>.
7. Chellakhi, A., El Beid, S., Abouelmahjoub, Y. *et al.* An Enhanced Incremental Conductance MPPT Approach for PV Power Optimization: A Simulation and Experimental Study. *Arab J Sci Eng* 49, 16045–16064 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08804-1>.
8. Mustafa Sacid Endiz. Design and implementation of microcontroller-based solar charge controller using modified incremental conductance MPPT algorithm. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. Volume 17. Issue 2. 2024.100938.ISSN 1687-8507. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.100938>.
9. M. H. H. Yahaya, A. A. A. Samat, S. M. Muhamad, M. N. A. N. Azari, M. A. M. Idin and M. M. Jumidali, "Optimizing Photovoltaic Systems with an Incremental Conductance Algorithm," *2024 IEEE 14th International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, Penang, Malaysia, 2024, pp. 237-242. doi: 10.1109/ICCSCE61582.2024.10696783.
10. Çakmak, F., Aydoğmuş, Z., & Tür, M. R. (2023). Analysis of Open Circuit Voltage MPPT Method with Analytical Analysis with Perturb and Observe (P&O) MPPT Method in PV Systems. *Electric Power Components and Systems*, 52(9), 1528–1542. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2296958>.
11. Djilali, A.B., Bounadja, E., Yahdou, A. *et al.* Enhanced variable step sizes perturb and observe MPPT control to reduce energy loss in photovoltaic systems. *Sci Rep* 15, 11700 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95309-y>.
12. Benjia Li, Zhongbing Liu, Yaling Wu, Pengcheng Wang, Ruimiao Liu, Ling Zhang. Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: *Challenges and opportunities*. *Journal of Energy Storage*. Volume 61. 2023. 106763. ISSN 2352-152X. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106763>.

O. Bodnaruk¹, Student, ORCID 0009-0001-3031-3644

A. Bosak¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0545-9980

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ENHANCING THE DYNAMIC STABILITY AND EFFICIENCY OF HYBRID PUMPING SYSTEMS THROUGH MPPT ALGORITHMS

The presented study analyzes the dynamic behavior of a hybrid power system designed to power critical loads, including pumping units. The system integrates a photovoltaic (PV) array, a battery energy storage system

(BESS), and a connection to a centralized power grid. The focus is on assessing the robustness and efficiency of the energy management system under conditions of sharp changes in the level of solar insolation, simulating key operational scenarios: daytime generation, night mode (full shading), and hybrid operation with grid support. The methodology is based on dynamic modeling that reproduces the operation of the main system components. The results demonstrate exceptional stability of the DC bus voltage (within 620–640 V) in all operating modes. The system provides a seamless transition between power from the PV array and the BESS, confirming the key role of the battery as an effective energy buffer. Connection to the grid significantly increases the reliability of the system and allows them to accelerate the BESS charging process. The study confirms the viability and high operational reliability of the proposed hybrid topology for applications requiring guaranteed uninterrupted power supply.

Keywords: hybrid system, pumping station, MPPT algorithms, dynamic modeling, energy management.

References

1. Voznyak, O. M., Shtuts, A. A., & Bulyga, A. I. Research on the operation of the electromechanical system of an autonomous photovoltaic pumping station. *Technika, Energetika, Transport APC*. 2023. No. 2 (121). P. 139-148. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-15.
2. Bosak, A. V., Bodnaruk, O. Yu., Dubovik, V. G., & Kulakovskiy, L. Ya. Hybrid approach to tracking the maximum power point in photovoltaic systems. *Vindovlena Energetika*. 2025. No. 2 (81). P. 114-125. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).114-125](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).114-125).
3. Yakushkin, T., Ershov, R. ., & Stepenko, S. Comparative analysis of topologies and algorithms for maximum power point trackers in photovoltaic systems. *Technical Sciences and Technologies*. 2023. No. 2 (32). P. 321–339. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-321-339](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-321-339)
4. Sadick, A. (2023). Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111632>.
5. Jalal, D., & Niroomand, M. (2021). Optimization methods of MPPT parameters for PV systems: review, classification, and comparison. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(2), 225–236. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000379>.
6. Bodnaruk, O. Yu., Bosak A. V. Comprehensive assessment of the use of photovoltaic stations to power pumps in multi-story buildings. *System Research in Energy*. 2025. No. 2 (82). P. 77-90. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.02.077>.
7. Chellakhi, A., El Beid, S., Abouelmahjoub, Y. et al. An Enhanced Incremental Conductance MPPT Approach for PV Power Optimization: A Simulation and Experimental Study. *Arab J Sci Eng* 49, 16045–16064 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08804-1>.
8. Mustafa Sacid Endiz. Design and implementation of microcontroller-based solar charge controller using modified incremental conductance MPPT algorithm. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. Volume 17. Issue 2. 2024.100938.ISSN 1687-8507. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.100938>.
9. M. H. H. Yahaya, A. A. A. Samat, S. M. Muhamad, M. N. A. N. Azari, M. A. M. Idin and M. M. Jumidali, "Optimizing Photovoltaic Systems with an Incremental Conductance Algorithm," 2024 IEEE 14th International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), Penang, Malaysia, 2024, pp. 237-242. doi: 10.1109/ICCSCE61582.2024.10696783.
10. Çakmak, F., Aydoğmuş, Z., & Tür, M. R. (2023). Analysis of Open Circuit Voltage MPPT Method with Analytical Analysis with Perturb and Observe (P&O) MPPT Method in PV Systems. *Electric Power Components and Systems*, 52(9), 1528–1542. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2296958>.
11. Djilali, A.B., Bounadja, E., Yahdou, A. et al. Enhanced variable step sizes perturb and observe MPPT control to reduce energy loss in photovoltaic systems. *Sci Rep* 15, 11700 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95309-y>.
12. Benjia Li, Zhongbing Liu, Yaling Wu, Pengcheng Wang, Ruimiao Liu, Ling Zhang. Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: Challenges and opportunities. *Journal of Energy Storage*. Volume 61. 2023. 106763. ISSN 2352-152X. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106763>.

Надійшла: 14.07.2025
Received: 14.07.2025

S. Zaichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8446-5408
O. Borychenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945
Muzi Li¹, Ph. D. Student, ORCID 0009-0001-8063-6206
V. Shalenko², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6984-0302
S. Korol³, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture

³Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

RESEARCH OF ENERGY PARAMETERS OF THE INSTALLATION FOR THE IMPLEMENTATION OF THE ELECTROHYDRAULIC EFFECT

The presented work considers in detail the issues of calculating the main parameters of the control voltage pulse as well as the discharge current that arises in the interelectrode space of the working chamber of a technical system operating on the basis of the electrohydraulic effect. This effect is characterized by the emergence of a local high-pressure region in the liquid medium, which fills the working chamber, when an intense spark discharge propagates through the fluid. The physical nature of the process lies in the almost instantaneous conversion of electrical energy, accumulated in the storage capacitor of the system, into the energy of the spark channel and further into the mechanical action on the surrounding liquid. Such a process makes it possible to use the electrohydraulic effect as an effective tool for generating short-term mechanical impulses of significant magnitude, which are widely applied in engineering technologies and special-purpose equipment.

In the framework of this research, a model of the electrical system of the device is presented, which allows analyzing the energy conversion stages from the storage capacitor to the interelectrode discharge. The model provides the possibility to evaluate the formation of transient processes, including the steep rise of voltage, the appearance of a spark channel, and the subsequent damped oscillations of the discharge current. Particular attention is paid to the calculation of these transient processes for two different values of the storage capacitor capacity, which makes it possible to determine the influence of the energy reserve on the duration and amplitude of the discharge. By comparing the obtained results, it is possible to trace how the system behaves under different energy-loading conditions, which, in turn, gives grounds for optimizing the parameters of the entire device in accordance with specific engineering requirements.

In addition, the article provides an analysis of the operation of a voltage multiplier circuit that is required to generate the necessary high-voltage potential in the interelectrode space of the working chamber. The multiplier ensures a gradual accumulation of voltage until the level required for spark breakdown is reached, which initiates the electrohydraulic effect. The features of multiplier operation, such as voltage rise time, efficiency, and losses in circuit elements, are considered in detail. The study also outlines possible limitations associated with dielectric strength of components and parasitic capacitances, which influence the stability of spark initiation. Thus, the presented research not only describes the physical essence of the electrohydraulic effect, but also develops a practical calculation and modeling base for designing systems where controlled spark discharges in liquids are the fundamental working mechanism.

Keywords: *electrohydraulic effect, water hammer, transient process, spark discharge, electrodes, voltage multiplier, cavitation*

INTRODUCTION

The essence of the electrohydraulic effect when an electric discharge pulse passes through a liquid, a large amount of thermal energy is released in a small interelectrode volume, as a result of which a certain volume of this liquid boils, resulting in the formation of a gas-liquid mixture. This leads to the occurrence of high hydraulic pressure. The magnitude of this pressure can reach tens and even hundreds of MPa [1].

The electrohydraulic effect (EHE) can be used in technological processes where there is a need to obtain high pressures, for example, in mechanical engineering for metal forming, the metallurgical industry, mining and geological exploration, oil and food industries for crushing various materials [2]. EHE is also used to create pumps for various purposes [1].

One of the main advantages of technical devices created on the basis of EHE is their environmental friendliness. The impact of hydraulic shock on an object does not introduce additional sources of pollution into the system.

In electrohydraulic systems, the conversion of electrical energy into mechanical energy occurs without an intermediate conversion of electrical energy into magnetic energy, as, for example, in electric motors. Such an energy conversion system has both its advantages and disadvantages [3].

The advantages include the ability to obtain a pressure gradient of hundreds of megapascals in small-sized devices, the ability to create high pressure both in a sealed and open volume of the working chamber, and the absence of additional sources of pollution during the technological process [4].

The disadvantages of the method are: the need to obtain high voltages between the working electrodes, the difficulty of describing the hydrodynamic processes that occur in the working chamber during discharge phenomena, the creation of interference in electronic equipment at the moment of discharge, the difficulty of monitoring the electrical parameters of the system due to the high level of interference.

As a result of the described problems arising in the creation of technical and technological systems based on the electrohydraulic effect, the development of such systems relies, to a greater extent, on experiment than theoretical calculation. This applies to both the hydraulic and electrical parts of the project [5].

When creating technical systems based on EHE, it is necessary to have reliable information about the processes occurring in the hydraulic system, which are formed due to the transition of electrical energy of the discharge into mechanical energy. Therefore, the system for forming a discharge pulse must be created based on calculations of transient processes occurring in the electrical circuit, both during energy storage and during discharge phenomena in a liquid medium [6].

This article is devoted to the technologies of calculating transient processes in the electrohydraulic system of generating EHE.

REVIEW OF SCIENTIFIC SOURCES

The electrohydraulic effect (EHE) describes the rapid release of energy within a liquid gap under the influence of a strong electric field. This intense energy density causes the breakdown and ionization of the insulating medium, forming an electrically conductive plasma channel [7,8]. The resulting thermal, chemical, and mechanical effects have been widely utilized across numerous industrial applications [9]. Despite considerable progress in understanding and applying electrohydraulic shock waves, experimental observations have revealed notable discrepancies in discharge behavior, reflecting the complex nature of the underlying processes.

Typically, EHE evolves through two stages: an initial pre-breakdown phase followed by a discharge phase, triggered when the applied electric field exceeds the dielectric strength of the liquid [7]. It has been demonstrated that the peak shock wave pressure (P_m) correlates proportionally with the capacitor energy at the instant of breakdown [10]. Acoustic efficiency - the fraction of electrical energy converted into mechanical energy - has been widely studied, suggesting a conversion efficiency of approximately 30% [11–13]. However, many models overlook mechanisms of energy dissipation, leading to overestimated predictions [14]. For instance, it has been found that, in low-voltage spark discharges, only around 2% of the deposited energy is emitted as acoustic radiation [15]. Efforts to enhance acoustic efficiency have included embedding metallic wires or energetic additives into the gap, achieving improvements up to 15% and 25% [16]. Extending the plasma channel length has also been shown to effectively amplify shock wave strength [17]. Nevertheless, a comprehensive understanding of EHE characteristics remains elusive, limiting its engineering application potential.

To address this, dynamic plasma expansion models using a time-dependent resistance based on the Braginskii framework have been proposed, providing improved fidelity in simulating discharge behavior [18]. Models of the fluid dynamics of the plasma–liquid interface during discharge events have also been developed, although much of the work has focused on low-current regimes [19].

Shock wave formation itself has been extensively modeled using piston-driven approaches. In some works, the shock wave is treated as generated by a rapidly accelerating piston obeying a power-law motion, enabling prediction of the shock front evolution [20–22]. Building on this, self-similar solutions for both cylindrical and spherical shock wave propagation have been derived, offering effective tools for modeling different geometries [21,23]. A cylindrical piston model tailored to the EHE has also been developed [24]. Plasma channel evolution models based on dimensionless parameters have provided additional insight into the dynamics of discharge and shock formation. Nevertheless, critical plasma properties such as conductivity and temperature during the discharge remain difficult to measure directly, introducing challenges in fully validating these models [12].

To characterize the behavior of the EHE and predict shock wave intensity, a computational model was developed based on experimental data from a shock wave generation platform. Plasma channel expansion was simulated using cylindrical and spherical approximations, showing good agreement with measurements. A piston-driven model was applied to analyze energy conversion during the rapid expansion phase. Complementary experiments using a point–plane electrode under impulse voltage and high-speed optical diagnostics revealed that localized heating and gas bubble formation are critical for discharge initiation. It was found that a minimum energy of 80 J is needed for bubble formation, and at energies above 200 J, full gap breakdown occurs, generating high-intensity shock waves, with peak pressures depending on residual energy and electrode gap length [25].

Despite advances in understanding the EHE, significant gaps remain in accurately characterizing energy transfer and optimizing system efficiency. Limited knowledge of plasma properties and energy dissipation mechanisms hampers the development of reliable predictive models. Therefore, focused research on the energy parameters of EHE installations - including breakdown thresholds, discharge energy, and pulse characteristics - is

essential for improving energy conversion efficiency and advancing practical applications of electrohydraulic technologies.

The operating principle of the system is based on the electrohydraulic effect

The electrohydraulic effect consists of creating alternately high and low pressure in the interelectrode space when a spark electric discharge passes through a liquid. Since its initial development in the first half of the twentieth century, the basic scheme of an electrohydraulic installation has undergone virtually no changes.

The block diagram of the device for creating the EHE is shown in Fig. 1.

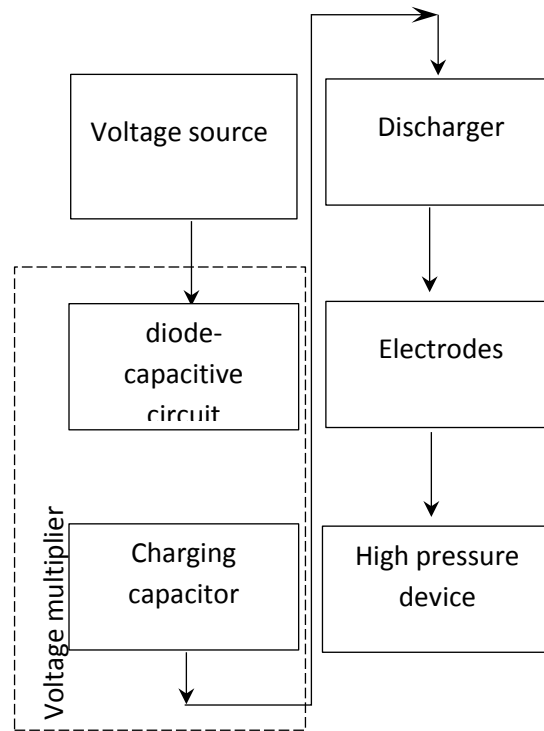


Figure 1 -Block diagram of the installation for obtaining an electrohydraulic effect

In systems designed for neutralizing mines and unexploded ordnance using the electrohydraulic effect, the power source is typically a standard industrial AC supply (~220 V, 50 Hz). To generate a high-energy hydraulic impulse capable of forming a high-velocity liquid jet, a sufficiently long spark discharge must be created within the fluid medium. The length of the discharge channel directly influences the peak pressure achieved in the electrohydraulic system. While shorter discharges of a few millimeters are adequate for fluid pumping applications, significantly longer discharge channels - often tens or even hundreds of times greater — are required to produce the extreme pressures necessary for jet formation capable of penetrating or disrupting explosive devices [26].

To initiate a spark discharge in a working chamber filled with a liquid medium, it is necessary to apply a constant voltage across the electrodes that exceeds the breakdown voltage of the liquid. This threshold voltage is determined by the electrical resistivity of the liquid, which can vary significantly depending on its composition. For instance, the specific electrical resistivity (ρ) of transformer oil and gasoline is approximately $\rho \approx 10^{11}$ Ohm m, for distilled water around $\rho \approx 10^4$ Ohm m, for groundwater approximately $\rho \approx 20$ Ohm m, and for seawater it decreases further to about $\rho \approx 0.3$ Ohm m [11].

Thus, to initiate a spark discharge in a liquid medium, it is essential to determine appropriate values for the interelectrode distance and the applied voltage, which are directly proportional to one another. In a medium such as antifreeze, achieving the conditions necessary for breakdown requires the application of a sufficiently high voltage across a relatively short gap. At the moment of electrical breakdown, a significant current begins to flow through the interelectrode space, resulting in a high-power discharge. This power release leads to the rapid conversion of electrical energy into thermal and mechanical energy. The duration of the discharge is typically very short, not exceeding several milliseconds, during which the energy Q is released in an intense, localized manner

$$Q = \int_0^{\Delta t} I(t) \cdot U(t) dt \tag{1}$$

$I(t)$ - discharge current; $U(t)$ - discharge voltage.

To generate a voltage sufficient to cause a discharge in the working fluid, it is necessary to convert the alternating voltage of the industrial network ~ 220 V, 50 Hz into a direct voltage of tens of kilovolts. This can be done, for example, using a diode-capacitive voltage multiplier (Fig. 2) [27].

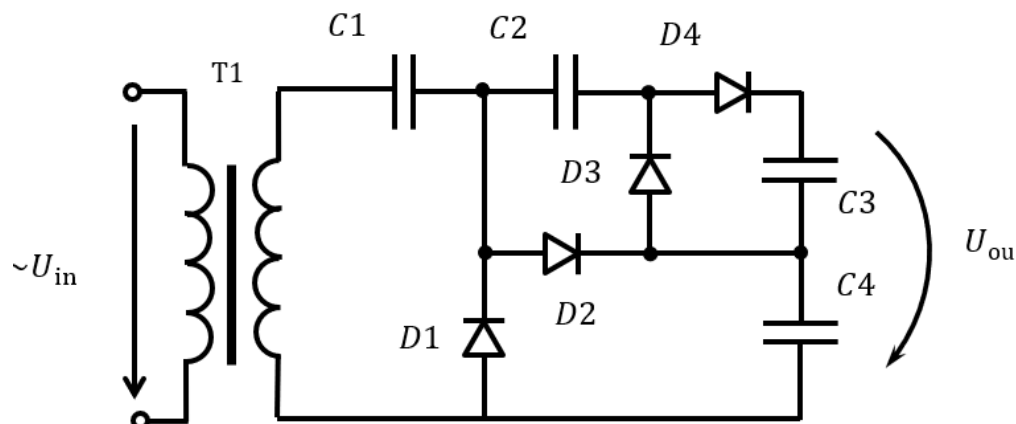


Figure 2 -Електрична Схема diode-capacitive voltage multiplier

In the circuit shown in Fig. 2, the alternating voltage from the secondary winding of the transformer is applied to a diode-capacitor network. During the first quarter of the input voltage period T , diodes $D1$ and $D3$ remain in the reverse-biased (non-conducting) state, while diodes $D2$ and $D4$ are forward-biased (conducting). As a result, capacitors $C1$ and $C4$ are charged to approximately half of the input voltage amplitude $U_{in}/2$. The voltages across capacitors $C2$ and $C3$, as well as across diode $D4$, remain close to zero during this interval, as these elements are effectively short-circuited by the low impedance of the conducting diode $D2$.

On the time interval $t = T/4 \dots T/2$ the input voltage begins to decrease, the voltage on the diodes $D2$ and $D4$ become negative, the diodes close, the voltage on the capacitors remains unchanged (a slow discharge of the capacitors occurs due to leakage currents and reverse currents of the diodes).

At the moment of arrival of the third quarter-period of the input signal ($t = T/2 \dots 3T/4$) diodes open $D1$ and $D3$, and the capacitor begins to recharge $C1$ and charge $C2$. Voltage on $C3$ and $C4$, remain practically unchanged: $U_{C3} = 0$; $U_{C4} = U_{in}/2$.

On the interval $t = 3T/4 - T$ diodes $D1$ and $D2$ close, and the diodes $D1$ and $D2$ open. Voltages on capacitors $C1$ and $C2$ begin to decrease (in absolute value), and on $C3$ and $C4$ grow. As a result, after one period of input action, the voltage on $C3$ becomes equal $U_{C3} = U_{in}/4$, $U_{C4} = U_{in}/4$.

The next cycle of capacitor recharging does not start from zero, so at the end of the next period, the voltages grow. And in the steady state, the voltages become: $U_{C3} = U_{in}$; $U_{C4} = U_{in}$. Therefore, the output voltage will be equal to the doubled amplitude value of the input voltage. Output voltage consists of voltages on the capacitor plates $C3$ and $C4$: $U_{ou} = U_{C3} + U_{C4}$.

To set the numerical value of the voltage, we will use Matlab/Simulink Online, in particular its Simscape block, which allows you to quickly create models of physical systems in the Simulink environment.

The output voltage graph has the form shown in Fig. 3. The voltage increases rapidly at first, exhibiting high-frequency oscillations. As time progresses, the voltage continues to rise but at a slower rate, and the oscillations gradually diminish in amplitude. Eventually, the output voltage stabilizes at approximately 24,000 V, indicating that the system reaches a steady-state condition. The duration of the transient process (i.e., the onset of the quasi-steady-state mode) is influenced by the capacitance of the capacitors and the characteristics of the diodes. In the first quarter-cycle, the circuit's time constant during capacitor charging is very short-on the order of microseconds. In contrast, during the discharge phase due to leakage currents in the second quarter-cycle, the time constant becomes significantly longer-ranging from tenths of a second to several seconds, depending on the capacitor capacity. For the output voltage waveform shown in Fig. 4, the formation time of the required high voltage can be considered approximately equal to 20 cycles of the input signal. For a standard 220 V, 50 Hz industrial power supply, this corresponds to about 0.45 seconds.

Upon contactor closure, the resistance within the discharge chamber undergoes significant variation, ranging from several megaohms to a few ohms. Nevertheless, the majority of the discharge, in terms of both duration and energy dissipation, occurs at low resistance values, typically not exceeding 10 Ohm. During the simulation of the circuit closing process (Fig 3), a rapid decrease in voltage and current is observed (Fig. 5), accompanied by substantial thermal energy release.

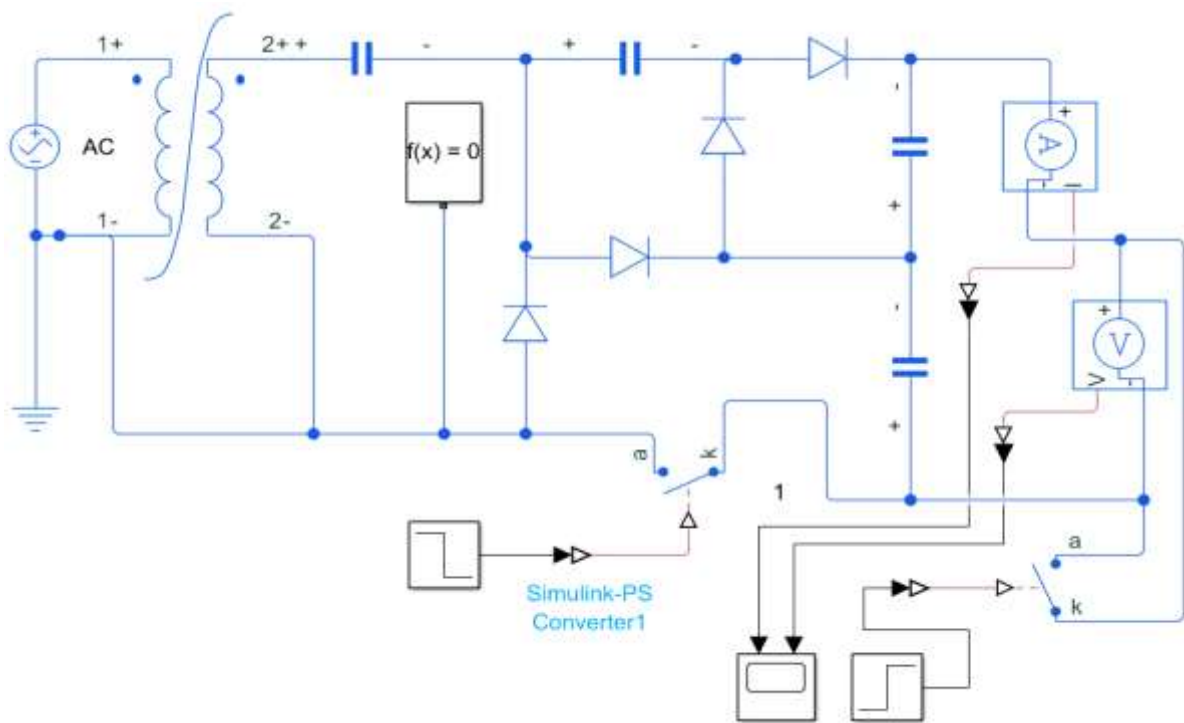


Figure 3 - Block diagram in an interactive environment for EHE effect modeling

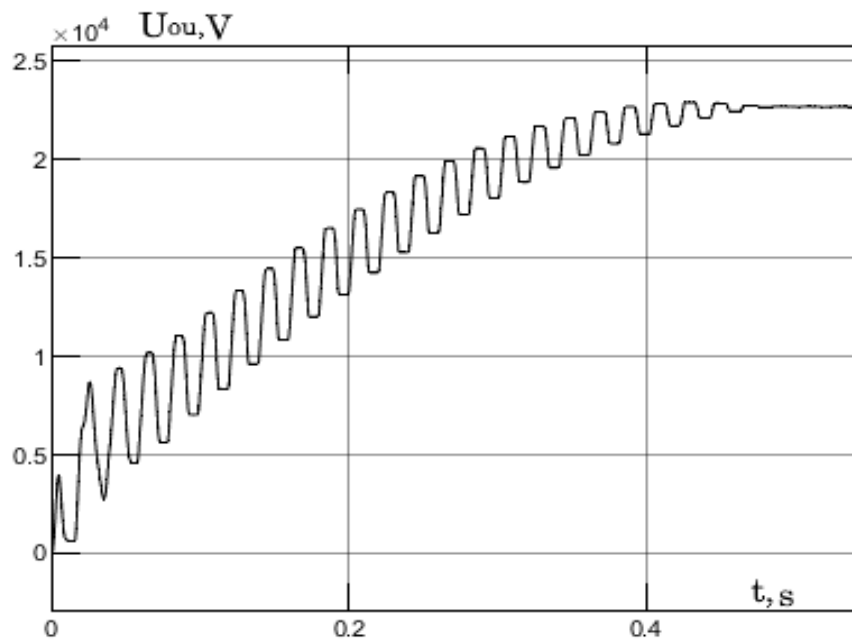


Figure 4 - Transient response of output voltage over time

Establishing the patterns of current and voltage variation enables the determination of the energy released during the electrohydraulic effect. In the considered case (Fig. 5), the discharge energy amounts to 40 μ J. The released amount of energy is sufficiently high to support the execution of a wide range of technological processes associated with material forming and fracture.

Given that the peak pressure of a shock wave is a major parameter for evaluating impact-related damage, it is used as an equivalent criterion in this study. The peak pressure resulting from the electrohydraulic effect can be represented, by analogy, as the peak pressure generated by a TNT explosion under similar conditions - in the same

medium and at the same distance. To achieve this, the law governing underwater explosive shock waves [28] is employed. The corresponding equation is as follows:

$$p = \frac{9000}{R} Q^\theta \quad (2)$$

where p denotes the peak pressure produced by the high-voltage pulse discharge, measured in bar; R represents the distance from the center of the discharge gap, in mm; Q is the discharge energy at the moment of breakdown, expressed in kJs; and θ is the energy attenuation exponent, with a value of 0.35.

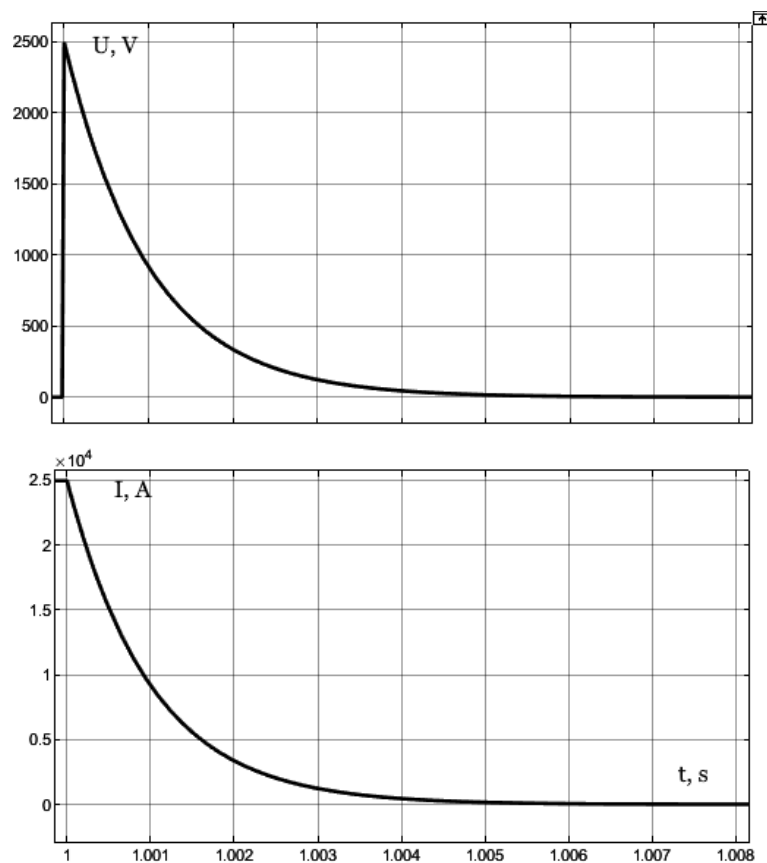


Figure 5 - Simulation of voltage and current behavior during the circuit closing process

The application of an empirical relationship (2) enables the calculation of the resulting pressure as a function of the geometric and energetic parameters characterizing the electrohydraulic effect. This approach provides a practical means of linking the physical configuration of the system with the dynamics of fluid motion induced by the discharge.

As part of the simulation of electrohydraulic effect conditions using SOLIDWORKS FloXpress, a qualitative assessment of water flow through the Jet.SLDPRT model was carried out, with an inlet pressure of 7.00×10^8 Pa and an outlet pressure of 1.00×10^5 Pa at a temperature of 293.20 K. The analysis showed that the maximum flow velocity reached 1186.624 m/s, confirming the presence of high-intensity fluid ejection characteristic of electrohydraulic discharge processes.

The development of such water flow velocities enables the use of the electrohydraulic effect as a means of acting on various targets that require the impact of a high-energy flow similar to that produced by shaped charges [29, 30].

CONCLUSION

This study demonstrated the feasibility and effectiveness of using the EHE to generate high-energy hydraulic impulses capable of neutralizing hazardous objects. It was shown that the peak pressure and intensity of the generated shock waves strongly depend on the discharge channel length and the energy released during the breakdown process.

A diode-capacitive voltage multiplier was effectively used to transform industrial AC voltage into the high DC voltages necessary for initiating discharges in liquid media. Simulation and experimental results confirmed the possibility of achieving discharge energies of up to 40 kJ, resulting in peak water flow velocities exceeding 1180 m/s.

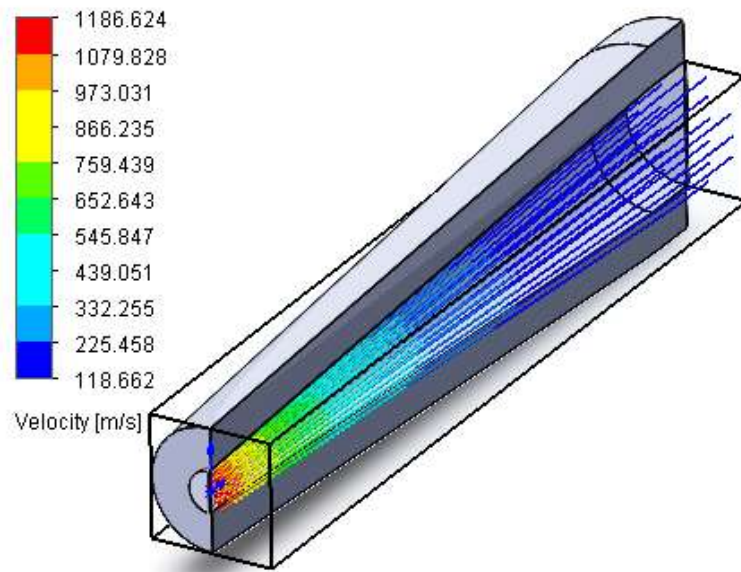


Figure 6 -Simulation of high-intensity water jet flow under electrohydraulic effect conditions

This high-speed jet formation validates the use of EHE-based systems for tasks requiring strong mechanical impact, similar to the effects achieved by shaped charges. The developed models and experimental data provide a solid foundation for optimizing EHE systems and adapting them to various technological and engineering applications.

References

1. D. M. Angeloni, J. R. Locke, M. E. Chikthimmah, and K. S. Vesper, "Removal of methyl-tert-butyl ether from water by a pulsed arc electrohydraulic discharge system," *Jpn. J. Appl. Phys.* 45(10S), 8290–8295 (2006).
2. T. Gachovska, D. Cassada, J. Subbiah, M. Hanna, H. Thippareddi, and D. Snow, "Enhanced anthocyanin extraction from red cabbage using pulsed electric field processing," *J. Food Sci.* 75(6), E323–E329 (2010).
3. M. Taranenko and O. Naryzhniy, "Modelling the Process of Interaction of a Pulsed Jet with a Workpiece by Electrohydraulic Forming," in *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021*, LNNS, vol. 367, Springer, 2022.
4. Cumming, Adam S. *Energetics Science and Technology: An Integrated Approach*. IOP Publishing, 2022.
5. M. Pekker, A. Fridman, and J. L. Beilis, "Initiation stage of nanosecond breakdown in liquid," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47(2), 025502 (2013).
6. C. Blaj, D. Toader, and D. Vesa, "The Transient Regime in the Electric Circuit of an Electro Hydraulic Valve," 2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Yasmine Hammamet, Tunisia.
7. S. Liu, Y. Liu, Z. Li, X. Li, G. Zhou, H. Li, and F. Lin, "Effect of electrical breakdown modes on shock wave intensity in water," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 25(5), 1679–1687 (2018).
8. W. Feng, P. Rao, S. Nimbalkar, Q. Chen, J. Cui, and P. Ouyang, "The utilization of a coupled electro-thermal-mechanical model of high-voltage electric pulse on rock fracture," *Materials* 16(4), 1693 (2023).
9. J. Mackersie, I. Timoshkin, and S. MacGregor, "Generation of high-power ultrasound by spark discharges in water," *IEEE Trans. Plasma Sci.* 33(5), 1715–1724 (2005).
10. G. Touya, T. Reess, L. Pecastaing, A. Gibert, and P. Domens, "Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39(24), 5236 (2006).
11. R. Roberts, J. Cook, R. Rogers, A. Gleeson, and T. Griffy, "The energy partition of underwater sparks," *J. Acoust. Soc. Am.* 99(6), 3465–3475 (1996).
12. X. Lu, Y. Pan, K. Liu, M. Liu, and H. Zhang, "Spark model of pulsed discharge in water," *J. Appl. Phys.* 91(1), 24–31 (2002).
13. O. Higa, R. Matsubara, K. Higa, Y. Miyafuji, T. Gushi, Y. Omine, K. Naha, K. Shimojima, H. Fukuoka, H. Maehara, S. Tanaka, T. Matsui, and S. Itoh, "Mechanism of the shock wave generation and energy efficiency by underwater discharge," *Int. J. Multiphys.* 6(2), 89–97 (2016).
14. Y. Wang, *Theoretical and Experimental Study of the Underwater Plasma Acoustic Source* (National University of Defense Technology, China, 2012).

15. S. Buogo, J. Plocek, and K. Vokurka, "Efficiency of energy conversion in underwater spark discharges and associated bubble oscillations: Experimental results," *Acta Acust. Acust.* 95(1), 46–59 (2009).
16. R. Han, H. Zhou, Q. Liu, J. Wu, Y. Jing, Y. Chao, and A. Qiu, "Generation of electrohydraulic shock waves by plasma-ignited energetic materials: I. Fundamental mechanisms and processes," *IEEE Trans. Plasma Sci.* 43(12), 3999–4008 (2015).
17. Y. Liu, Z. Li, X. Li, S. Liu, G. Zhou, and F. Lin, "Intensity improvement of shock waves induced by liquid electrical discharges," *Phys. Plasmas* 24(4), 043510 (2017).
18. I. Timoshkin, R. Fouracre, M. Given, and S. MacGregor, "Hydrodynamic modelling of transient cavities in fluids generated by high voltage spark discharges," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39(22), 4808 (2006).
19. E. Gidalevich, R. Boxman, and S. Goldsmith, "Hydrodynamic effects in liquids subjected to pulsed low current arc discharges," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37(10), 1509 (2004).
20. D. Derevianko and S. Zaichenko, "Game-theoretic models of dynamic pricing in microgrids with distributed generation sources," in *Power Systems Research and Operation: Selected Problems III*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 231–245, doi: 10.1007/978-3-031-44772-3_10.
21. S. Denysiuk et al., "Evaluation of energy processes in smart monitoring systems of local electricity systems," in *Proc. 2023 IEEE 5th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2023, pp. 1–4, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402488.
22. S. Zaichenko et al., "Parameters determination and development of seasonal cold accumulators with phase transformation," in *Proc. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2023, pp. 1–4, doi: 10.34229/1028-0979-2023-4-8.
23. S. Zaichenko et al., "Determining the effect of load on synchronous generator with spark-ignition engine energy efficiency," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 59, no. 6, pp. 43–51, 2022, doi: 10.2478/lpts-2022-0046.
24. S. Denysiuk et al., "Cost-effective reliability improvement methods in power systems with renewables," in *Proc. 2022 IEEE 8th Int. Conf. Energy Smart Systems (ESS)*, 2022, pp. 372–377, O. Vovk, S. Zaichenko, M. Li, V. Gorodetsky, S. Korol, and V. Shalenko, "Justification of the parameters of the demining process by hydrodynamic destruction," *Energy: Economics, Technology, Ecology*, no. 1, pp. 79–88, Apr. 2025, doi: 10.20535/1813-5420.1.2025.324265
25. D. Malviya and A. K. Bhardwaj, "Analysis and comparison of capacitor diode voltage multiplier FED with a high frequency and a low frequency voltage source," *Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 234–237, 2016.
26. Q. Yu, H. Zhang, R. Yang, Z. Cai, and K. Liu, "Effects of confining pressure and hydrostatic pressure on the fracturing of rock under cyclic electrohydraulic shock waves," *Energies*, vol. 15, no. 16, p. 6032, 2022.
27. Y. Voitenko, Y. Sydorenko, R. Zakusylo, S. Goshovskii, S. Zaichenko, and V. Boyko, "On the influence of the liner shape and charge detonation scheme on the kinetic characteristics of shaped charge jets and explosively formed penetrators," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 20, no. 4, 2023.
28. Y. Voitenko, R. Zakusylo, and S. Zaychenko, "Influence of the striker material on the results of high-speed impact at a barrier," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 18, no. 3, 2021.
29. S. Zaichenko et al., "Development of a geomechatronic complex for the geotechnical monitoring of the contour of a mine working," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 9 (87), pp. 19–25, Jun. 2017, doi: 10.15587/1729-4061.2017.102067.
30. S. P. Shevchuk et al., "Analytical study of rock cutting mechatron vibration system by flat auger tools," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 3, pp. 29–34, 2016.

С.В. Зайченко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8446-5408
О.В. Бориченко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945
Му Цзі Лі¹, аспірант, ORCID 0009-0001-8063-6206
В. О. Шаленко², канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6984-0302
С.В. Король³, канд. техн. наук, доцент

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
²Київський національний університет будівництва і архітектури
³Інститут технічної теплофізики НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ЕФЕКТУ

У представленій роботі детально розглянуто питання розрахунку основних параметрів керуючого імпульсу напруги, а також струму розряду, що виникає в міжелектродному проміжку робочої камери технічної системи, яка функціонує на основі електрогідралічного ефекту. Цей ефект характеризується виникненням локальної області високого тиску в рідкому середовищі, що заповнює робочу камеру, коли через рідину проходить інтенсивний іскровий розряд. Фізична природа процесу полягає у майже миттєвому перетворенні електричної енергії, накопиченої у накопичувальному конденсаторі системи, в енергію іскрового каналу та далі — у механічну дію на навколишню рідину. Такий процес дозволяє використовувати електрогідралічний ефект як ефективний інструмент для генерації короткочасних механічних імпульсів значної величини, що знаходять широке застосування в інженерних технологіях та спеціальній техніці.

У межах цього дослідження представлено модель електричної системи пристрою, яка дає змогу аналізувати етапи перетворення енергії від накопичувального конденсатора до міжелектродного розряду. Модель дозволяє оцінити формування перехідних процесів, включаючи крутий фронт наростання напруги, виникнення іскрового каналу та подальші загасаючі коливання струму розряду. Особливу увагу приділено розрахунку цих перехідних процесів для двох різних значень ємності накопичувального конденсатора, що дозволяє визначити вплив енергетичного запасу на тривалість і амплітуду розряду. Порівняння отриманих результатів дає змогу простежити, як система поводить себе за різних енергетичних навантажень, що, у свою чергу, створює підґрунтя для оптимізації параметрів усього пристрою відповідно до конкретних інженерних вимог.

Крім того, у статті наведено аналіз роботи схеми множника напруги, яка необхідна для формування потрібного високовольтного потенціалу в міжелектродному проміжку робочої камери. Множник забезпечує поступове накопичення напруги до рівня, достатнього для іскрового пробою, який ініціює електрогідралічний ефект. Особливості роботи множника, такі як час наростання напруги, ефективність і втрати в елементах схеми, розглянуто детально. Також у дослідженні окреслено можливі обмеження, пов'язані з діелектричною міцністю компонентів і паразитними ємностями, що впливають на стабільність ініціювання іскрового розряду. Таким чином, представлена робота не лише описує фізичну сутність електрогідралічного ефекту, але й формує практичну базу для розрахунку та моделювання при проектуванні систем, де контрольовані іскрові розряди в рідинах є основним робочим механізмом.

Ключові слова: електрогідралічний ефект, гідралічний удар, перехідний процес, іскровий розряд, електроди, множник напруги, кавітація

Надійшла: 25.08.2025
Received: 25.08.2025

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 697.1:697.34

DOI 10.20535/1813-5420.3.2025.339794

В. І. Дешко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933
М.М. Шовкалюк¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-1898-3493
О.Е. Максименко¹, асистент, ORCID 0000-0003-4099-2772
¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ БАР'ЄРІВ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ПРОЄКТІВ В УКРАЇНІ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОЇ КРИЗИ ТА ПОЧАТКОВОГО ЕТАПУ ВІДНОВЛЕННЯ

Метою статті був аналіз основних бар'єрів, що ускладнюють впровадження енергоефективних заходів в енергетичному секторі України у період з 24 лютого 2022 року до початку 2025 року. Огляд охоплює такі ключові групи бар'єрів: економічні, технічні та організаційні, нормативно-правові та соціальні. Особливу увагу приділено впливу воєнного стану, руйнуванню інфраструктури та дефіциту інвестицій на динаміку реалізації енергоефективної політики. Оцінено різні обмеження у формуванні сукупного впливу на енергетичний сектор, здійснено порівняльну оцінку значущості бар'єрів та запропоновано стратегічні напрями їх подолання у контексті післявоєнного енергетичного відновлення.

Результати дослідження можуть слугувати аналітичною основою для розробки ефективної державної політики у сфері енергетики, зокрема у частині стратегічного планування енергоефективності, адаптації національного законодавства до вимог ЄС та реалізації цілей сталого розвитку. Результати дослідження будуть корисними для формування регіональних програм розвитку, залучення донорської і технічної допомоги в межах проєктів відбудови енергетичної системи України на засадах енергонезалежності, зокрема в частині оцінки ризиків.

Ключові слова: енергоефективність, енергетичний сектор України, бар'єри, післявоєнне відновлення, енергетична політика.

Вступ

Енергоефективність є ключовим напрямом розвитку енергетичної політики України, особливо в умовах військового конфлікту, що наразі триває. Війна створила значні виклики для енергетичної безпеки країни. По-перше, це руйнування інфраструктури внаслідок бойових дій. За даними Світового банку, збитки України оцінюються в \$11 мільярдів, причому 50% інфраструктури було пошкоджено, що спричинило відключення електроенергії по всій країні [1]. По-друге, відбулося зростання цін на енергоносії. Внаслідок втрати генеруючих потужностей, у 2024 році Україна недоотримала понад 9 ГВт електричної потужності. Це спричинило дефіцит електроенергії для споживачів багатоквартирних житлових будинків (БЖБ), який сягнув близько 35%, а також зростання вартості електроенергії приблизно на 34% у період з вересня 2023 по вересень 2024 року [2-4]. По-третє, маємо обмеження фінансових ресурсів (рис. 1). Дана статистика відображає інтенсивність різних фінансових обмежень в Україні у період 2022-2024 років. Інтенсивність оцінювалася за шкалою від 1 до 10 на основі експертного опитування та аналітичного огляду регуляторних документів. Найсильнішими були валютні обмеження та обмеження на зняття готівки [5-7]. Показник «Валютні обмеження після змін (2024)» відображає зниження їх інтенсивності після часткових послаблень, запроваджених у 2024 році.

Сукупність цих факторів та продовження бойових дій істотно знижує гнучкість та стійкість енергетичної системи України, ускладнюючи її здатність адаптуватися до надзвичайних ситуацій. В таких умовах актуальним є підвищення енергоефективності усіх галузей промисловості і будівельного фонду, адже це ключовий інструмент для зменшення навантаження на енергосистему і зміцнення енергетичної незалежності країни.

Метою даної роботи є аналіз сучасного стану реалізації енергоефективних проєктів для житлово-комунального сектору в Україні, визначення основних перешкод та перспективних шляхів їх подолання.

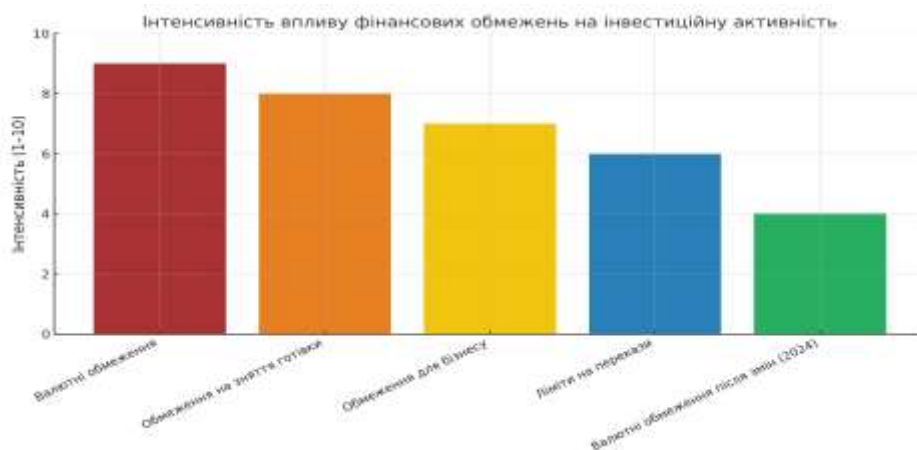


Рисунок 1 – Інтенсивність впливу фінансових обмежень в Україні на інвестиції в енергоефективність

Для досягнення поставленої мети були поставлені **наступні завдання**:

- дослідити основні тенденції і фінансові можливості реалізації енергоефективних проєктів за наявними програмами державної та міжнародної фінансової допомоги за останні роки;
- проаналізувати проблеми, що заважають масштабному впровадженню енергоощадних рішень, сформулювати перелік і рівень впливу основних бар'єрів, а також запропонувати шляхи їх подолання;
- оцінити перспективи розвитку енергоефективності, визначити можливі напрямки подальшої модернізації енергетичної інфраструктури та роль енергоефективних технологій у відновленні України.

Матеріал і результати дослідження

Реалізація енергоефективних проєктів в будівельному фонді України відбувається за рахунок державних програм підтримки [8, 9] та за участю міжнародних партнерів NEFKO, USAID, GIZ, за програмами Світового банку, Європейського банку реконструкції і розвитку та інших донорів.

Аналіз звітів міжнародних організацій [10-13] за останні роки показав, що співвідношення кількості реалізованих і запланованих проєктів в сфері підвищення енергоефективності будівельного сектору зростає у порівнянні з початком активних військових дій, проте все ще залишається на низькому рівні (рис. 2). Фінансування в основному направлене на утеплення фасадів, дахів і підвалів; заміну вікон/дверей; утеплення труб в неопалювальних приміщеннях, модернізацію систем опалення та реконструкцію ІТП.

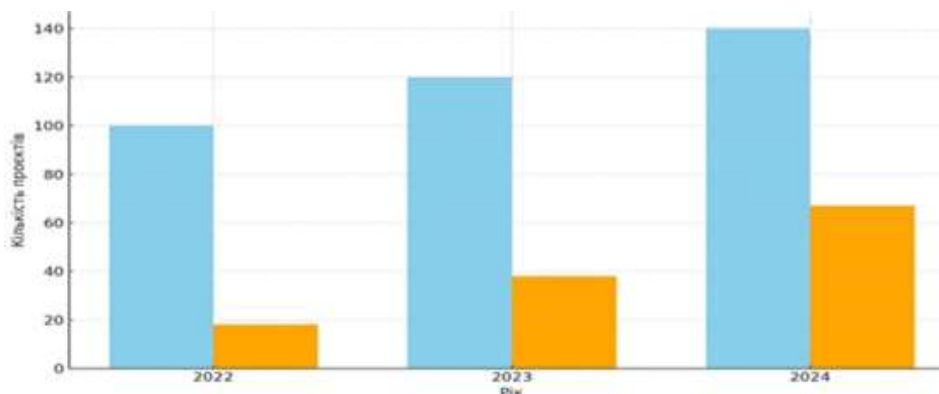


Рисунок 2 – Заплановані (блакитний) та реалізовані (помаранчевий) енергоефективні проєкти в Україні

Для оцінки ефективності впровадження енергоефективних проєктів у будівельному секторі, зокрема для багатоквартирних будівель України, визначалася низка показників на основі даних з аналітичних звітів від міжнародних донорів та Мінрегіонбуду [14-19]. На рис.3 показано зміни за показника «Загальний рівень впровадження проєктів» - відношення кількості реалізованих (фактично завершених) проєктів в житлово-комунальному секторі до запланованих. Як ми бачимо, він піднявся з 18% у 2022 році до 48% у 2024 році.

Інші показники, що зазначено на графіку, визначалися за даними, представленими в річних звітах [14-19] наступним чином:

- фінансування (млн. грн) – обсяг інвестицій в енергоефективність:

$$F_{\text{рік}} = N_{\text{реал.}} \times C_{\text{сер}} \quad (1)$$

де:

$F_{\text{рік}}$ – загальний обсяг фінансування в конкретному році (млн грн); $N_{\text{реал.}}$ – кількість реалізованих проєктів у відповідному періоді; $S_{\text{сеп.}}$ – середня вартість одного проєкту в цьому році (млн грн);
 - економія енергії (ГВт·год) – кількість зекономленої енергії завдяки заходам:

$$E_{\text{рік}} = N_{\text{реал.}} \times S_{\text{сеп.}} \quad (2)$$

де:

$S_{\text{сеп.}}$ – середній обсяг енергії, яку економить один проєкт (ГВт·год/рік);
 - динаміка реалізації проєктів:

$$\Delta R_t = \left(\frac{R_t - R_{t-1}}{R_{t-1}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

де:

ΔR_t – темп приросту реалізації за рік t (%); R_t, R_{t-1} – рівень реалізації за два послідовні роки.

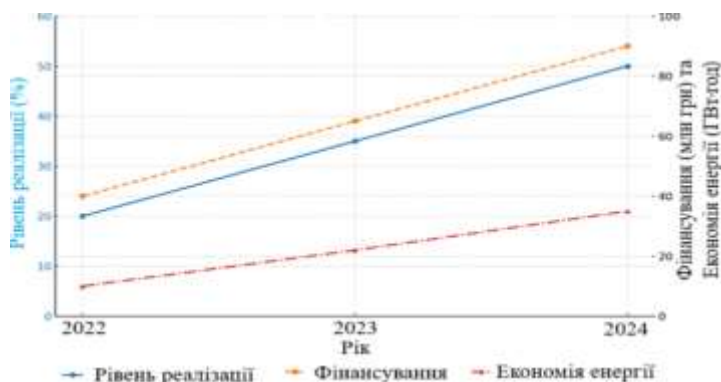


Рисунок 3 – Інтенсивність впровадження енергозберігаючих заходів в Україні

Зростання обсягу фінансування з 40 млн грн у 2022р. до 90 млн грн у 2024р.; очікувана економія енергії в багатоквартирних житлових будинках України зросла з 10 до 35 ГВт·год завдяки програмам термомодернізації (як від Фонду енергоефективності, так і завдяки місцевим програмам підтримки енергозберігаючих заходів, а також підтримці міжнародних донорів), що демонструє збільшення інтересу держави, громад та інвесторів до проведення термомодернізації і впровадження сучасних технологій для зниження споживання. Динаміка реалізації проєктів зростає, що свідчить про активізацію процесів у житлово-комунальному секторі, хоча темпи можуть змінюватися в залежності від ситуації в країні.

В житловому фонді України проєкти підвищення енергоефективності реалізує Фонд енергоефективності (ФЕЕ) будівель за програмами «ЕнергоДім» (комплексні проєкти термомодернізації багатоквартирних будівель), «ВідновиДім» (програми відновлення зруйнованих будівель внаслідок військової агресії з урахуванням вимог енергоефективності), «ГрінДім» (впровадження теплових насосів і сонячних електростанцій). Як показав аналіз результатів впровадження комплексних проєктів за програмою «Енергодім» [8], рівень досягнутої економії –17% («пакет А» легкий) та 35% («пакет Б» комплексний), рівень залучених інвестицій для комплексної модернізації - 93 грн/м² опалювальної площі, рівень скорочення споживання первинної енергії – близько 60 кВт·год/(м²·рік). Станом на кінець квітня 2025 року кількість поданих заявок складає 1154, кількість завершених проєктів – 271, кількість заявок в роботі – 478 [9]. Найбільш популярні заходи, що реалізуються за цією програмою: гідравлічне балансування системи опалення, модернізація ІТП, теплоізоляція трубопроводів в неопалювальних приміщеннях, заміна світлопрозорих конструкцій (вікон і дверей), утеплення фасадів. Це дозволяє суттєво знизити споживання енергії будівлею, зокрема після реалізації подібних проєктів було досягнуто економію в розмірі 40% [20]. В деяких містах в Україні існують місцеві програми співфінансування енергозберігаючих заходів, що мотивує населення та активізує кількість впровадження проєктів. Мешканці будівель модернізованих будинків зменшили рахунки за опалення на 30–40% завдяки участі в програмі 70%/30%, що реалізується в м.Києві [20]. Таким чином, будівельний фонд має суттєвий потенціал енергозбереження і за останні роки спостерігається поліпшення ситуації у порівнянні з періодом початку активних військових дій.

Далі в дослідженні проаналізуємо ключові бар'єри, що перешкоджають ефективному впровадженню енергоефективних заходів. Нижче проаналізовано чотири ключові категорії обмежень – економічні, технічні, нормативно-правові та соціальні.

Економічні бар'єри

Військові дії суттєво вплинули на економіку України, оскільки приводять до значного перерозподілу державних ресурсів на оборону, що призвело до обмеження доступу до фінансування для енергоефективних проєктів. Центром економічних стратегій встановлено, що інвестиції в

енергоефективність знизилася на 30% з початку конфлікту [21]. Комерційні банки не мають можливості надавати довгострокові кредити через підвищені ризики. Для досягнення цілей, поставлених державними стратегіями розвитку, до 2030 року потрібно близько 13 млрд євро інвестицій, що наразі недосяжно [22]. За даними Мінрегіонбуду, повна термомодернізація країни вимагає щонайменше 3 трлн грн (близько двох річних бюджетів України) [23]. В умовах економічної нестабільності організації, підприємства та домогосподарства скорочують інвестиції в енергоефективність, віддаючи перевагу більш нагальним потребам. Додатково, інфляція та перебої в постачанні матеріалів підвищили вартість будівельно-монтажних робіт, що ускладнює реалізацію енергоощадних рішень [24]. Все це знижує рентабельність відповідних проектів. Опитування, проведене Інститутом соціології НАН України, показало, що після початку військових дій лише 15% респондентів готові були інвестувати в енергоефективність [21], хоча до війни 60% респондентів визнавало таку потребу (табл.1).

Таблиця 1 – Джерела фінансування та мотивованість

Показник	До війни (до 2022 року)	Після початку війни (2022–2024 роки)
Основні джерела фінансування	Програма Енергодім від ФЕЕ, пільгові кредити та донорська підтримка через міжнародні фінансові організації та цільові програми	Програми ЕнергоДім, ВідновиДім, ГрінДім від ФЕЕ; пільгові кредити та донорська підтримка через міжнародні фінансові організації, міжнародна допомога, муніципальні програми відновлення, цільові програми
Обізнаність та мотивація населення	~60% визнавали потребу, ~20% були готові інвестувати [21]	тільки ~15% готові інвестувати у 2023 [21], пізніше зацікавленість зростає
Вартість енергії та стимул до модернізації	Помірне зростання цін, низький економічний стимул. Одним із вагомих стимулів було забезпечення нормованих параметрів мікроклімату, можливість регулювання	Дефіцит електроенергії та зростання тарифів стимулювали впровадження заходів. Економічні показники відходять на другий план, на перший виходять інші – надійність енергозабезпечення, зменшення енергозалежності, диверсифікація джерел енергії

Воєнний час характеризується високими ризиками втрати майна та інвестицій. Згідно з даними Міністерства енергетики України, понад 40% енергетичних об'єктів зазнали пошкоджень під час конфлікту [24]. Бізнес і домогосподарства можуть відкладати витрати на енергоефективність, побоюючись, що будівлі або обладнання можуть бути зруйновані обстрілами. Відновлення пошкоджених об'єктів потребує значних ресурсів, які могли б бути спрямовані на проекти підвищення енергоефективності. Страхування військових ризиків є важливою передумовою для залучення інвестицій у цій сфері [25].

Технічні та організаційні бар'єри

1) Проблеми з логістикою та постачанням обладнання внаслідок військових дій, адже було порушено логістичні ланцюги, що ускладнило постачання необхідного обладнання та матеріалів для енергоефективних проектів. Згідно з дослідженням Київської школи економіки, вартість логістики з початку збройного конфлікту зросла на 20% [24]

2) Недосконалість процедур публічних закупівель, зокрема системи електронних торгів ProZorro, створює труднощі для реалізації енергоефективних проектів. Основний критерій оцінки торгів – «мінімальна ціна тендерної пропозиції» – не завжди забезпечує якість виконання проектів. Крім того, свідоме заниження ціни підрядниками з подальшими маніпуляціями – досить поширена практика. Для уникнення таких ситуацій під час формування тендерної пропозиції доцільним є прописання детальних вимог щодо енергоефективності до обладнання, матеріалів і виробів та вимог до виконавця робіт/послуг.

3) Відсутність систем автоматизованого обліку енергоспоживання та деталізованої бази даних об'єктів для отримання фінансування; не ефективна робота персоналу в сфері енергетичного менеджменту на місцевому рівні (зокрема, через відсутність фінансування обов'язки енергоменеджера покладено на людину, що має іншу посаду і виконує інші завдання згідно зі штатним розкладом. У 57% громад не впроваджено енергомоніторинг, що ускладнює підготовку місцевих енергетичних планів [24]. З прийняттям професійного стандарту «Професіонал з енергетичного менеджменту» [26] кваліфікаційні вимоги до фахівців посилюються, що свідчить про необхідність підвищення кваліфікації персоналу.

Нормативно-правові бар'єри

В умовах євроінтеграції Україна активно оновлює законодавство у сфері енергоефективності. На даний час встановлені підвищені вимоги до енергоефективності для нового будівництва і реконструкції (особливо в рамках післявоєнної відбудови) [23]. Також існують певні проблеми неузгодженості деяких

нормативних документів між собою, зважаючи на обсяг оновлень і змін. Наразі для малоповерхового приватного сектора відсутні обов'язкові вимоги з енергоефективності при проектуванні, а це означає, що десятки тисяч нових приватних будинків можуть будуватися за застарілими стандартами, підвищуючи майбутнє навантаження на енергосистему. В 2023 році затверджено Стратегію термомодернізації до 2050 року та Національний план з розвитку будівель з близьким до нульового споживання, але імплементація цих стратегій потребує часу і ресурсів, що у воєнний період обмежені.

Регуляторні та адміністративні бар'єри

Проходження дозвільних процедур в Україні традиційно є складним і тривалим процесом. Попри цифровізацію, отримання дозволів та погоджень, проходження тендерних процедур з метою енергомодернізації будівельного фонду чи встановлення генеруючих потужностей потребує часу і коштів. В умовах війни частину процедур дещо спростили для термінового відновлення інфраструктури, але це стосувалося переважно аварійних ремонтів. Натомість інвестиційні проекти з енергоефективності стикаються з певними перешкодами: змінюються умови участі за різними програмами підтримки, бракує прозорості у розподілі коштів, відсутні кваліфіковані фахівці для складання техніко-економічних обґрунтувань і супроводження проєктів, складання тендерних пропозицій, узгодження рішень і т.д. Це гальмує реалізацію навіть економічно доцільних заходів. Звіт Національного інституту стратегічних досліджень зазначає, що бюрократичні перепони збільшилися на 15% під час конфлікту [26]. Крім того, існує проблема браку кадрів як в усіх сферах економіки держави у зв'язку зі збройним конфліктом. Наразі уряд декларує жорсткий контроль: жоден проєкт відбудови не фінансуватиметься без дотримання ключових вимог з безпеки та енергоефективності. Однак наглядові органи також відчувають брак ресурсів і кадрів. Необхідно вдосконалити моніторинг і відповідальність за недотримання енергетичних стандартів.

Соціальні бар'єри

Через небезпеку, пов'язану з військовими діями, багато фахівців виїжджають за кордон або переміщуються в безпечніші регіони, що призводить до дефіциту кваліфікованих працівників у сфері енергоефективності. Це ускладнює реалізацію та обслуговування проєктів. За оцінками Української асоціації енергоефективності, близько 25% спеціалістів залишили країну з початку конфлікту [27]. Крім того, фахівців з різних галузей мобілізують на фронт, що посилює проблему.

Війна створює атмосферу невизначеності та стресу, що знижує мотивацію до впровадження довгострокових проєктів. Люди та підприємства схильні відкладати інвестиції в такі проєкти до стабілізації ситуації. Дослідження вказують на те, що в умовах конфлікту пріоритети населення зміщуються на базові потреби [28]. До соціальних факторів традиційно можна віднести і поведінкові, наприклад відсутність мотивації і неузгодженість при прийнятті рішень щодо участі у проєктах підвищення енергоефективності мешканцями багатоквартирних будівель.

На основі узагальнення даних вказаних аналітичних звітів, було визначено ключові бар'єри і оцінено рівень їх впливу на реалізацію енергозберігаючих проєктів у будівельному фонді (табл.2.).

Таблиця 2 – Бар'єри для реалізації проєктів у сфері енергоефективності будівельного фонду

Категорія бар'єрів	Короткий опис	Рівень впливу
Економічні	Недостатнє фінансування, інфляція, високі інвестиції, тривалий період окупності для комплексних проєктів; небезпека руйнування внаслідок військових дій і ризики втрати майна. Ресурси держави спрямовано на війну	Дуже високий
Технічні та організаційні	Руйнування інфраструктури; дефіцит матеріалів і обладнання; порушення логістичних маршрутів. Відсутність автоматизованого моніторингу витрат. Брак кваліфікованих кадрів в громадах. Недостатня кількість спеціалістів, які могли б проєктувати і впроваджувати сучасні технології. Недосконалість процедур під час публічних закупівель.	Високий
Нормативно-правові	Прогалини в законодавстві, неузгодженість нормативно-правових документів.	Помірно високий
Регуляторні і адміністративні	Бюрократія та довгі процедури узгодження та експертизи проєктів відсутність кваліфікованих фахівців та/або досвіду розробки ТЕО для інвестиційних проєктів	Помірно високий
Соціальні	Низька обізнаність і мотивація; воєнні пріоритети та міграція населення; складність колективних рішень	Помірний

На рисунку 4 зображено частки відносного впливу різних категорій бар'єрів.

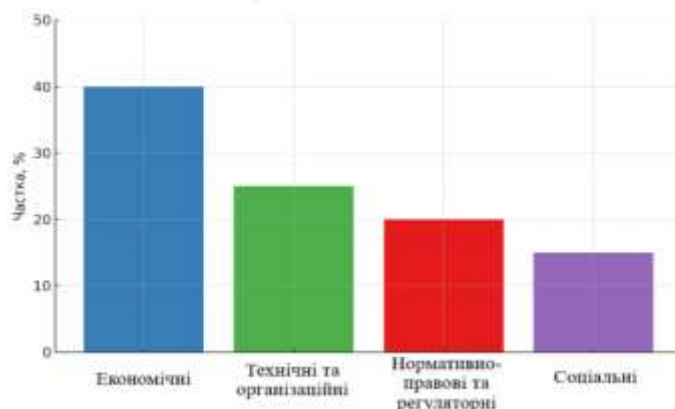


Рисунок 4 – Частки відносного впливу різних категорій бар'єрів

Таким чином, можна зробити висновок, що у період воєнного лихоліття впровадження енергоефективних заходів в Україні гальмується передусім фінансовими та технічними проблемами, підсиленими наслідками агресії. Під час післявоєнної відбудови закласти основу для “build back greener” – відбудови країни на принципах стійкої енергоефективності. Подолання вказаних вище бар'єрів потребує комплексних зусиль: залучення інвестицій і допомоги донорів для відновлення та модернізації інфраструктури, дерегуляції і спрощення процедур, підвищення кваліфікації персоналу, а також підвищення інформованості і вмотивованості громад і населення щодо участі в проєктах підвищення енергоефективності.

На основі аналізу діючої нормативної бази, національних програм і стратегій розвитку, практик міжнародної і державної підтримки у сфері енергоефективності, а також аналізу літературних джерел [29-31] були сформульовані перспективи розвитку для подолання визначених вище бар'єрів, що враховують сучасні тенденції енергетичної політики щодо будівельного фонду України (див. табл.3).

Таблиця 3 – Перспективи розвитку

Перспективи розвитку	Опис
Залучення інвестицій для фінансування проєктів	Фінансування від міжнародних організацій (GIZ, NEFKO, USAID, банк KfW Світовий банк, ЄБРР, ЄІБ та ін.) для розвитку енергоефективних проєктів. Залучення приватних інвесторів через створення сприятливого інвестиційного клімату, ЕСКО - механізм фінансування. Гранти та субсидії на впровадження енергоефективних технологій за рахунок цільових державних і місцевих програм підтримки. Навчання персоналу з питань вимог і процедур участі у інвестиційних проєктах, розробки техніко-економічних обґрунтувань Масштабна термомодернізація існуючого будівельного фонду, реалізація пілотних проєктів NZEB будівель, створення демонстраційних об'єктів
Відновлення та модернізація енергетичної інфраструктури	Розподілена генерація, впровадження технології розумних мереж (Smart Grid). Розвиток відновлюваних джерел енергії, збільшення частки сонячної та вітрової енергетики у загальному енергобалансі, зменшення споживання викопного палива Впровадження теплових насосів під час проєктування і реконструкції будівель. Створення стимулів для бізнесу та домогосподарств для переходу на відновлювану енергетику; декарбонізація економіки та інтеграція до європейського енергоринку. Впровадження сучасних цифрових технологій для автоматизації процесів управління енергоспоживанням
Законодавчі та регуляторні зміни	Удосконалення нормативно-правової бази, впровадження нових стандартів будівництва. Підтримка декарбонізації та "зеленої" економіки через введення нових податкових пільг, субсидій і програм. Спрощення процедур підключення до електромереж для виробників зеленої енергії, тендерних процедур, погоджень і експертизи проєктної документації та ін.
Освітні ініціативи	Розробка навчальних програм з енергоефективності для різних цільових аудиторій та проведення тренінгів. Популяризація енергоефективних технологій. Розвиток наукових досліджень щодо впровадження інновацій у сфері енергоефективності, участь у спільних міжнародних проєктах

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що ефективне впровадження енергоефективних заходів в Україні суттєво ускладнене низкою взаємопов'язаних бар'єрів, серед яких домінують економічні та технічні обмеження, посилені наслідками повномасштабної війни. В ході дослідження проведено аналіз ключових бар'єрів для реалізації енергоефективних проєктів і оцінку їх внеску у формування сукупного стримувального ефекту. Також окреслено перспективні напрямки розвитку в сфері енергоефективності, врахування яких дозволить закласти в основу діяльності під час післявоєнної відбудови принцип "build back greener". Разом з тим подальшого вивчення потребують кількісні показники впливу різних факторів.

Лише за умови комплексного підходу, який передбачає координацію зусиль держави, громад, міжнародних партнерів і бізнесу можлива системна модернізація енергетичного сектору і будівельного фонду. Післявоєнний період відкриває вікно можливостей для України на засадах стійкості і кліматичної нейтральності, яка дозволить Україні стати енергонезалежною державою.

Список використаної літератури

1. Центр економічних стратегій. Вплив військового конфлікту на інвестиції в енергоефективність: аналітична доповідь. Київ, 2023, 34 с.
2. IEA. (2023). Ukraine Energy Profile. International Energy Agency [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile>.
3. USAID. (2023). Energy Security Project – Ukraine Energy Market Monitoring Report. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energysecurityua.org>
4. НКРЕКП. (2024). Річний звіт про стан енергетичних ринків України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua>
5. Національний банк України. (2024). Щорічний звіт НБУ за 2023 рік [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bank.gov.ua/>
6. USAID. (2023). Ukraine Financial Sector Assessment [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.usaid.gov/ukraine>
7. DiXi Group. (2023). Financial Constraints and Investment Environment in Ukraine [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dixigroup.org/>
8. Оборонов Т.Ю., Шовкалюк М.М., Ткач М.О. Огляд програм підтримки комплексних проєктів з підвищення енергоефективності в житлових будівлях та аналіз результатів їх впровадження. № 1. 2025. с.32-42. Режим доступу: <https://energy.kpi.ua/article/view/324195/314508>
9. Офіційний сайт Фонду енергоефективності. Режим доступу: <https://eefund.org.ua/>
10. OECD. (2023). Government at a Glance: Performance Management and Project Implementation. – Paris: OECD Publishing. Режим доступу: <https://www.oecd-ilibrary.org/governance/government-at-a-glance-2023>
11. World Bank. (2022). Monitoring and Evaluation in Results-Based Project Management. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://documents.worldbank.org>
12. USAID Ukraine. (2023). Project Performance Tracking Handbook. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.usaid.gov/ukraine>
13. UNDP. (2022). Handbook on Results-Oriented Monitoring and Evaluation for Project Implementation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.undp.org/publications>
14. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine (2024). Annual Report on Housing and Communal Services Development. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua>
15. UNDP Ukraine (2024). Support for Energy Efficiency Projects in Residential Sector. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.undp.org/ukraine>
16. Світовий банк. (2024). Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/03/28/rdna>
17. GIZ (2024). Energy Efficiency in Residential Buildings in Ukraine: Progress and Investments. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.giz.de/en/worldwide/ukraine-energy-efficiency.html>
18. UNEP (2023). Ukraine's Green Recovery: Energy Efficiency in Housing Sector. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.unep.org/resources/report/ukraine-green-recovery-energy-efficiency>
19. Офіційний сайт: Мінрегіон. Програми термомодернізації житлового фонду: державна політика та міжнародна допомога (2024). Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/press/news/programy-termomodernizaciyi-zhytlovogo-fondu/>
20. Ecorpolitic. (2024). Досвід участі будівель в програмах термомодернізації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecorpolitic.com.ua/>
21. Інститут соціології НАН України. Готовність населення до інвестицій в енергоефективність: результати соціологічного дослідження. – Київ: ІС НАНУ, 2023. – 28 с.
22. Київська школа економіки. Вплив збройного конфлікту на логістичні ланцюги постачання в енергетичному секторі. – Аналітичний звіт. – Київ: KSE, 2023. – 22 с.

23. Міністерство енергетики України. Звіт про стан енергетичної інфраструктури та втрати внаслідок бойових дій. – Київ: Міненерго, 2024. – 46 с.
24. Програма розвитку ООН в Україні. Оцінка бар'єрів у сфері енергоефективності в громадах України. – Київ: ПРООН, 2023. – 40 с.
25. Національний інститут стратегічних досліджень. Регуляторні бар'єри розвитку енергоефективності в умовах воєнного стану. Київ, 2024. 30 с.
26. Професійний стандарт «Професіонал з енергетичного менеджменту» / Наказ КПІ ім.Ігоря Сікорського від 04.04.2025 р. № НОД/292/25 URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/734-profesional_z_energeticnogo_menedzmentu_compressed.pdf
27. Українська асоціація енергоефективності. Звіт про стан кадрового потенціалу у сфері енергоефективності в умовах війни. – Київ, 2023. – 19 с.
28. Жила Ганна. Економічні та соціальні наслідки війни в Україні, вплив конфлікту на економіку та суспільство. Економіка та суспільство. Вип.47. 2023. Режим доступу: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/download/2127/2056/>
29. Болдирева Л.М., Чайкіна А.О., Гришко В.В. Перешкоди на шляху до розвитку енергоефективності економіки України. Building innovations-2021: зб. наук. пр. IV Міжнар. укр.-азерб. наук.-практ. конф. [Полтава, 20–21.05.2021] – Полтава: НУ ім. Юрія Кондратюка, 2021. с. 404–407.
30. Красностанова Н., Яроміч С., Яценко О. Шляхи впровадження енергетичного менеджменту на підприємствах України. Київський економічний науковий журнал, 2024. №6. с. 70–77.
31. Ільїна О. А. Вітчизняна енергетична система: європейський вимір. Наука Онлайн. 2023. № 4. С. 7–11. Режим доступу: <https://nauka-online.com/ua/publications/economy/2023/4/07-11>

V. Deshko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

M. Shovkalyuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

O. Maksymenko¹, Assistant, ORCID 0000-0003-4099-2772

¹**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

ANALYSIS OF BARRIERS TO THE IMPLEMENTATION OF ENERGY EFFICIENCY PROJECTS IN UKRAINE IN THE CONDITIONS OF THE MILITARY CRISIS AND THE INITIAL STAGE OF RECOVERY

The purpose of this work is to analyze the current state of implementation of energy efficiency projects for the housing and communal sector in Ukraine, identify the main obstacles and promising ways to overcome them.

The article analyzes the main barriers that complicate the implementation of energy efficiency measures in the energy sector of Ukraine in the period from February 24, 2022 to the beginning of 2025. The review covers the following key groups of barriers: economic, technical and organizational, regulatory and social. Particular attention is paid to the impact of martial law, destruction of infrastructure and lack of investment on the dynamics of the implementation of energy efficiency policy. Various limitations in the formation of the cumulative impact on the energy sector are assessed, a comparative assessment of the significance of the barriers is carried out and strategic directions for overcoming them are proposed in the context of post-war energy recovery. The post-war period opens a window of opportunity for Ukraine on the principles of sustainability and climate neutrality, which will allow Ukraine to become an energy-independent state.

The results of the study can serve as an analytical basis for the development of effective state policy in the energy sector, in particular in terms of strategic energy efficiency planning, adaptation of national legislation to EU requirements and implementation of sustainable development goals. The results of the study will be useful for the formation of regional development programs, attracting donor and technical assistance within the framework of projects to rebuild the energy system of Ukraine on the basis of energy independence, in particular in terms of risk assessment.

Keywords: *energy efficiency, energy sector of Ukraine, barriers, post-war recovery, energy policy.*

References

1. Center for Economic Strategy. Impact of the Military Conflict on Energy Efficiency Investments: Analytical Report. – Kyiv, 2023. – 34 p.
2. International Energy Agency (IEA). Ukraine Energy Profile. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile>
3. USAID. Energy Security Project. Ukraine Energy Market Monitoring Report. 2023. URL <https://energysecurityua.org>

4. National Energy and Utilities Regulatory Commission of Ukraine (NEURC). Annual Report on the State of Ukraine's Energy Markets. 2024. URL: <https://www.nerc.gov.ua>
5. National Bank of Ukraine. Annual Report for 2023. URL: <https://bank.gov.ua/>
6. USAID. (2023). Ukraine Financial Sector Assessment. URL: <https://www.usaid.gov/ukraine/>
7. DiXi Group. (2023). Financial Constraints and Investment Environment in Ukraine. URL: <https://dixigroup.org/>
8. Oboronov T.Yu., Shovkalyuk M.M., Tkach M.O. Review of support programs for complex projects to improve energy efficiency in residential buildings and analysis of the results of their implementation. № 1. 2025. p.32-42. URL: <https://energy.kpi.ua/article/view/324195/314508>
9. Official website of the Energy Efficiency Fund. Access mode: <https://eefund.org.ua/>
10. OECD. (2023). Government at a Glance: Performance Management and Project Implementation. – Paris: OECD Publishing. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/governance/government-at-a-glance-2023>
11. World Bank. (2022). Monitoring and Evaluation in Results-Based Project Management. – [Електронний ресурс]. URL: <https://documents.worldbank.org>
12. USAID Ukraine. (2023). Project Performance Tracking Handbook. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.usaid.gov/ukraine>
13. UNDP. (2022). Handbook on Results-Oriented Monitoring and Evaluation for Project Implementation. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.undp.org/publications>
14. Official website: Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine (2024). Annual Report on Housing and Communal Services Development. URL: <https://www.minregion.gov.ua>
15. UNDP Ukraine (2024). Support for Energy Efficiency Projects in Residential Sector. URL: <https://www.undp.org/ukraine>
16. World Bank. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment. 2024. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/03/28/rdna>
17. GIZ. Energy Efficiency in Residential Buildings in Ukraine: Progress and Investments. 2024. URL: <https://www.giz.de/en/worldwide/ukraine-energy-efficiency.html>
18. UNEP. Ukraine's Green Recovery: Energy Efficiency in the Housing Sector. 2023. URL: <https://www.unep.org/resources/report/ukraine-green-recovery-energy-efficiency>
19. Official website: Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. Housing thermal modernization programs: state policy and international assistance (2024). URL: <https://www.minregion.gov.ua/press/news/programy-termomodernizaciyi-zhytlovogo-fondu/>
20. Ecopolitic. (2024). Evidence of participation in thermal modernization programs. URL: <https://ecopolitic.com.ua/>
21. Institute of Sociology, NAS of Ukraine. Willingness of the Population to Invest in Energy Efficiency: Results of a Sociological Study. Kyiv: IS NASU, 2023. 28 p.
22. Kyiv School of Economics. Impact of the Armed Conflict on Supply Chains in the Energy Sector: Analytical Report. Kyiv: KSE, 2023. 22 p.
23. Ministry of Energy of Ukraine. Report on the State of the Energy Infrastructure and Losses Due to Hostilities. Kyiv: Ministry of Energy, 2024. 46 p.
24. UNDP Ukraine. Assessment of Energy Efficiency Barriers in Ukrainian Communities. Kyiv: UNDP, 2023. 40 p.
25. National Institute for Strategic Studies. Regulatory Barriers to Energy Efficiency Development Under Martial Law. Kyiv, 2024. 30 p.
26. Professional standard "Professional in energy management" / Order of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute dated 04.04.2025 No. NOD/292/25 URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/734-profesional_z_energeticnogo_menedzmentu_compressed.pdf
27. Ukrainian Association of Energy Efficiency. Report on the State of Human Resources in the Energy Efficiency Sector During Wartime. – Kyiv, 2023. – 19 p.
28. Zhila H. Economic and Social Consequences of the War in Ukraine: Impact on the Economy and Society. Economy and Society. Vol.23. 2023. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/download/2127/2056/>
29. Boldyreva L. M., Chaikina A. O., Hryshko V. V. Barriers to the Development of Energy Efficiency in Ukraine's Economy. Building Innovations – 2021: Proceedings of the 4th Intern. Ukr.-Azerb. Scientific and Practical Conf., May 20–21, 2021. – Poltava: Yuri Kondratyuk National University, 2021. p. 404–407.
30. Krasnostanova N., Yaromich S., Yatsenko O. Ways of Implementing Energy Management in Ukrainian Enterprises. Kyiv Economic Scientific Journal. 2024. N6. p. 70–77.
31. Iliina O. A. Domestic Energy System: European Dimension. Science Online. 2023. N4. p. 7–11. URL: <https://nauka-online.com/ua/publications/economy/2023/4/07-11>

Надійшла: 09.05.2025
Received: 09.05.2025

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ СПІВПРАЦІ ЕНЕРГО-ІННОВАЦІЙНИХ ХАБІВ В ЗВО З ТЕРИТОРІАЛЬНИМИ ГРОМАДАМИ ТА ПІДПРИЄМСТВАМИ В ПРОЄКТАХ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Зважаючи на глобальні кліматичні зміни, зростаючі вимоги щодо енергоефективності в усіх галузях, нагальну потребу у відновленні інфраструктури і дефіцит кваліфікованих кадрів особливої ваги набуває формування нової генерації фахівців у сфері енергоефективності, відновлюваної енергетики та сталого будівництва. Для України в умовах повоєнної відбудови і інтеграції до Європейського зеленого курсу особливої актуальності набуває пошук нових підходів співпраці освіти з територіальними громадами і бізнесом, що дозволить забезпечити стаду трансформацію енергетичного та будівельного секторів. У відповідь на ці виклики університети відіграють ключову роль у трансформації освітнього процесу та розвитку практично орієнтованих платформ на зразок Енерго-Інноваційного Хабу (ЕнІнХабу) для підготовки нового покоління фахівців, що здатні реалізувати державний курс до кліматичної нейтральності. ЕнІнХаби можуть також виступати як осередки розвитку стартапів і центри для налагодження міжнародних партнерств для залучення грантових коштів на освітні проєкти і проєкти розвитку. Таким чином, заклади вищої освіти (ЗВО) відіграють важливу роль у створенні нової освітньої парадигми та міждисциплінарної підготовки спеціалістів. У даній статті буде наведено досвід становлення ЕнІнХабів в Україні. Також буде вивчено запити зі сторони роботодавців і територіальних громад щодо актуальних проблем в сфері енергоефективності шляхом проведення опитувань.

Ключові слова: енерго-інноваційний Хаб, територіальні громади, енергетичний менеджмент, енергоефективність.

Вступ: роль закладів освіти у підтримці сталого розвитку України

Зклади освіти є осередками знань, інновацій та соціально-політичного впливу, які не лише готують майбутніх науковців і фахівців у сферах енергоефективності, відновлюваної енергетики, екологічного проєктування, а й відіграють вагомий роль на національному й глобальному рівнях [1]. На фоні зростаючих екологічних викликів та цілей сталого розвитку від закладів освіти очікують активного залучення до вирішення проблем енергетики, відбудови і використання нових можливостей. Університети мають постійно адаптуватися до нових викликів і потреб і можуть стати рушіями сталих трансформацій через навчання, дослідження, інновації та поширення знань.

Сьогодні українські заклади вищої освіти продовжують фокусуватися на двох ключових напрямках - підготовці студентів та проведенні наукових досліджень для генерації нових знань. Проте дедалі помітнішою стає трансформація провідних університетів у бік моделі, де ЗВО виступає не лише освітнім і науковим осередком, а й повноцінним Центром знань і інновацій. Створення Енерго-Інноваційного Хабу на базі ЗВО відкриває нові можливості для залучення партнерів до оновлення освітніх програм, модернізації інфраструктури, а також формування центрів наукових досліджень і бізнес-ідей. Такий Хаб стане платформою для активної участі молоді в інноваційних проєктах і підготовки нової генерації фахівців-новаторів, здатних відповідати на актуальні виклики майбутнього.

Метою даного дослідження є оцінювання можливостей співпраці ЕнІнХабів з територіальними громадами і підприємствами і з урахуванням їх потреб.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- провести опитування територіальних громад з питань оцінки рівня впровадження системи енергоменеджменту;
- провести опитування роботодавців з питань підвищення рівня енергоефективності підприємств.

Матеріал і результати досліджень

Роль закладів освіти у підтримці сталого розвитку України та створення мережі ЕнІнХабів

Хаб (Hub) означає «розгалуження, вузол» (з англ.), або місце, яке об'єднує однодумців у вирішенні спільних ідей. ЕнІнХаби представляють собою не тільки центри новітніх знань з наявним сучасним обладнанням і лабораторіями, а й осередки розвитку зелених стартапів, надання консалтингових послуг з

обстеження постраждалих будівель та подальшого їх відновлення. ЕнІнХаби можуть виступати також як центри з налагодження міжнародних партнерств, в тому числі із закладами освіти та з залучення грантових коштів у відбудову громад та регіонів, що позиціонує їх як активних гравців в рамках майбутньої повоєнної відбудови України. Саме тому налагодження партнерства ЕнІнХабів з громадами, органами регіональної влади, бізнес-партнерами є надзвичайно важливим, адже це місце консолідації зацікавлених сторін, які розвивають інновації у сфері енергоефективності і спільно працюють над проектами. Зважаючи на те, що Україна спрямована на адаптацію положень стратегії зеленого курсу (European Green Deal) та гармонізацію нормативної бази з європейською [3,4], подібна діяльність в результаті дозволить досягти глобальних енергетичних і екологічних цілей. За останні прийнято серію професійних стандартів в сфері енергоаудиту [5-7] та енергетичного менеджменту [8], де описано вимоги до фахівців, що мають намір проваджувати відповідну діяльність. ЕнІнХаби – це місце, що дозволяє проводити тренінги для різних цільових аудиторій на актуальні теми, зустрічі і майстер-класи з використанням сучасного обладнання, здійснювати експериментальні і науково-практичні дослідження, підвищувати кваліфікацію, організовувати коворкінг [2].

Розвиток Енерго-Інноваційних Хабів в Україні розпочався в рамках Проєкту «Просування просування енергоефективності та імплементації Директиви ЄС», який реалізовано за дорученням уряду Німеччини компанією Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH [9]. Напрямок проєкту «Розбудова експертних центрів з відбудови України на базі Енерго-Інноваційних Хабів» (виконавець ГО «Школа енергоефективності» [10]) мав за мету розкрити потенціал закладів вищої освіти України як центрів знань та інноваційних практичних осередків з енергоефективного відновлення у територіальних громадах. Для прискорення цього процесу підготовлено посібник [2], де наведено рекомендації щодо становлення ЕнІнХабу як самостійної інституції. В рамках проєкту GIZ надав технічну підтримку для розвитку ЕнІнХабів, а саме: демонстраційне та лабораторне обладнання, інтелектуальні ресурси. Мережа створених ЕнІнХабів в Україні показана на рис.1 (в містах Дніпро, Запоріжжя, Київ, Луцьк, Миколаїв, Суми, Харків, Чернівці).

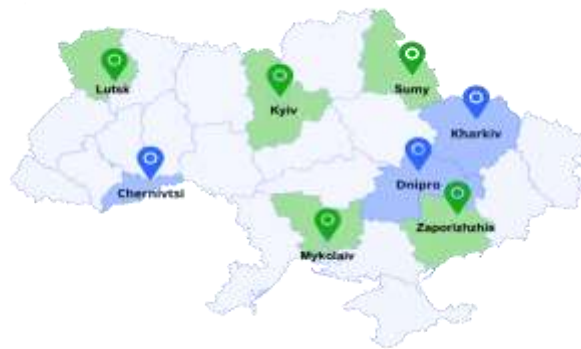


Рисунок 1 – Мережа ЕнІнХабів в Україні (синій – «перша хвиля», 2019; зелений – «друга хвиля», 2024) [3]

У 2024 році в КПІ ім. Ігоря Сікорського створено ЕнІнХаб як сприятливе середовище для формування інноваційних рішень і підготовки фахівців. ЕнІнХаб КПІ є мультидисциплінарною платформою, що поєднує науку, освіту, інженерну практику та підприємництво, що об'єднує три енергетичні школи університету [11]:

- Науково-навчальний Інститут атомної та теплової енергетики,
- Науково-навчальний Інститут енергозбереження та енергоменеджменту,
- Факультет електроенерготехніки та автоматики.

ЕнІнХаб КПІ ім. Ігоря Сікорського - центр широкої компетенції в сфері енергоефективності, що включає питання: підвищення енергоефективності будівельного фонду та промислового сектору, впровадження відновлюваних джерел енергії, створення та впровадження технологій «розумне» місто, будівельне енергетичне моделювання (ВЕМ) та інтелектуальних мереж керування інженерними системами; акредитації спеціалістів у сфері енергоаудиту тощо [11].

Основні напрями діяльності ЕнІнХабу КПІ ім. Ігоря Сікорського [11]:

- розробка та впровадження міждисциплінарних освітніх програм з акцентом на енергоефективність, ВІМ-технології, відновлювані джерела енергії тощо;
- інкубація студентських стартапів у сфері енергетики та кліматичних технологій;
- проведення тренінгів, воркшопів, хакатонів та інших практико-орієнтованих форматів, в тому числі з метою сталої промоції енергоефективності серед цільових аудиторій;
- партнерство з муніципалітетами, бізнесом та міжнародними організаціями для реалізації пілотних проєктів;

- надання консалтингових послуг у сфері енергоефективності для цільових аудиторій
- практичний коворкінг в сфері енергоефективності, де всі зацікавлені можуть реалізувати свої ідеї у сфері енергоефективності, шляхом надання доступу до технологій, обладнання, інструментів, програмного забезпечення;
- проведення науково-практичних досліджень в сфері енергоефективності та декарбонізації;
- промоція енергоефективності: профорієнтація молоді, популяризація професій у сфері енергоефективності, розповсюдження навчальних матеріалів, форуми, ярмарки вакансій, тренінги, майстер-класи, навчальні екскурсії та ін.

З урахуванням усіх викликів, перед якими стоїть наша держава, заклади освіти та ЕнІнХаби мають стати рушіями сталих трансформацій через навчання, дослідження, інновації та поширення знань. Їхня освітня функція вже давно виходить за межі класичного аудиторного навчання – вона охоплює планування, реконструкцію інфраструктури, логістику, закупівлі, а також взаємодію з бізнес-партнерами, організаціями і громадами. Роль ЗВО полягає у створенні інноваційних освітніх екосистем, таких як Енерго-Інноваційний Хаб, що поєднують навчання, дослідження та прикладні рішення для реального сектору. Такі екосистеми відіграватимуть у майбутньому ключову роль у формуванні нової генерації спеціалістів, спроможних вирішувати складні виклики кліматично нейтрального майбутнього через освіту, науку та інновації [11].

Зважаючи існуючий стан і нові вимоги до фахівців з енергоменеджменту [8, 12-14] актуальним є аналіз реального стану функціонування відповідних підрозділів в територіальних громадах. Розглянемо далі результати опитування територіальних громад щодо оцінки рівня впровадження системи енергоменеджменту. Це дозволить створювати і коригувати освітні програми підготовки здобувачів і навчальні програми підвищення кваліфікації для фахівців громад з урахуванням реальних потреб.

Опитування територіальних громад з питань оцінки рівня впровадження системи енергоменеджменту

Для оцінювання поточної ситуації із зазначеного питання було розроблено анкету, яку заповнювали представники груп впровадження проєктів з енергоефективності в територіальних громадах.

В опитуванні взяло участь 12 громад переможниць конкурсного відбору в рамках проєкту «Підтримка постраждалих міст в проєктах підвищення енергоефективності», що фінансується Федеральним міністерством економічного співробітництва та розвитку Німеччини (BMZ) та Державним секретаріатом з економічних питань Швейцарської Конфедерації (SECO).

Результати опитування представлено для двох груп:

- перша група громад (Центр-Південь): Бровари, Запоріжжя, Кривий Ріг, Миколаїв, Павлоград, Первомайськ (Миколаївська обл.);
- друга група громад (Схід-Північ): Балаклія, Конотоп, Мерефа, Охтирка, Златопіль (Первомайський, Харківська область), Суми.

На перше питання: «Чи розроблена в громаді програма підвищення енергоефективності чи подібні документи, наприклад «План дій сталого енергетичного розвитку та клімату»?» абсолютна більшість громад відповіли позитивно. Так, більше ніж 60% громад або мають розроблену програму енергоефективності, або її розробка на завершальній стадії. Детально результати опитування розподілилися так: 46,7% затверджено, 20% розпочато роботу, 26,7% розроблено або затверджено, 6,6% - не розроблено.

На друге запитання «Чи проводиться в громаді системна робота щодо підвищення ефективності енергоспоживання в бюджетній сфері?» всі громади відповіли позитивно: в шести з них така робота проводиться і розроблено відповідні інструкції та положення, а в шести робота проводиться, але не фіксується документально.

На третє запитання «Чи здійснюється моніторинг та аналіз енергоспоживання в бюджетній сфері міста?» половина громад відповіла, що у них використовується автоматизована система енергомоніторингу, в ще одній така система наявна, проте неактивно використовується, в трьох громадах моніторинг і аналіз здійснюється 1 раз на місяць, і лише в одній аналіз енергоспоживання не здійснюється (рис. 1). Нижче у таблиці 1 наведено назви програмних продуктів (систем), що використовуються громадами для моніторингу і аналізу енергетичних витрат в будівельному фонді.

Із відповідей фахівців на четверте питання «Чи призначено в місті осіб, відповідальних за ефективне енергоспоживання?» стало зрозуміло, що більш ніж в половині громад функції енергоменеджера виконують інші спеціалісти (в т.ч. екологи та економісти); лише в двох громадах сформований структурний підрозділ підпорядковується керівнику міста чи його заступнику, а в інших чотирьох – підрозділ сформовано у складі існуючого департаменту (рис. 2).

На п'яте питання «Чи існує система стимулювання до ощадного використання» слухачі в абсолютній більшості (10 громад) відповіли, що вона відсутня; лише в двох з них використовуються заохочення за ощадне енерговикористання.

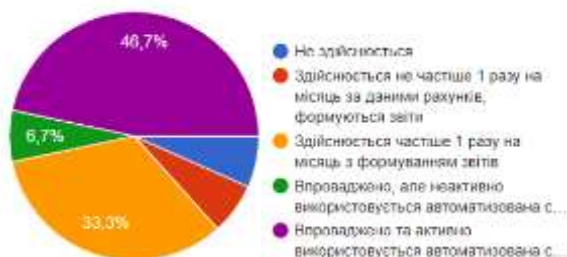


Рисунок 2 – Стан впровадження в громадах енергомоніторингу і аналізу енергоспоживання

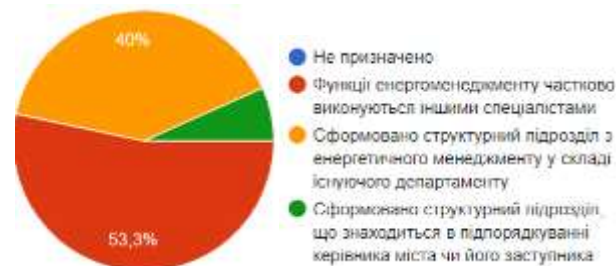


Рисунок 3 – Створення підрозділів енергоменеджменту в громадах

Таблиця 1 – Програмні продукти для енергомоніторингу, що використовуються енергоменеджерами громад

№п/п	Назва
1	uMuni
2	Автоматизована система енергомоніторингу "Київщина енергоефективна"
3	АІС «Енергосервіс: облік, контроль, економія»
4	підсистема «Моніторинг енергоефективності будівель» модуля «Житлово-комунальне господарство» програмно-інтеграційного комплексу геоінформаційної системи та геопорталу міста Кривий Ріг
5	Енергоплан 2.1
6	uMuni, 65 будівель бюджетної сфери оснащені автоматизованою системою моніторингу теплоспоживання будівель
7	Автоматизована ситема енергомоніторингу - власна розробка

Як бачимо із результатів відповідей на шосте питання: «Хто відповідальний за взаємодію з міжнародними фінансовими установами (МФО) по проєктах в галузі енергетики?», в основному за взаємодію з МФО відповідає відділ/управління економіки (7 відповідей), в чотирьох громадах за ці питання відповідає відділ енергетичного менеджменту, а в одній – офіційно немає відповідального підрозділу (рис.4). В абсолютній більшості громад відбувається моніторинг результатів енергоефективних проєктів. На сьоме питання анкети «Як відбувається планування реалізації енергоефективних проєктів?» вісім громад відповіли позитивно, одна громада вказала, що проєкти плануються на основі результатів моніторингу, проте подальший моніторинг не здійснюється; три громади відповіли, що спеціальне планування не відбувається. На восьме питання анкети «Чи маєте фахівців з досвідом розробки техніко-економічного обґрунтування проєктів підвищення енергоефективності» всі громади відповіли, що таких фахівців не мають. Це говорить про актуальність тематики техніко-економічних розрахунків, що має бути висвітлена під час розробки програм підвищення кваліфікації.

На дев'яте питання анкети «Чи ведеться систематичний збір експлуатаційних показників (технічні характеристики, час роботи обладнання і систем, кількість ремонтів тощо) підпорядкованих об'єктів?» більшість (7 громад) відповіли, що такий збір відбувається не систематично або дані не фіксуються документально у звітах, у чотирьох громадах взагалі збір таких даних не проводиться; і лише в одній з громад (у Запоріжжі) не тільки проводиться збір даних, але й розроблені відповідні інструкції та положення.

На десяте питання анкети «Чи ви ознайомлені із діючими нормами щодо енергоефективності будівель та інженерних систем, вимогами щодо їх ефективної експлуатації (Facility Management)?» більшість відповіли позитивно, але зауважили, що варто оновити знання. 1 громада відповіла, що ознайомена з цими питаннями (Конотоп), і одна – що не ознайомена. Інші три зауважили, що варто дізнатися діючі норми енергоефективності щодо будівель і вимоги щодо їх ефективної експлуатації (рис.5) З вимогами і процедурами щодо контролю якості у будівництві ознайомлені фахівці лише п'яти громад.

Заходи з популяризації питань енергоефективності серед населення проводяться в десяти з опитаних громадах, причому в шести з них – раз на рік (під час «Тижнів енергоефективності»).

Ще одне питання стосувалося тендерних закупівель, абсолютна більшість громад вказали, що під час закупівлі товарів і послуг, що впливають на використання енергії в громадах застосовується показник «мінімальна ціна», а три громади відповіли, що це – «показник енергоефективності».

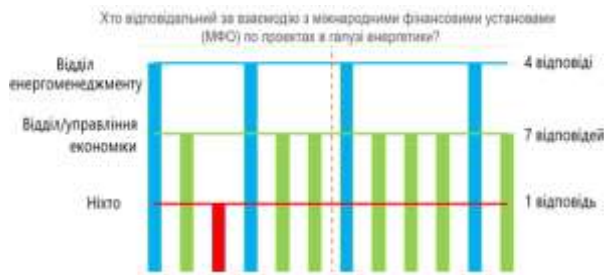


Рисунок 4 – Співпраця міст з МФО



Рисунок 5 – Знання нормативної бази з енергоефективності фахівців територіальних громад

На запитання «Чи у вашій громаді впроваджено проєкти чи бізнес-моделі для сталого розвитку (сортування сміття, економічний і соціальний розвиток, доступ для осіб з обмеженими можливостями тощо)?» усі громади відповіли «Так», проте п'ять з них зазначили, що ці проєкти мають не системний характер. Однак, як виявилось, до таких проєктів представники громад відносять проєкти з термомодернізації огорожувальних конструкцій будівлі та модернізацію ІТП. Також представники громад відповідали на питання, які теми вони б хотіли вивчити більш детально. Серед них: способи залучення коштів на енергоефективність, створення техніко-економічного обґрунтування на впровадження енергоефективних заходів та фінансово-економічний аналіз, сучасні енергоефективні технології, когенераційні та котельні установки, сталий розвиток громад, енергоменеджмент, зелене підприємництво та інші. Отже, можна зробити висновок, що питання, що стосуються втілення концепції сталого розвитку та можливих заходів для досягнення таких цілей, розвиток системи енергетичного менеджменту, вивчення всіх етапів реалізації енергоефективних проєктів [12-14] є актуальними для громад і потребують більш глибокого вивчення представниками груп впровадження проєктів.

Заклади освіти не тільки мають необхідну базу і методичні матеріали підвищення кваліфікації фахівців і підготовки кадрів за актуальними професіями, затребуваними на локальних ринках праці, але й сприяють стратегічному плануванню розвитку територій шляхом надання експертизи у таких напрямках, як енергоефективність, NZEB, управління відходами, циркулярна економіка та урбаністика. Крім того, заклади освіти і створені на їх базі ЕнІнХаби стають платформами для діалогу та співпраці між органами влади, бізнесом, громадським сектором, науковими та різними освітніми установами, об'єднуючи їх зусилля для створення інноваційних рішень сталого розвитку. ЕнІнХаби здійснюють практичну підтримку муніципалітетів, розробляючи технічну документацію, проводячи енергоаудити, а також просувають ідеї кліматично-нейтрального переходу, розробляючи та впроваджуючи новітні технологічні й управлінські підходи в міське середовище [15].

Також було проведено опитування роботодавців щодо знань і компетенцій для фахівців, що є затребуваними на ринку праці в сфері енергоефективності для формування подальших напрямків співпраці з ЕнІнХабами.

Опитування роботодавців щодо затребуваних послуг фахівців з підвищення енергоефективності підприємств України

Метою опитування є проведення дослідження затребуваних послуг серед роботодавців щодо підвищення рівня енергоефективності підприємств. Результати дослідження, що проведено ГО Школа енергоефективності із залученням Федерації роботодавців України можуть використовуватися для підготовки програм підвищення кваліфікації за участі ЕнІнХабів. В опитуванні взяло участь 23 підприємства з 10 областей України (Київська, Житомирська, Вінницька, Волинська, Львівська, Закарпатська, Одеська, Харківська, Дніпропетровська, Запорізька), що представляють різні сфери діяльності, зокрема наступні:

- місцеве самоврядування, центр зайнятості, обслуговування багатоквартирних будівель;
- виробництво металопродукції;
- зберігання та обробка зерна;
- харчова промисловість (виробництво хлібобулочних виробів, пиво-безалкогольних напоїв);
- легка промисловість (виробництво тари з пластмас та ін.).

На питання «Оберіть цікаві для вас напрямки діяльності ЕнІнХабів» відповіли наступним чином:

- 78% (18 представників) зацікавлені у співпраці по розробці планів/програм з підвищення енергоефективності;
- більше ніж 60% опитаних (14 представників роботодавців) зацікавлені у співпраці у напрямках: консультативної діяльності з питань енергоефективності і проведення енергоаудиту;
- навчальна діяльність (підвищення кваліфікації, розробка тренінгів з енергоефективного будівництва для працівників підприємства) є цікавим напрямком для 61% роботодавців;
- 30% зацікавлені у співпраці в сферах проєктування інженерних мереж та розробці проєктів з

реновації об'єктів.

В рамках планування програм підвищення кваліфікації, вебінарів для роботодавців ЕнІнХабам варто звернути увагу на зацікавленість аудиторії наступними темами (рис.6):

- ознайомлення з енергоефективним обладнанням – 79%,
- енергетичний менеджмент – 50%,
- можливості навчання у сфері енергоефективного будівництва – 30%.

Серед додаткових тем, які роботодавці хотіли б вивити, вони вказували наступні: приклади застосування енергоефективних технологій для будівництва; програмне забезпечення для виконання енергоаудиту і створення звіту, ефективні джерела енергії.

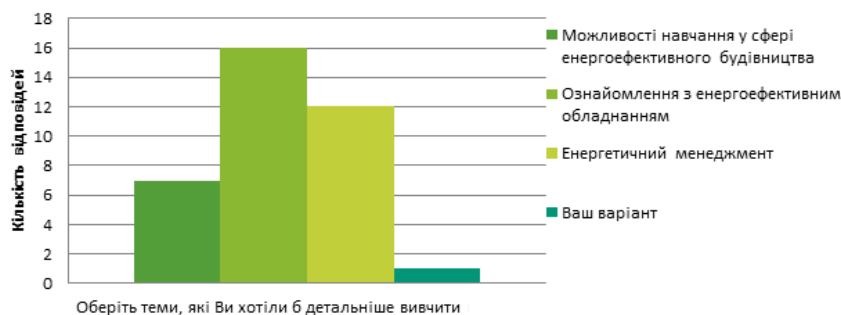


Рисунок 6 – Зацікавленість роботодавців певними темами для детального вивчення

Звертає на себе увагу, що серед 23 опитаних підприємств лише 6 (26%) мають програму підвищення енергоефективності (проте у 26% ця програма в процесі розробки); лише 3 підприємства (4%) з них мають систему енергоменеджменту. На підприємствах, де система енергоменеджменту впроваджена вона сертифікована за ISO 50001. Важливим є результат опитування щодо проходження працівниками підприємств підвищення кваліфікації з питань енергоефективності – лише на 8 (35%) підприємствах таке навчання працівники пройшли. Зважаючи на впроваджені на законодавчому рівні зміни, зокрема прийнятий Закон України «Про енергоефективність» [16] і підвищення вимог до персоналу, який займає посади енергоменеджерів [8], актуальність питання підвищення кваліфікації персоналу зростає.

Опитування також показало, що 10 (43%) підприємств взагалі не проводили енергетичний аудит та 12 підприємств серед опитаних проводили енергоаудит протягом останніх 5 років. 13 (56%) підприємств мають досвід впровадження енергоефективних проєктів, а 15 (66%) підприємств готові залучати кошти міжнародних організацій чи державних програм для підвищення енергоефективності. Серед найбільш поширених заходів, які впроваджувалися на підприємствах: модернізація технологічного обладнання, впровадження припливно-витяжної системи вентиляції з рекуперацією, термомодернізації огорожень.

Дуже позитивний результат опитування щодо зацікавленості роботодавців у напрямку співпраці з ЕнІнХабами по дуальній освіті – 19 (83%) підприємств виявили зацікавленість, а 52% готові брати студентів на переддипломну практику. 65% опитаних представників підприємств відчуває дефіцит кваліфікованих робітників у сфері енергоефективного будівництва.

Результати дослідження підтверджують затребуваність поширення знань про енергоефективність серед різних цільових аудиторій. Центрами таких поширень можуть стати ЕнІнХаби.

Висновки: станом на сьогодні університети перетворюються на інтелектуальні та інноваційні хаби, що формують технологічний фундамент суспільного розвитку. Вони стають центрами міждисциплінарного діалогу, платформами для взаємодії між наукою, бізнесом, громадами і суспільством. Заклади освіти виконують важливу посередницьку роль у передаванні знань з академічного середовища в реальний сектор економіки, до місцевих громад і фінансових спільнот. Університети стають активними гравцями в розвитку регіонів - підтримують місцеві розробки, створюють нові можливості, стимулюють впровадження інновацій. Освіта є стратегічним інструментом для досягнення кліматичних цілей та повоєнної відбудови України згідно з принципами сталого розвитку.

Проведене в ході дослідження опитування громад і представників бізнесу показало, що існує низка нагальних питань, які можна вирішувати шляхом співпраці з ЕнІнХабами. Серед них: проведення енергетичних аудитів; розробка планів та програм підвищення енергоефективності, інвестиційних проєктів, та техніко-економічних обґрунтувань; супровід проєктів та контроль якості у будівництві; підвищення кваліфікації персоналу, підготовка кваліфікованих працівників, дуальна освіта та ін.

Список використаної літератури

1. MorenoSerna, J., SanchezChaparro, T., M. Purcell, W., & Mataix, C. (2022). Driving Transformational Sustainability in a University Through Structural and Academic Innovation: A Case Study of a Public University in Spain. *Advances in Engineering Education*, 10.(1.), 1-34.
2. Путівник зі створення Енерго-Інноваційного Хабу : посібник / О. Шевченко, А. Лісовик, Є. Юрченко, В. Гранкіна, І. Фодчук ; упор.: І. Лепьошкін, А. Грицай, І. Юр'єва, В. Лісовик, Є. Новак. – К.: ТОВ «АК-ГРУП», 2024. - 96 с.
3. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
4. П. Шамілов. Огляд вимог nZEB В Європі. Аналітичний звіт. – К.: Опора, 2024, 59 с. URL: https://rehouse.org.ua/sites/default/files/1.zvit_nzeb.pdf
5. Професійний стандарт «Енергетичний аудитор будівель» / Наказ Мінінфраструктури від 22 вересня 2023 № 859. URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/544-energeticnij_auditor_budivel.pdf
6. Професійний стандарт «Енергетичний аудитор процесів» / Наказ Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України від 16.04.2024 №37-2. URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/612-557_01_01_01_09_4_31.pdf
7. Професійний стандарт «Енергетичний аудитор транспорту» / Наказ Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України від 31.05.2024 р. № 51-24. URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/625-psea_transportu_pisla_perevirki_1.pdf
8. Професійний стандарт «Професіонал з енергетичного менеджменту» / Наказ КПП ім. Ігоря Сікорського від 04.04.2025 р. № НОД/292/25 URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/734-profesional_z_energeticnogo_menedzmentu_compressed.pdf
9. Офіційний сайт GIZ В Україні, URL: <https://www.giz.de/en/worldwide/32413.html>
10. Офіційний сайт ГО «Школа енергоефективності», URL: <http://see.org.ua/projects/eninhub-project/>
11. О.М. Шевченко. Освіта для кліматично нейтрального майбутнього: роль Енерго-Інноваційного Хабу КПП ім. Ігоря Сікорського у підготовці нового покоління фахівців з енергоефективності та декарбонізації / Тези XXII міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» [Київ, 22 - 25 квітня 2025 р.] – К.: НН ІАТЕ, 2025.
12. Посібник з муніципального енергетичного менеджменту / Є.М. Іншеков, Є.Є. Нікітін, М.В. Тарновський, А.В. Чернявський. – К.: Поліграф плюс, 2014. –238 с. ISBN 978-966-8977-46-6.4.
13. Про впровадження систем енергетичного менеджменту : Постанова Каб. Міністрів України від 23.12.2021 р. No 1460 : станом на 28 квіт. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-%D0%BF#Text>
14. В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, М.М. Лунін. Досвід створення та функціонування систем енергомоніторингу на муніципальних об'єктах / *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2025. N1, с. 7-14. URL: <https://energy.kpi.ua/article/view/324186/314505>
15. Jan Youtie, Philip Shapira. Building an innovation hub: A case study of the transformation of university roles in regional technological and economic development. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.04.012>, *Research Policy*, Volume 37, Issue 8, September 2008, Pages 1188-1204.
16. Закон України «Про енергетичну ефективність» № 1818-IX редакція від 01.01.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>

O. Shevchenko¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-9304-5432

M. Shovkaliuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

V. Lisovyk², ORCID 0009-0000-1544-9597

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

²NGO «School of Energy Efficiency»

ANALYSIS OF COOPERATION POSSIBILITIES OF ENERGY INNOVATION HUBS IN THE ZVO WITH LOCAL COMMUNITIES AND ENTERPRISES IN ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT PROJECTS

Given global climate change, increasing demands for energy efficiency in all sectors, the urgent need for infrastructure renovation and the shortage of qualified personnel, the formation of a new generation of specialists in the field of energy efficiency, renewable energy and sustainable construction is of particular importance. For Ukraine, in the context of post-war reconstruction and integration into the European Green Deal, the search for

new approaches to cooperation between education and territorial communities and business is particularly relevant, which will ensure the sustainable transformation of the energy and construction sectors. In response to these challenges, universities play a key role in transforming the educational process and developing practically-oriented platforms, such as the Energy Innovation Hub (EnInHub) to train a new generation of specialists capable of implementing the state course on climate neutrality. Higher education institutions play a key role as centers for generating knowledge, technologies and innovations in cooperation with various stakeholders. The creation of EnInHubs is aimed at creating an innovative space for learning, cooperation, exchange of experience, demonstration and popularization of knowledge on energy efficiency, renewable energy sources and environmental protection. EnInHubs can also act as centers for the development of startups and centers for establishing international partnerships to attract grant funds for educational and development projects. Thus, higher education institutions (HEIs) play an important role in creating a new educational paradigm and interdisciplinary training of specialists. This article will present the experience of creating EnInHubs in Ukraine a. It will also study the appeals of employers and territorial communities on current problems in the field of energy efficiency through surveys.

Keywords: energy innovation hub, territorial communities, energy management, energy efficiency

References

1. MorenoSerna, J., SanchezChaparro, T., M. Purcell, W., & Mataix, C. (2022). Driving Transformational Sustainability in a University Through Structural and Academic Innovation: A Case Study of a Public University in Spain. *Advances in Engineering Education*, 10.(1.), 1-34.
2. Guide to Creating an Energy Innovation Hub: a manual / O. Shevchenko, A. Lisovyk, E. Yurchenko, V. Grankina, I. Fodchuk; ed.: I. Lepyoshkin, A. Hrytsay, I. Yuryeva, V. Lisovyk, E. Novak. – Kyiv: AK-GRUP LLC, 2024. – 96 p.
3. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
4. P. Shamilov. Review of nZEB requirements in Europe. Analytical report. – K.: Opora, 2024, 59 p. Access mode: https://rehouse.org.ua/sites/default/files/1.zvit_nzeb.pdf
5. Professional standard "Energy auditor of buildings" / Order of the Ministry of Infrastructure dated September 22, 2023 No. 859. URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/544-energeticnij_auditor_budivel.pdf
6. Professional standard "Energy auditor of processes" / Order of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine dated April 16, 2024 No. 37-2. URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/612-557_01_01_01_09_4_31.pdf
7. Professional standard "Energy auditor of transport" / Order of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine dated May 31, 2024 No. 51-24. URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/625-psea_transportu_pisla_perevirki_1.pdf
8. Professional standard "Professional in energy management" / Order of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute dated 04.04.2025 No. NOD/292/25 URL: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/734-profesional_z_energeticnogo_menedzmentu_compressed.pdf
9. Official website of GIZ in Ukraine, URL: <https://www.giz.de/en/worldwide/32413.html>
10. Official website of the NGO "School of Energy Efficiency", URL: <http://see.org.ua/projects/eninhub-project/>
11. O.M. Shevchenko. Education for a climate-neutral future: the role of the Energy Innovation Hub of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky in training a new generation of specialists in energy efficiency and decarbonization / Abstracts of the XXII international scientific and practical conference of young scientists and students "Modern problems of scientific support of energy" [Kyiv, April 22 - 25, 2025] - Kyiv: NN IATE, 2025.
12. Handbook on municipal energy management / E.M. Inshekov, E.E. Nikitin, M.V. Tarnovsky, A.V. Chernyavsky. - Kyiv: Polygraph Plus, 2014. - 238 p. ISBN 978-966-8977-46-6.4.
13. On the implementation of energy management systems: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 12/23/2021 No. 1460: as of April 28, 2023 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-%D0%BF#Text>
14. V.F. Nakhodov, O.V. Borychenko, M.M. Lunin. Experience in creating and operating energy monitoring systems at municipal facilities / *Energy: economics, technologies, ecology*. 2025. N1, pp.7-14. URL: <https://energy.kpi.ua/article/view/324186/314505>.
15. Jan Youtie, Philip Shapira. Building an innovation hub: A case study of the transformation of university roles in regional technological and economic development. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.04.012>, *Research Policy*, Volume 37, Issue 8, September 2008, Pages 1188-1204.
16. Law of Ukraine "On Energy Efficiency" No. 1818-IX, version dated 01.01.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>

Надійшла: 20.05.2024
Received: 20.05.2024

ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ.

LIBERALIZED ENERGY MARKETS.

УДК 621.317.318

DOI 10.20535/1813-5420.3.2025.339798

О.В. Коцар¹, канд.техн.наук, ORCID 0000-0002-7958-2335

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАНУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ПОПИТОМ

Дизайн лібералізованого ринку електричної енергії спрямовано на підвищення передбачуваності використання електричної енергії, що має на меті вдосконалення процесів управління об'єднаною електроенергетичною системою України, покращання режимів виробітку та споживання електричної енергії, скорочення непродуктивних енерговитрат і витрат в елементах електричної мережі та підвищення надійності електропостачання споживачів. Разом з тим, досягнення зазначеної мети багато в чому визначається ступенем діджиталізації процесів планування та управління попитом. В статті досліджено аспекти діджиталізації процесів енергетичного планування та управління попитом, зокрема, прогнозування енерговикористання та розбудови потенціалу управління попитом ресурсом споживачів-регуляторів. Бібл. 22.

Ключові слова: агрегування, балансувальна група, енергоефективність, планування, прогнозування, профіль навантаження, смартблік, смартсистема обліку, управління попитом.

Вступ. Енергетика сталого розвитку, серед іншого, передбачає ефективне використання енергетичних ресурсів, зокрема, електричної енергії. Втім, зважаючи на особливості електроенергетичного виробництва, режими електроспоживання безпосередньо впливають на режими виробітку електричної енергії, що вимагає узгодження попиту та пропозиції на електричну потужність (електроенергію) в кожний момент часу. В моделі централізованої електроенергетики це завдання розв'язувалося шляхом регулювання виробітку керованими генерувальними потужностями масивної генерації (*bulk generation*) відповідно до рівня і структури попиту в електроенергетичній системі (ЕЕС). Але цей шлях виявився надто коштовним і вкрай не екологічним і призводив до збільшення використання викопного палива та посилення шкідливого тиску на довкілля в першу чергу через те, що змінне навантаження споживачів покривається маневреними блоками переважно теплових електричних станцій, витрати палива, шкідливі викиди, собівартість виробітку електричної енергії на яких більше за аналогічні показники базових енергоблоків. В сучасній моделі децентралізованої енергетики масивна генерація неухильно поступається розосередженим генерувальним установкам (*dispersed generation, DG*) переважно на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які зазвичай приєднано до електричної мережі в безпосередній близькості від навантажень користувачів. Враховуючи некерованість генерувальних установок на базі ВДЕ на сучасному етапі узгодження попиту і пропозиції на електричну потужність (електроенергію) за таких умов має здійснюватися через управління з боку попиту (*demand-side management, DSM*) [1].

При цьому варто усвідомлювати, що головним завданням користувача є виробництво продукції / надання послуг / забезпечення життєдіяльності через належну організацію технологічних та інших процесів, а управління попитом з точки зору користувача є другорядною і не факт що потрібною користувачеві діяльністю. І здійснювати управління попитом користувач буде лише за наявності вагомих стимулів, серед яких перш за все варто розглядати отримання матеріальної вигоди. При цьому така вигода може бути як прямою, наприклад через оплату ЕЕС наданих споживачем послуг з балансування (ПБ) та допоміжних послуг (ДП) або закупівлю електричної енергії за вигідною ціною, так і непрямою, через забезпечення неперервності електропостачання та захисту користувача від вимкнень і тим самим уникнення витрат від недовиробітку продукції / ненадання послуг, уникнення некомфортних умов життєдіяльності тощо. То ж виконання рекомендацій ЕЕС щодо узгоджених режимів електроспоживання безумовно в інтересах користувача [2].

Варто також розуміти, чи здатний користувач (сторона попиту) реагувати на сигнали, що надсилаються ЕЕС. Виробництво продукції / надання послуг часто пов'язано зі складними технологічними процесами, в яких використовуються десятки, сотні чи тисячі пов'язаних спільними режимами роботи струмоприймачів. Деякі технологічні процеси, наприклад, хімічні виробництва або

видобування корисних копалин є вельми небезпечними і їхнє знеструмлення може призвести до техногенних катастроф. В інших випадках екстрене припинення електропостачання може призводити до значних матеріальних збитків як, наприклад, на ливарних заводах або підприємствах харчової промисловості. Такі ж самі наслідки можуть спіткати і комерційні компанії, наприклад, оптові продуктової бази, ритейлерів, фармакологічні компанії, де тривале знеструмлення холодильних установок призводить до псування продуктів харчування та лікарських засобів. За таких обставин непередбачуване вимкнення навіть одного струмоприймача може призводити до ланцюгової реакції і вимкнення технологічної лінії в цілому. З цих причин до управління попитом користувачі мають підходити системно, ретельно плануючи заходи DR наперед. А це, зі свого боку, вимагає передбачуваної поведінки ЕЕС, яка має інформувати користувачів про поточні режими роботи і прогнозовані варіанти розвитку подій, що в свою чергу вимагає організації надійної двоспрямованої комунікації між енергосистемою та кваліфікованими користувачами [2].

Регламенти виробітку та споживання електричної енергії багато в чому визначаються дизайном лібералізованого ринку електричної енергії і спрямовано на підвищення передбачуваності електроенергетичних потреб користувачів, що має на меті вдосконалення процесів управління об'єднаною електроенергетичною системою (ОЕС) України, покращання режимів електроспоживання, скорочення непродуктивних енерговитрат і втрат в елементах електричної мережі та підвищення надійності електропостачання споживачів. З метою поетапного узгодження попиту і пропозиції електричної потужності (електроенергії) в кожний момент часу регламентами функціонування ринку передбачено попереднє планування електроенергетичних потреб через контракування необхідних обсягів електричної енергії на довгострокову перспективу в сегменті ринку двосторонніх договорів (РДД), наступне замовлення параметрів режимів електроспоживання (профілів навантаження), а за необхідності – закупівля додаткових обсягів електричної енергії відповідно до заявленого профілю навантаження в сегменті ринку «на добу наперед» (РДН), погодинне уточнення обсягів продажу/закупівлі електричної енергії в сегменті внутрішньодобового ринку (ВДР), який часто називають ринком «на годину наперед», що має на меті згладжування невідповідності помиту і пропозиції, зумовленої стохастичним характером виробітку електричної енергії генерувальними установками на базі ВДЕ, з подальшим використанням проданих/закуплених обсягів електричної енергії відповідно до заявлених на РДН профілів навантаження на балансувальному ринку (БР) упродовж операційної доби. І чим точніше буде використано закуплені / законтраковані в сегментах РДД, РДН та ВДР обсяги електроенергії, тим за меншою ціною врешті решт буде оплачено електричну енергію кінцевими користувачами, що має стимулювати останніх до узгодженого використання електричної енергії відповідно до заявлених наперед режимів електроспоживання. Будь-які відхилення на БР від заявленого в сегментах РДД, РДН та ВДР профілю навантаження має бути сплачено покупцем за ринковою ціною [3].

Мета і завдання досліджень. Метою досліджень є вдосконалення процесів планування та управління попитом через підвищення точності прогнозування режимів електроспоживання і визначення потенціалу управління попитом агрегованої групи та кожного окремого користувача електричної енергії у складі такої групи. Для досягнення поставленої мети в статті послідовно розв'язано низку завдань, зокрема, досліджено шляхи закупівлі електричної енергії кінцевими користувачами, виконано порівняльний аналіз сучасних методів прогнозування профілів електричного навантаження і запропоновано базові принципи побудови індивідуальних прогнозних моделей режимів електроспоживання кваліфікованих кінцевих користувачів електричної енергії, а також наведено цільові функції управління попитом кваліфікованими користувачами електричної енергії самостійно або у складі балансувальних (агрегованих) груп, які може бути інтегровано до розвинутих смартсистем вимірювання, обліку та управління енерговикористанням кваліфікованих користувачів електричної енергії [4, 5] з метою мінімізації результуючої вартості закупівлі електричної енергії та підвищення ефективності енерговикористання.

Матеріал досліджень. Кваліфіковані користувачі (споживачі) електричної енергії закуповують (законтракують) електричну енергію безпосередньо на оптовому ринку електричної енергії (ОРЕ) в сегментах РДД, РДН та ВДР і приймають участь в роботі БР самостійно або у складі балансувальних груп (БГ). Споживачі, які не закуповують електричну енергію в ОРЕ, закуповують електричну енергію на роздрібному ринку через торговельних посередників – електропостачальників (ритейлерів). Принципи закупівлі електричної енергії кінцевими користувачами мають значення, оскільки саме покупець електричної енергії безпосередньо на оптовому ринку несе персональну відповідальність за режими електроспоживання, а клієнт посередника такої відповідальності не несе, за нього відповідальність несе посередник – електропостачальник.

Зазвичай, ціна на електричну енергію, що закуповується споживачем у електропостачальника на роздрібному ринку, визначається за формулою [6]:

$$Ц = Ц_1 + T_2 + Ц_3, \quad (1)$$

де Ц_1 – ціна закупівлі електричної енергії в ОРЕ, грн/кВт·год; T_2 – тариф оператора системи розподілу (ОСР) для точок обліку / об'єктів споживачів відповідного класу напруги, які приєднані до електричних мереж відповідного ОСР, розрахований ОСР у встановленому порядку, грн/кВт·год; Ц_3 – ціна послуг електропостачальника, грн/кВт·год. Ціна закупівлі електричної енергії в ОРЕ Ц_1 визначається за формулою:

$$\text{Ц}_1 = \text{Ц}_{\text{ОСР}_{i-1}} \cdot \frac{\text{ОРЦ}_i}{\text{ОРЦ}_{i-1}}, \quad (2)$$

де $\text{Ц}_{\text{ОСР}_{i-1}}$ – фактична ціна закупівлі електричної енергії в ОРЕ для забезпечення графіку загального споживання електричної енергії споживачами, які приєднані до мереж відповідного ОСР і не обладнані інтервальними лічильниками (погодинного) комерційного обліку, за попередній розрахунковий період (місяць), грн/кВт·год; ОРЦ_i – прогнозована оптова ринкова ціна, яку встановлено Регулятором для розрахункового періоду i , грн/кВт·год; ОРЦ_{i-1} – прогнозована оптова ринкова ціна, яку встановлено Регулятором для попереднього розрахункового періоду $i-1$, грн/кВт·год.

Компоненти ціни Ц_1 і T_2 є такими, що не залежать від електропостачальника і їх може бути змінено без попередження клієнта. Компонент ціни Ц_3 є таким, що встановлюється електропостачальником і клієнта має бути поінформовано про змінення значення Ц_3 у спосіб, визначений договором на постачання електричної енергії.

Компонент ціни Ц_3 визначається на підставі акцептованої споживачем комерційної пропозиції електропостачальника відповідно до додатку 2 до Договору про постачання електричної енергії споживачу, примірник якого наведено в додатку 5 Правил роздрібного ринку електричної енергії [6]. Наприклад, комерційна пропозиція «Базова-А» постачальника електричної енергії ТОВ «Київські енергетичні послуги» [7] призначена для непобутових споживачів, які бажають укласти договір про постачання електричної енергії споживачу із погодинним визначенням вартості обсягу спожитої електроенергії. Ціна на електричну енергію за таких умов визначається за формулою [7]:

$$\text{Ц}_i = \text{Ц}_{\text{РДН}} \cdot \text{K}_i + \text{P} + \text{T} + \text{Ц}_\text{п}, \quad (3)$$

де $\text{Ц}_{\text{РДН}}$ – середньозважена ціна закупівлі електричної енергії в сегменті РДН, яка визначається з урахуванням оперативних даних щодо погодинних цін на РДН у місяці на дату формування рахунку, аналізу ОРЕ (прогнозів виробництва і споживання, графіків обмеження потужності та споживання, дефіциту виробничих потужностей, зміни цін на організованих площадках торгівлі електроенергією тощо). $\text{Ц}_{\text{РДН}}$ розраховується з урахуванням оперативних даних щодо графіку погодинного споживання за площадками групи «а» всіх споживачів – клієнтів електропостачальника. При цьому, за результатами минулих розрахункових періодів, враховуючи відхилення прогнозних від фактичних значень щодо ціни та обсягів споживання, електропостачальник має право врахування (коригування) виниклої різниці під час розрахунку $\text{Ц}_{\text{РДН}}$; $\text{K}_i = 1,04$ – коефіцієнт, який враховує прогнозні витрати (регульовані та фіксовані платежі, інші платежі тощо) електропостачальника для забезпечення діяльності на організованих сегментах ринку (РДН, ВДР, БР тощо); P – регульована ціна (тариф) послуг ОСР, до якого приєднаний об'єкт споживача, на відповідному класі напруги, грн/кВт·год; T – регульована ціна (тариф) послуг оператора системи передачі (ОСП), грн/кВт·год; $\text{Ц}_\text{п}$ – ціна додаткових послуг, пов'язаних з постачанням електричної енергії споживачу, що складає 0,10 грн/кВт·год. Актуальні тарифи на послуги розподілу і передачі викладено на сайті НКРЕКП [8].

В разі акцепту комерційної пропозиції «Базова-А» сторони договору погоджуються, що електропостачальник має право здійснити коригування ціни електричної енергії для здійснення остаточних розрахунків, в разі якщо за оперативними даними між середньозваженими погодинними цінами на РДН за площадками групи «а» в поточному та минулому розрахункових періодах відбулось відхилення. Відповідне відхилення є коливанням ціни на ринку та визначається за оперативними даними Оператора ринку (ОР), що оприлюднюються у порядку, встановленому Правилами ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку [9], і не потребує додаткових підтверджень від інших установ. Коригування, пов'язане зі зміною регульованих компонентів $\text{Ц}_{\text{РДН}}$ та/або ціни регульованих послуг (P , T та/або інших, в разі їх встановлення Регулятором), формування яких не залежить від електропостачальника, не потребує завчасного інформування клієнта. Коригування та зміна цін регульованих послуг здійснюється на різницю відхилення. Про зміну ціни послуг $\text{Ц}_\text{п}$ та коефіцієнту K_i клієнта інформують завчасно до початку їх застосування. Інформація про оперативні дані середньозваженої ціни закупівлі $\text{Ц}_{\text{РДН}}$, ціни регульованих послуг та коефіцієнт K_i публікується в особистому кабінеті клієнта на сайті електропостачальника.

Акцепт комерційної пропозиції «Базова-А» може бути здійснено клієнтами, електроустановки яких обладнано інтервальними лічильниками погодинного комерційного обліку електричної енергії і засобами, що забезпечують надійне дистанційне зчитування даних з лічильника. Умови віднесення об'єктів споживачів до площадок груп «а» і «б» визначено [10]. Клієнти, електроустановки яких не обладнано

інтервальними лічильниками погодинного комерційного обліку електричної енергії або не обладнано засобами, що забезпечують надійне дистанційне зчитування даних з лічильника, можуть вибрати інші комерційні пропозиції.

Комерційна пропозиція «Базова–Б» [11] призначена для непобутових споживачів, які бажають укласти договір про постачання електричної енергії споживачу на базових публічних умовах постачання. Ціна на електричну енергію за таких умов визначається за формулою (3), де $C_{pдн}$ розраховується з урахуванням оперативних даних щодо графіку погодинного споживання за площадками групи «б» всіх споживачів електропостачальника. В разі акцепту комерційної пропозиції «Базова–Б» сторони договору погоджуються, що електропостачальник має право здійснити коригування ціни електричної енергії для здійснення остаточних розрахунків, в разі якщо за оперативними даними між середньозваженими погодинними цінами на РДН за площадками групи «б» в поточному та минулому розрахункових періодах відбулось відхилення. Решта умов відповідають умовам комерційної пропозиції «Базова–А».

Ціна на електричну енергію за комерційною пропозицією «Надійна» [12] формується з урахуванням регульованих цін (тарифів) на послуги операторів системи. Ціна C_i за фактично спожитий обсяг у розрахунковому періоді визначається за формулою [12]:

$$C_i = C_e \cdot K_n + P + T, \quad (4)$$

де C_e – компонент ціни на електричну енергію з урахуванням даних щодо графіків споживання за відповідними площадками групи «б», прогнозу цін на ринку електричної енергії (РДД, РДН, ВДР, БР), грн/кВт·год. Цей компонент формується для кожного розрахункового періоду (місяця) та долучається до ціни електричної енергії C_i , яка повідомляється клієнтові в особистому кабінеті на сайті електропостачальника, до 10 числа розрахункового періоду; $K_n = 1,03$ – коефіцієнт, який враховує дохідність електропостачальника. В разі акцепту комерційної пропозиції «Надійна» сторони договору погоджуються, що зміна C_i пов'язана зі зміною регульованих цін на послуги (P, T та/або інших, в разі їх встановлення Регулятором), формування яких не залежить від електропостачальника і застосовуються з моменту введення їх в дію відповідним нормативним актом. Про зміну коефіцієнту K_n клієнт повідомляється не пізніше ніж за 20 днів до початку його застосування. Інформація про складові C_i публікується в особистому кабінеті споживача на сайті електропостачальника.

Ціна на електричну енергію за комерційною пропозицією «Надійна–А» [13] формується з урахуванням регульованих цін (тарифів) на послуги операторів системи. Ціна (C_i) за фактично спожитий обсяг у розрахунковому періоді визначається за формулою (4), де C_e – середньозважена ціна закупівлі електричної енергії на РДН, яка визначається з урахуванням оперативних даних щодо погодинних цін на РДН у місяці на дату формування рахунку, аналізу ОРЕ (прогнозів виробництва і споживання, графіків обмеження потужності та споживання, дефіциту виробничих потужностей, зміни цін на організованих площадках торгівлі електроенергією тощо), грн/кВт·год. Середньозважена ціна закупівлі C_e розраховується з урахуванням оперативних даних щодо графіку погодинного споживання за площадками групи «а» всіх споживачів електропостачальника на території відповідного ОСР, на яких ЛУЗОД, АСКОВЕ, АСЗД відсутні, не впроваджені в експлуатацію. При цьому, за результатами минулих розрахункових періодів, враховуючи відхилення прогнозних від фактичних значень щодо ціни та обсягів споживання, електропостачальник має право врахування (коригування) виниклої різниці при розрахунку ціни закупівлі; $K_n = 1,03$ – коефіцієнт, який забезпечує дохідність електропостачальника і охоплює всі інші витрати (плата за небаланси, плата за операції на РДН та ВДР тощо), крім витрат на послуги з передачі та розподілу. В разі акцепту комерційної пропозиції «Надійна–А» сторони договору погоджуються, що компонент C_e є розрахунковим, не залежить від волі електропостачальника, а тому не є зміною ціни і обов'язок щодо завчасного повідомлення на нього не розповсюджується.

Таким чином, під час укладання договору з електропостачальником на постачання електричної енергії на роздрібному ринку користувач може вибрати комерційну пропозицію залежно від обладнання власних електроустановок інтервальними лічильниками погодинного комерційного обліку електричної енергії і засобами, що забезпечують надійне дистанційне зчитування даних з лічильника, та готовності брати на себе солідарну відповідальність за небаланси на БР, яку електропостачальник, як суб'єкт ОРЕ, несе перед ОСП, або може перекласти таку відповідальність виключно на електропостачальника, погоджуючись при цьому на ціну за вищою тарифною ставкою. Втім, найнижчу ціну сплачують кваліфіковані користувачі, які є учасниками ринку і провадять свою діяльність в порядку, передбаченому [14]. За таких умов кваліфікований користувач – учасник ринку самостійно закуповує електричну енергію безпосередньо в сегментах РДД, РДН та ВДР і заявляє ОР власний профіль навантаження, і так само несе персональну відповідальність за виконання заявлених режимів електроспоживання на БР перед ОСП.

З вищевказаного логічно витікає, що кваліфіковані користувачі електричної енергії, які прагнуть мінімізувати вартість закупівлі електричної енергії, мають попередньо визначити і заявити власні енергопотребителі із подальшим використанням електричної енергії відповідно до заявлених режимів електроспоживання.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети кваліфікований користувач електричної енергії має послідовно розв'язувати такі завдання [3]:

- планування потреб в електричній енергії на довгострокову перспективу;
- планування режимів електроспоживання на операційну добу Д;
- використання електричної енергії упродовж кожного розрахункового періоду операційної доби Д відповідно до заявлених (запланованих) режимів електроспоживання з мінімальними відхиленнями;
- управління режимами електроспоживання (попитом) упродовж кожного розрахункового періоду операційної доби Д з метою попередження відхилень від узгоджених (заявлених) обсягів закупівлі електричної енергії.

Логіка постановки задачі проста: чим точніше користувачем визначено власні потреби в електричній енергії, зокрема, профіль навантаження операційної доби, тим легше (природніше) кваліфікованому користувачу дотримуватися заявлених режимів електроспоживання, а від так, тим меншими будуть відхилення на БР і тим легше буде впоратися з такими відхиленнями із застосуванням різних методів управління попитом. Відповідно, тим нижчою буде підсумкова вартість закупівлі електричної енергії, що врешті рещт і є кінцевою метою кваліфікованого користувача.

Втім, для досягнення поставленої мети кваліфікований користувач має володіти певним інструментарієм планування та управління попитом, зокрема [2]:

- забезпечення комерційного і технічного обліку електричної енергії на базі смартлічильників;
- наявність повнофункціональної смартсистеми вимірювання, обліку та управління енерговикористанням;
- доступність споживачів-регуляторів та іншого інструментарію управління попитом.

До цього інструментарію також потрібне прагнення користувача дотримуватися узгодженого використання електричної енергії, що врешті рещт є визначальним для досягнення поставленої мети.

Планування потреб користувача в електричній енергії на довгострокову перспективу є окремим завданням і в рамках розв'язання задачі планування та управління попитом розглядається як таке, що відбулося і тому в цій статті не досліджується. До того ж, довгострокові потреби може бути завчасно скориговано шляхом внесення відповідних змін до білатеральних контрактів на РДД.

Завдання планування режимів електроспоживання на операційну добу Д в свою чергу складається з попереднього планування профілю навантаження із законтракованих на РДД обсягів електричної енергії і повідомлення про попередньо запланований профіль навантаження ОР не пізніше 10-ї години доби Д-2, що передує добі постачання (операційній добі Д). При цьому попередньо заявлений профіль навантаження кваліфікованого користувача має бути забезпечено обсягами потужностей відповідних типів (базова, маневрена, пікова) власної генерації та/або купівлі на РДД та/або імпорту [9].

Кваліфікований користувач – учасник ринку має можливість покрити власні потреби операційної доби щогодинними обсягами електричної енергії, закупленої виключно на РДД або додатково чи цілком закупити обсяги електричної енергії для кожної години доби постачання на РДН. Зрозуміло, що ціна закупівлі передбачувано буде найнижчою на РДД і зростатиме залежно від обсягів електричної енергії, що закуповуються на РДН.

Після «закриття воріт РДН» (планово о 12:00 але не пізніше 21:00 доби Д-1, що передує добі постачання [9]) кваліфікований користувач – учасник РДН/ВДР може подавати заявки на торги на ВДР починаючи з 15:00 години доби, що передує добі постачання і до «закриття воріт ВДР», що настає за 60 хвилин до початку розрахункового періоду, на який подається заявка [9]. Під час торгів на ВДР кожний учасник визначає обсяги та ціни на електричну енергію для розрахункових періодів доби постачання після завершення торгів на РДН та впродовж доби постачання відповідно до [9] та одномоментний процес купівлі та продажу електричної енергії на ВДР.

За результатами торгів в сегментах РДД, РДН та ВДР кваліфікований користувач – учасник ринку закуповує планові обсяги електричної енергії $W_i^{\text{план}}$ для кожної години (розрахункового періоду) доби постачання Д [3]:

$$W_i^{\text{план}} = W_i^{\text{РДД}} + W_i^{\text{РДН}} + W_i^{\text{ВДР}}, \quad (5)$$

де $W_i^{\text{РДД}}$ – обсяг законтракованої на РДД електричної енергії, заявленої для використання в i -му розрахунковому періоді доби постачання Д, кВт·год; $W_i^{\text{РДН}}$ – обсяг електричної енергії, закуплений безпосередньо на РДН для використання впродовж i -го розрахункового періоду доби постачання Д, кВт·год; $W_i^{\text{ВДР}}$ – коригування обсягу електричної енергії для i -го розрахункового періоду доби постачання Д за результатами торгів на ВДР (алгебраїчна величина), кВт·год. За фактом $W_i^{\text{план}} [i: 1; 24]$ і є заявленим профілем навантаження (режимом електроспоживання) кваліфікованого користувача на добу постачання Д. То ж достовірне визначення $W_i^{\text{план}}$ забезпечить мінімальні відхилення від нього упродовж операційної доби Д.

Достовірне визначення $W_i^{\text{план}}$ має базуватися на якісному плануванні потреб в електричній потужності (електроенергії) для кожної години доби. Зазвичай це завдання розв'язується шляхом прогнозування добових профілів електричного навантаження, що розглядаються як часові ряди, різними методами. Часовим рядом (ЧР) називають послідовність значень, що описують перебіг певного процесу, виміряних /визначених зазвичай через рівні інтервали часу [15]. Добовий профіль навантаження є класичним прикладом ЧР і найвагомішим параметром режиму електроспоживання користувача (споживача) електричної енергії. В електроенергетиці вміст таких ЧР часто називають історичними даними (*historical data*, HD).

Історичні дані профілів навантаження одержують шляхом інтервальних вимірювань, які реалізують інтервальні лічильники електричної енергії [16]. Інтервальні вимірювання зазвичай є однією з функцій смартлічильників (*smart meters*) – багатофункціональних електронних лічильників електричної енергії, які реалізують вимірювання / облік активної електричної енергії та інтегрованої в часі реактивної потужності (реактивної енергії) в прямому та зворотному напрямках (імпорт та експорт), зокрема, нагромаджувальним підсумком, здійснюють оброблення результатів вимірювань і визначення на їхній основі параметрів обліку електричної енергії / параметрів режимів електроспоживання, зберігають виміряні (обчислені, сформовані, зафіксовані тощо) дані в первинній базі даних (ПБД) та забезпечують доступ до ПБД цифровими комунікаційними інтерфейсами. Добовий профіль навантаження, сформований за показами смартлічильника електричної енергії, залежно від параметрування останнього може містити:

- значення активної електричної енергії (кВт·год) або інтегрованої в часі реактивної потужності (реактивної енергії, квар·год), виміряної упродовж завданих інтервалів вимірювань;
- значення активної (кВт) або реактивної (квар) потужності, усередненої упродовж завданих інтервалів вимірювань;
- покази нагромаджувальним підсумком лічильника активної енергії (кВт·год) або інтегрованої в часі реактивної потужності (реактивної енергії, квар·год), зафіксовані на границях завданих інтервалів вимірювань.

Інтервал вимірювання завдається під час параметрування смартлічильника і зазвичай вибирається з ряду: 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 або 60 хвилин.

Отримані в результаті інтервальних вимірювань значень профілів навантаження аналізуються з метою прогнозування (прококування) майбутніх профілів навантаження за результатами оброблення минулих (історичних) даних різними методами. До найпоширеніших методів прогнозування відносять метод ковзного середнього (*Simple Moving Average, SMA*), метод експоненціального згладжування (*Exponential Smoothing, SES*), метод авторегресії (*Autoregressive Integration Moving Average, ARIMA*), нейронні мережі (*Neural Network, NN*) [15]. Наприклад, в [17] досліджено результати прогнозування електроспоживання методом авторегресії, що надає можливість визначити залежність прогнозованого показника від себе ж самого в минулому – саме до цього і зводиться суть авторегресійної моделі. Тобто, цілком раціонально припустити практично для будь-якого показника, що його поточне значення певною мірою залежить від того, якого значення цей показник набував в попередній проміжок часу. Пошук такої залежності дозволяє будувати прості прогнозні моделі, за якими легко зробити прогноз. Втім, метод авторегресії дозволяє отримувати достатньо точні результати прогнозування в стабільних ситуаціях, наприклад, коли немає різких змін факторів, що чинять вплив на режими електроспоживання. Однак застосування такого підходу не дозволяє правильно спрогнозувати ситуацію в разі випадкового змінення чинників впливу [17].

У [18–20] описано методи прогнозування навантаження ЕЕС. У [18] запропоновано методику виділення з нестационарного часового ряду сумарного електричного навантаження складових, які характеризують вплив технологічних, метеорологічних і астрономічних факторів. Зокрема, методика дозволяє виділяти і оцінювати базову, трендову та залишкову складові розробленої математичної моделі. У [19] запропоновано комбіновану архітектуру штучної нейронної мережі (ШНМ) глибинного навчання для векторного прогнозування вузлових навантажень ЕЕС. У [20] ШНМ запропоновано для короткострокового прогнозування електричного навантаження електропостачальної компанії.

Втім, методи обробки часових рядів дають прийнятні результати під час прогнозування профілів навантаження ЕЕС, які утворено сотнями мільйонів струмоприймачів (агентів). Для визначення потреб в електричній енергії окремого кінцевого користувача, профіль навантаження якого визначається низкою факторів, кожний з яких чинить детермінований вплив на його електроспоживання, перевагу варто надавати радше плануванню аніж прогнозуванню. Зокрема, в [21] вжито низку заходів з метою підвищення адекватності прогнозної моделі електричного навантаження промислового підприємства:

1. З метою формування бази даних (БД) передісторії враховано запланований режим роботи підприємства наступної доби. Також, на цьому етапі, реалізовано кластеризацію із розбиттям часового ряду на 3 кластери, що дозволило скоротити час оброблення даних.

2. Враховано лінійне зростання навантаження підприємства. Після отримання інформації від підприємства про те, що воно буде плавно переходити до режиму повного завантаження, було скориговано

прогнозу модель – додано лінійний тренд. Це призвело до зменшення середньої абсолютної відсоткової помилки прогнозування (*mean absolute percentage error*, MAPE) з 16,63 % до 7,21 %.

3. Виконано кореляційний аналіз впливу режимів роботи потужних струмоприймачів на характер загального електричного навантаження підприємства. За результатами кореляційного аналізу в прогнозній моделі враховано вплив режимів роботи найпотужніших струмоприймачів підприємства, коефіцієнт кореляції для яких $r > 0,5$, що призвело до зменшення MAPE до 5,8 %.

4. Виконано сезонну декомпозицію часового ряду. За результатами сезонної декомпозиції виділено чотири компоненти: сезонну компоненту (позначається S_t , де t – момент часу), тренд (T_t), циклічну компоненту (C_t), залишкову (випадкову, нерегулярну) компоненту (I_t). З метою виявлення зв'язку навантаження підприємства з погодними умовами виконано кореляційний аналіз сформованого із залишкової компоненти нового часового ряду. За результатами аналізу побудовано регресійну модель залишкової компоненти, що дозволило врахувати вплив погодних умов на характер навантаження підприємства. Це призвело до зменшення MAPE до 5,51 %.

5. До результатів прогнозування внесено поправку у зв'язку із запланованим ремонтом електротехнічного устаткування. Також враховано інформацію щодо планової зупинки потужного струмоприймача з метою перевірки його технічного стану в період із 12.00 до 13.00 прогнозованої доби, що не було враховано у базовій моделі. Це дозволило знизити MAPE до 4,86 %.

Таким чином, шляхом послідовного врахування окремих технологічних, виробничих, режимних та зовнішніх факторів, що чинять вплив на характер режимів електроспоживання кінцевого користувача, та відповідного коригування параметрів прогнозної моделі на досліджуваному часовому ряді значень електричного навантаження середню абсолютну відсоткову помилку прогнозування зменшено більше ніж втричі: з 16,63 % до 4,86 %.

За результатами досліджень [21] зроблено такі висновки:

1. На режими електроспоживання кінцевих користувачів електричної енергії чинять вплив низка факторів, зокрема виробничого і технологічного характеру, переважна більшість яких є передбачуваними, а відтак їхній вплив можна врахувати, зокрема під час короткострокового прогнозування електричного навантаження на наступну добу шляхом коригування (уточнення) прогнозних моделей.

2. Існуючі класичні методи прогнозування базуються на виявленні тенденцій часових рядів на інтервалі передісторії і не враховують вищезазначені фактори. В результаті прогнози, що побудовано в такий спосіб, добре збігаються з фактичним електроспоживанням в разі «нормальної» поведінки об'єкту прогнозування, і різко відхиляються від загальної тенденції в разі виникнення одного чи декількох вищезазначених факторів.

3. З метою підвищення якості прогнозування необхідно, окрім часових рядів значень електричного навантаження (електроспоживання) кінцевих користувачів на інтервалі передісторії, володіти інформацією, зокрема виробничого і технологічного характеру, врахування якої під час прогнозування сприятиме підвищенню точності й достовірності прогнозних оцінок. До такої інформації належить:

- виробничі плани підприємств;
- технологічні карти виробництв;
- планові режими роботи потужних струмоприймачів;
- плани проведення ремонтних, профілактичних та інших робіт;
- інші фактори, що впливають на режими електроспоживання кінцевих користувачів електричної енергії.

4. З метою підвищення якості короткострокового прогнозування необхідно також упорядковувати і враховувати в прогнозних моделях стратегії керування поточними режимами електроспоживання кінцевих користувачів, які здійснюються, зокрема, з метою економії оплати за електричну енергію в умовах диференційованої вартості електричної енергії.

Таким чином можна стверджувати, що для ефективного керування попитом на електричну потужність (електроенергію) в лібералізованому ринку електричної енергії кваліфікованими кінцевими користувачами мають застосовуватися індивідуальні прогнозні моделі, які додатково враховують низку факторів, зокрема виробничого і технологічного характеру, що зумовлюють передбачувану поведінку цього кінцевого користувача в конкретних умовах. Крім того, для підвищення точності й достовірності прогнозних оцінок, необхідно упорядкування і планування поведінки конкретного кінцевого користувача, і врахування її під час побудови індивідуальних прогнозних моделей.

При цьому підходи до планування можуть різнитися. Зокрема, один з підходів полягає в прогнозуванні відомими методами агрегованого профілю навантаження користувача за історичними даними комерційного обліку електричної енергії з подальшим уточненням прогнозу через декомпозицію і врахування змін впливу вагомих чинників, як то прогноз погоди, обсяги виробництва та відпуску продукції, планові та позапланові ремонти тощо [21]. Інший підхід полягає у формуванні профілю навантаження користувача через агрегування профілів навантаження струмоприймачів за даними технічного обліку електричної енергії з врахуванням чинників впливу.

Якісне планування сприятиме зменшенню відхилень на БР від узгоджених режимів електроспоживання кваліфікованого кінцевого користувача. Залишкові відхилення може бути своєчасно усунуто, наприклад, управлінням споживачами-регуляторами упродовж розрахункового періоду за методом ідеальної норми [3]:

$$\begin{cases} W_i = W_i^{\text{ПЛАН}} \pm d_w & \text{якщо } (W_i^{\text{ПЛАН}} + d_w) \leq W_i^{\text{ОБМ}}; \\ W_i = (W_i^{\text{ОБМ}} - d_w) \pm d_w & \text{якщо } (W_i^{\text{ПЛАН}} + d_w) > W_i^{\text{ОБМ}} \end{cases} \quad (6)$$

де d_w – довірчий інтервал, що визначається недосконалістю управління споживачами-регуляторами, кВт·год; $W_i^{\text{ОБМ}}$ – обмеження електроспоживання, кВт·год, що відповідає доведеному користувачеві обмеженню потужності упродовж i -го розрахункового періоду.

Цільова функція управління агрегованим навантаженням БГ відповідно до застосованих обмежень набуває вигляду [3]:

$$\begin{cases} W_i^{\text{БГ}} = W_i^{\text{ПЛАН}} \pm D_w & \text{якщо } (W_i^{\text{ПЛАН}} + D_w) \leq W_i^{\text{ОБМ}}; \\ W_i^{\text{БГ}} = (W_i^{\text{ОБМ}} - D_w) \pm D_w & \text{якщо } (W_i^{\text{ПЛАН}} + D_w) > W_i^{\text{ОБМ}} \end{cases} \quad (7)$$

де $W_i^{\text{ПЛАН}}$ – сумарний плановий рівень електроспоживання усіх учасників БГ в i -му розрахунковому періоді доби постачання D , кВт·год; $D_w = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{БГ}}} d_{w_j}^2}$, – довірчий інтервал, що визначається недосконалістю управління споживачами-регуляторами БГ, кВт·год; $N_{\text{БГ}}$ – кількість користувачів електричної енергії (учасників), які входять до складу БГ; $W_i^{\text{ОБМ}}$ – обмеження електроспоживання БГ, кВт·год, що відповідає доведеному БГ обмеженню потужності упродовж i -го розрахункового періоду. Можна очікувати, що досягнення цільового значення управління $W_i^{\text{БГ}}$ балансувальною групою є імовірнішим, оскільки обмеження може бути перерозподілено всередині БГ, а відхилення різних учасників групи від узгоджених режимів електроспоживання з високою імовірністю взаємно компенсуватимуться частково або повністю. Саме останньою властивістю і користуються електропостачальники, які є природними агрегаторами і сторонами, відповідальними за баланси (СВБ) своїх клієнтів. То ж кваліфікованим користувачам електричної енергії, які здатні з високим ступенем достовірності планувати власні режими електроспоживання і розбудували продуктивний інструментарій управління попитом під час закупівлі електричної енергії у електропостачальників варто вибирати тарифні плани з відповідальністю за власні небаланси або закуповувати електричну енергію безпосередньо в ОРЕ, пропонуючи додатково ПБ, а за відповідності електроустановок користувача вимогам Кодексу системи передачі (КСП) [22] – і ДП, мінімізуючи в такий спосіб результуючу вартість закупівлі електричної енергії та підвищуючи ефективність її використання.

Висновки. Ефективне енерговикористання і мінімізація вартості електричної енергії для кваліфікованих користувачів (споживачів) вимагає якісного планування потреб в електричній потужності (електроенергії) на кожний розрахунковий період лібералізованого ринку електричної енергії (кожну годину доби), узгодження параметрів режимів електроспоживання (добових профілів навантаження) через послідовну закупівлю електричної енергії в сегментах ОРЕ відповідно до запланованих обсягів енерговикористання із наступним точним дотриманням узгоджених параметрів режимів електроспоживання через мінімізацію та управління відхиленнями упродовж операційної доби. Реалізація такого підходу має базуватися на застосуванні індивідуальних прогнозних моделей, що враховують особливості виробничих процесів та інші фактори впливу на режими електроспоживання кваліфікованих користувачів електричної енергії, в поєднанні з продуктивним інструментарієм управління попитом, інтегрованим до розвинутих систем вимірювання, обліку та управління енерговикористанням. Енергоефективну поведінку користувач також може реалізувати через закупівлю електричної енергії у електропостачальника за нижчою тарифною ставкою, розділяючи з останнім відповідальність за власні небаланси на БР, яку електропостачальник, як суб'єкт ОРЕ, несе перед ОСП. Обидва підходи до енергозабезпечення, окрім закупівлі електричної енергії користувачем за вигідною ціною, призводять до посилення дисциплінованості суб'єктів лібералізованого ринку електричної енергії, передбачуваності попиту та мінімізації відхилень від попередньо узгоджених режимів електроспоживання, що врешті решт сприятиме зменшенню використання викопного палива та зниженню шкідливого тиску на довкілля. Не готовність передбачувати використовувати електричну енергію не лише збільшує вартість її закупівлі кінцевими користувачами у електропостачальників, а й знижує ефективність її використання, призводить до збільшення втраченої нерационального використання генерувальних потужностей ОЕС України.

Список використаних джерел

1. Праховник А. В., Коцар О. В. Методологія керування режимами електроспоживання в умовах енергоринку. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір* № 29784 від 05.08.2009 р. – 16 с.
2. Коцар О. В. Новий метод неявного управління попитом на основі пропозиції доступної потужності. // *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір* № 134144 від 05.03.2025 р. – 20 с.

3. Коцар О. В., Расько Ю. О. Вдосконалення інформаційного та інструментального забезпечення управління попитом в лібералізованих ринках електричної енергії // *Технічна електродинаміка*, 2023. № 3 – С. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2023.03.068> (дата звернення 09.02.2025).
4. Коцар О. В. Розвиток АСКОЕ в умовах лібералізації ринку електричної енергії України // *Технічна електродинаміка*, 2018. – № 4 – С. 110–117. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.04.110>.
5. Коцар О. В. Smart-системи вимірювання, обліку та управління енерговикористанням // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. – № 2 – С. 20–25.
6. Правила роздрібного ринку електричної енергії. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text> (дата звернення 09.02.2025).
7. Комерційна пропозиція «Базова-А» постачальника електричної енергії ТОВ «Київські енергетичні послуги». Додаток 2 до Договору про постачання електричної енергії споживачу. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/postachannya-za-vilnimy-cinami> (дата звернення 09.02.2025).
8. Тарифи на послуги з розподілу електричної енергії. НКРЕКП. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/promislovist/tarifi-na-elektroenergiyu-dlya-nepobutovih-spozhyvachiv/tarifi-na-poslugi-z-rozpodilu-elektrichnoyi-energiyi> (дата звернення 09.02.2025).
9. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18> (дата звернення 09.02.2025).
10. Про затвердження Тимчасового порядку визначення обсягів купівлі електричної енергії на ринку електричної енергії електропостачальниками та операторами систем розподілу на перехідний період. Затв. Постановою НКРЕКП № 2118 від 28.12.2018 із змінами і доповненнями. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v2118874-18#Text> (дата звернення 09.02.2025).
11. Комерційна пропозиція «Базова-Б» постачальника електричної енергії ТОВ «Київські енергетичні послуги». Додаток 2 до Договору про постачання електричної енергії споживачу. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/postachannya-za-vilnimy-cinami> (дата звернення 09.02.2025).
12. Комерційна пропозиція «Надійна» постачальника електричної енергії ТОВ «Київські енергетичні послуги». Додаток 2 до Договору про постачання електричної енергії споживачу. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/postachannya-za-vilnimy-cinami> (дата звернення 09.02.2025).
13. Комерційна пропозиція «Надійна-А» постачальника електричної енергії ТОВ «Київські енергетичні послуги». Додаток 2 до Договору про постачання електричної енергії споживачу. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/postachannya-za-vilnimy-cinami> (дата звернення 09.02.2025).
14. Про ринок електричної енергії. Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#top> (дата звернення 15.02.2025).
15. 5 Statistical Methods For Forecasting Quantitative Time Series. URL: <https://www.bistasolutions.com/resources/blogs/5-statistical-methods-for-forecasting-quantitative-time-series/> (дата звернення 16.02.2025).
16. Кодекс комерційного обліку електричної енергії. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text> (дата звернення 16.02.2025).
17. Гарячевська І.В., Мовенко С.Ю. Розробка штучних нейронних мереж для прогнозування споживання електроенергії // *Вісник ХНТУ, Інформаційні технології*, 2018. – № 3 (66) – С. 250–259.
18. Черненко П. О., Мартинюк О. В. Декомпозиція добового графіка електричного навантаження енергосистеми та моделювання його складових під час короткострокового прогнозування // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2017. – № 6 – С. 86–94.
19. Однофакторне короткострокове прогнозування вузлових електричних навантажень енергосистеми / П. О. Черненко, В. О. Мірошник, П. В. Шиманюк // *Технічна електродинаміка*, 2020. – № 2 – С. 67–73.
20. Черненко П. О., Мірошник В. О. Короткострокове прогнозування електричного навантаження електропостачальної компанії з використанням штучної нейронної мережі глибинного навчання // *Праці ІЕД НАНУ*, 2018. – вип. 50 – С. 5–11.
21. Коцар О. В., Расько Ю. О., Галабійський П. М. Підвищення достовірності прогнозування навантаження кінцевих споживачів в РДДБР // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. – № 2 – С. 43–52.
22. Кодекс системи передачі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#top> (дата звернення 09.02.2025).

O. Kotsar¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-7958-2335

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

THE IMPROVEMENT OF PLANNING AND DEMAND-SIDE MANAGEMENT PROCESSES

The design of the liberalized electricity market is aimed at increasing the predictability of power using, which aims to improve the management processes of the integrated power system of Ukraine, improve the modes of power generation and consumption, reduce unproductive power consumption and losses in the elements of the electricity grid and increase the reliability of power supply to customers. At the same time, the achievement of this goal is largely determined by the degree of digitalization of planning and demand-side management processes. The paper examines aspects of digitalization of power planning and demand-side management processes, in particular, forecasting power using and building the potential of demand-side management by the resource of consumers-regulators. Bibl. 22.

Keywords: *aggregation, balancing group, demand-side management, energy efficiency, forecasting, load profile, planning, smart metering, smart metering system.*

References

1. Prakhovnyk A. V. and Kotsar O. V. The Methodology for Controlling Power Consumption Modes in the Electricity Market. *Copyright Certificate* No. 29784 dated 05.08.2009, 16 p. (Ukr)
2. Kotsar O.V. The New Implicit DR-method Based on the Available Capacity Proffering. *Copyright Certificate* No. 134144 dated 05.03.2025, 20 p. (Ukr)
3. Oleg Kotsar and Iurii Rasko (2023) Improvement of the Methodical and Instrumental Support for Demand-Side Management in the Liberalized Electricity Markets. *Journal of Technical Electrodynamics*, No. 3, pp. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.068> (accessed 09.02.2025). (Ukr)
4. Oleg Kotsar (2018) Smart Systems for Measurement, Metering and Energy Management in the Liberalized Electricity Market of Ukraine. *Journal of Technical Electrodynamics*, No. 4, pp. 110–117. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.110>. (Ukr)
5. Oleg Kotsar (2018) Smart Systems for Measurement, Metering and Energy Management. *Energy: economics, technology, ecology*, No. 2, pp. 20–25. (Ukr)
6. Retail Electricity Market Rules. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text> (accessed 09.02.2025). (Ukr)
7. The commercial offer “Basic-A” of the power supplier "Kyiv Energy Services" LLC. Appendix 2 to the Agreement for the consumer power supply. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/postachannya-za-vilnimy-cinami> (accessed 09.02.2025). (Ukr)
8. Tariffs for power distribution services. NEURC. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/promislovist/tarifi-na-elektroenergiyu-dlya-nepobutovih-spozhivachiv/tarifi-na-poslugi-z-rozpodilu-elektrichnoyi-energiyi> (accessed 09.02.2025). (Ukr)
9. Day-aHead and Intraday Market Rules. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18> (accessed 09.02.2025). (Ukr)
10. On approval of the temporary procedure for determining the volumes of electricity purchase in the electricity market by power suppliers and distribution system operators for the transitional period. Approved by NEURC Resolution No. 2118 dated 28.12.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v2118874-18#Text> (accessed 09.02.2025). (Ukr)
11. The commercial offer “Basic-B” of the power supplier "Kyiv Energy Services" LLC. Appendix 2 to the Agreement for the consumer power supply. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/postachannya-za-vilnimy-cinami> (дата звернення 09.02.2025). (Ukr)
12. The commercial offer “Reliable” of the power supplier "Kyiv Energy Services" LLC. Appendix 2 to the Agreement for the consumer power supply. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/postachannya-za-vilnimy-cinami> (accessed 09.02.2025). (Ukr)
13. The commercial offer “Reliable-A” of the power supplier "Kyiv Energy Services" LLC. Appendix 2 to the Agreement for the consumer power supply. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/postachannya-za-vilnimy-cinami> (дата звернення 09.02.2025). (Ukr)
14. On the Electricity Market. The Law of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#top> (accessed 15.02.2025). (Ukr)
15. The 5 Statistical Methods for Forecasting Quantitative Time Series. URL: <https://www.bistasolutions.com/resources/blogs/5-statistical-methods-for-forecasting-quantitative-time-series/> (accessed 16.02.2025).
16. Commercial Electricity Metering Codex. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text> (accessed 16.02.2025). (Ukr)
17. Hariachevska I. V. and Movenko S.Iu. (2018) Development of artificial neural networks for predicting power consumption. *KhNTU Bulletin, Information Technologies*, No. 3 (66), pp. 250–259. (Ukr)
18. Chernenko P. O. and Martyniuk O. V. (2017) Decomposition of the daily schedule of the electrical load of the power system and modeling of its components during short-term forecasting. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, No. 6, pp. 86–94. (Ukr)
19. Chernenko P. O. and Miroshnyk V. O. and Shymanik P. V. (2020) Single-factor short-term forecasting of nodal electrical loads of the power system. *Journal of Technical Electrodynamics*, No. 2, pp. 67–73. (Ukr)
20. Chernenko P. O. and Miroshnyk V. O. (2018) Short-term forecasting of the electrical load of a power utility company using a deep learning artificial neural network. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, Issue 50, pp. 5–11. (Ukr)
21. Oleg Kotsar and Iurii Rasko and Petro Halabitsky (2015) Increasing the reliability of end-user load forecasting in the BCM&BM. *Energy: economics, technology, ecology*, No. 2, pp. 43–52. (Ukr)
22. Transmission System Codex. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#top> (accessed 09.02.2025). (Ukr)

Надійшла: 27.05.2025

Received: 27.05.2025

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 628.4:662.756

DOI 10.20535/1813-5420.3.2025.339799

С.В. Бойченко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980

С.Ю. Жолтайли¹, PhD, ORCID 0000-0001-8136-8779

І.О. Шкільнюк¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8808-3570

А.В. Яковлєва¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7618-7129

Д. Д. Мугенов¹, PhD, ORCID 0000-0001-7780-3416

С.Г. Шман¹, аспірант, ORCID 0009-0006-9750-824X

А.О. Запорожець¹, д-р техн. наук, ORCID 0000-0002-0704-4116

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКОЛОГІСТИЧНА МОДЕЛЬ ЗБОРУ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЄМНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ДОДАТКОВИХ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування моделі екологічно орієнтованої логістики для ефективного збору, сортування, очищення та транспортування енергоємних відходів з подальшим їх використанням як сировини для виробництва альтернативного моторного палива.

Методика реалізації: У роботі використано системний підхід до аналізу життєвого циклу композиційного моторного палива. Розроблено структурну схему початкового етапу логістики – збору та транспортування відходів. Для оцінки потенціалу використання вторинної сировини проаналізовано характеристики пластику (окремо поліетилену), зношених шин, харчових та відходів тваринництва як джерел компонентів альтернативного пального. *Результати дослідження:* Запропоновано поетапну модель логістичного процесу, яка включає три ключові кроки: збір, сортування з очищенням та транспортування енергоємних відходів. Представлена структурна схема візуалізує взаємозв'язок між цими етапами. Доведено доцільність використання вторинної сировини для виробництва піролізного палива та біопалива, що дає змогу знизити залежність від традиційних викопних ресурсів.

Висновки: Запропонована модель екологічно орієнтованої логістики дозволяє ефективно інтегрувати енергоємні відходи у процес виробництва альтернативного палива. Її реалізація сприяє зниженню негативного впливу на довкілля, підвищенню надійності енергозабезпечення та формуванню основ для впровадження принципів циркулярної економіки в енергетичній галузі.

Дослідження виконуються у рамках проекту «Розроблення технологічних рішень отримання композиційних моторних палив із вторинної сировини для підвищення енергетичної безпеки» за рахунок державного бюджету згідно наказу Міністерства освіти і науки України №1572 від 27.12.2023 р. «Про затвердження переліку проектів фундаментальних наукових досліджень, прикладних наукових досліджень, науково-технічних (експериментальних) розробок, виконавцями яких є заклади вищої освіти та наукові установи, що належать до сфери управління Міністерства освіти і науки України, які пройшли конкурсний відбір та фінансування яких розпочнеться з 2024 року за рахунок коштів Державного бюджету України» (реєстраційний номер 0124U000973).

Ключові слова: екологістика небезпечних відходів, паливна незалежність, утилізація пластику, утилізація зношених шин, утилізація відпрацьованої олії, утилізація тваринних жирів, енергетична безпека, композиційні моторні палива.

Вступ 3 метою скорочення кількості відходів в країні, особливо за небезпечними відходами та підвищення рівня власного виробництва палива всередині країни, доцільним є використання вторинної сировини для виробництва компонентів альтернативного моторного палива. Цей підхід до використання вторинної сировини має великий потенціал, оскільки він дозволяє ефективно переробляти відходи з високою енергоємністю. До таких відходів можна віднести відходи пластикових матеріалів, зношені шини та відходи харчової промисловості. Кожен з цих типів відходів має окремі обсяги і потенціал для переробки з отриманням цінної енергетичної продукції.

Згідно із [1], щорічний обсяг відходів пластикових матеріалів в Україні становить 1444 тис. тонн/рік, з яких 520 тис. тонн/рік – поліетилен (ПЕ). Частиною цього обсягу – 838 тис. тонн/рік (у т.ч. 302 тис. тонн

ПЕ) можливо переробити в умовах, що задовольняють екологічним та енергетичним вимогам. Пластик, особливо поліетилен, має високий енергетичний потенціал і може бути перетворений у рідке паливо за допомогою процесів піролізу, та бути удосконалений за допомогою каталітичного крекінгу чи газифікації. Отримані продукти мають характеристики, схожі на легкі фракції пального, і після доочищення можуть застосовуватись у транспортній сфері.

Зношені шини представлені обсягом 255 тис. тонн на рік, з яких 102 тис. тонн/рік – потенціал отримання альтернативного палива шляхом піролізу так само як і пластик [1]. Вони містять вуглеводневі полімери, каучук, вуглець і мінеральні добавки. Зношені шини можуть бути утилізовані піролізом для отримання моторного палива.

Відходи харчової промисловості включають в себе відпрацьовані рослинні олії та тваринні жири. Обсяг відпрацьованих (використаних) рослинних олій становить 1460 тис. тонн на рік, з яких близько 1212 тис. тонн/рік. – потенціал альтернативного палива шляхом піролізу [2]. Тваринні жири представлені в загальному обсязі 80 тис. тонн/рік, з яких 60 тис. тонн/рік мають потенціал енергетичного використання [2]. Паливо, отримане з таких джерел, характеризується високою енергетичною цінністю, стабільністю при зберіганні та екологічною безпечністю при спалюванні, що робить ці відходи стратегічно важливими для переходу до стійкої енергетики в транспортному секторі.

Підсумковий потенціал енергетичної утилізації становить 1001 тис. тонн/рік. Це та кількість вторинної сировини, яка реально може бути використана для одержання альтернативного моторного палива.

Мета дослідження полягає у побудові екологістичної моделі ефективного збору, логістики та переробки енергоємних відходів для отримання додаткових паливно-енергетичних ресурсів альтернативного походження, з урахуванням життєвого циклу палива та комплексної оцінки ризиків.

Об'єктом дослідження виступають процеси збору, логістики та переробки таких енергоємних відходів, як пластик (окремо поліетилен), зношені шини, відходи харчової промисловості та тваринництва.

Предметом дослідження є екологістична модель, яка поєднує логістичні та технологічні рішення для перетворення енергоємних відходів в альтернативне моторне паливо з урахуванням ризиків на кожному етапі життєвого циклу.

Робоча гіпотеза зводиться до впровадження модернізованої екологістичної моделі збору та переробки енергоємних відходів, що дозволить підвищити обсяги виробництва альтернативного моторного палива з високим енергетичним потенціалом, та зменшити залежність від традиційних енергоресурсів і сприятиме енергетичній безпеці України.

Матеріали та результати дослідження

В якості сировини, яка може бути застосована для отримання альтернативного моторного палива, пропонується використовувати відходи пластикових матеріалів, зношені шини та відходи харчової промисловості. Для наочної демонстрації щорічного потенціалу застосування такої вторинної сировини, сформувано схему, яка відображена на рисунку 1.

В роботі [3] зазначені етапи життєвого циклу композиційного моторного палива: як традиційного, так і екологічно чистого. Інтеграція вторинної сировини в життєвий цикл композиційного моторного палива передбачає заміну традиційного видобутку нафти процесом збору та заготівлі енергоємних відходів. Замість буріння свердловин організовується ефективна система логістики: збір відпрацьованих олій, тваринних жирів, пластикових матеріалів і зношених шин із різних секторів економіки. Важливо не лише зібрати сировину, а й забезпечити її сортування, очищення від домішок і доставку до спеціалізованих підприємств. Тому, для отримання додаткових паливно-енергетичних ресурсів альтернативного походження, в життєвий цикл композиційного моторного палива пропонується впровадити такі кроки, як: збір, сортування, очищення і транспортування сировини. В комплексі ці заходи формують екологістичну модель збору та утилізації енергоємних відходів для одержання додаткових паливно-енергетичних ресурсів.

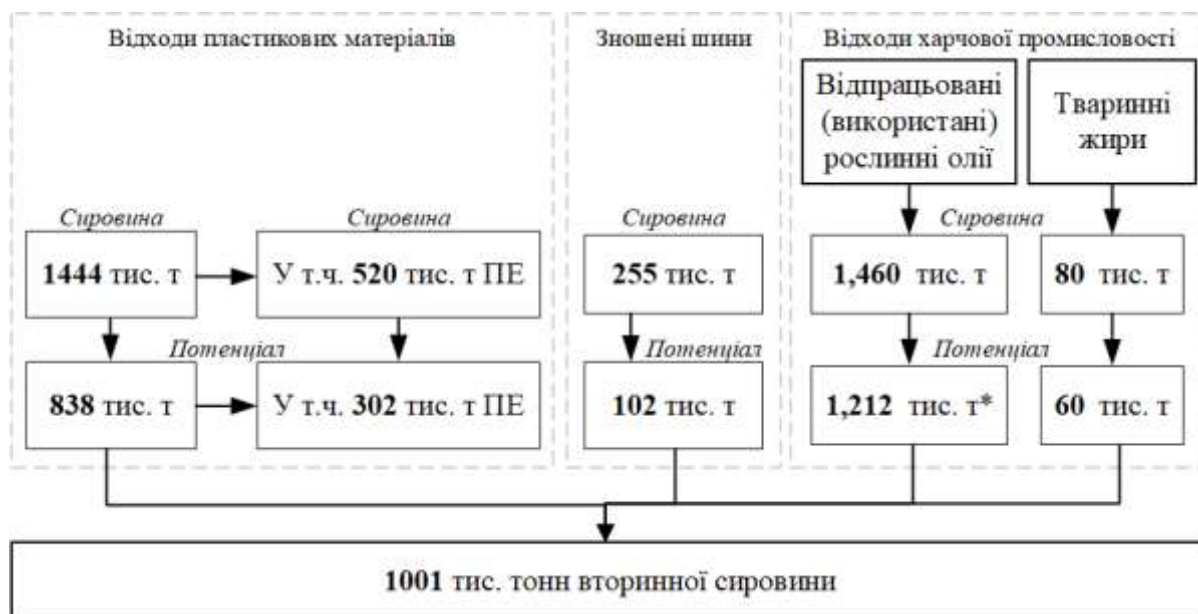
Екологістична модель збору та утилізації енергоємних відходів для одержання додаткових паливно-енергетичних ресурсів із врахуванням запропонованих кроків представлена на рисунку 2.

Розглянемо кожен крок більш детально.

Крок 1: Збір відходів

Збір пластикових відходів починається з організації окремого накопичення цього типу сировини. Пластик зазвичай збирається у великі мішки, сітчасті контейнери або пластикові баки об'ємом 240-1100 літрів [4]. Такі контейнери встановлюють у місцях масового скупчення відходів: біля житлових будинків, на підприємствах, у торгових центрах та освітніх установах. Найбільший обсяг пластикових відходів надходить із комунального сектору, закладів громадського харчування, магазинів і підприємств, що використовують пластикову упаковку. Для забезпечення регулярного збору можна укласти угоди з компаніями, що мають ліцензії на обробку та вивезення відходів, або ж організувати закупівлю вторинного пластику у сортувальних станцій, які вже проводять попереднє розділення сміття. Часто збором пластикових відходів займаються приватні підприємства, а організація такого процесу може

здійснюватись через оголошення тендерів або публічні закупівлі послуг із сортування, транспортування та обробки вторинної сировини.



*Якщо взяти до уваги обсяги вироблення соняшникової олії 6,1 млн тонн та припустити, що лише 10 частина використовується як фритюрна олія та стає непридатною для подальшого використання, тобто 610 тис. тон, то очікуваний річний потенціал отримання альтернативного палива (або його компонентів) складе 506,3 тис. тонн/рік [2]

Рисунок 1 – Потенціал отримання компонентів альтернативного моторного палива з пластику (окремо поліетилену), зношених шин, відходів харчової промисловості та тваринництва

Зношені шини збираються переважно у спеціальні металеві контейнери або ж укладаються у штабелі на промислових майданчиках. Основними джерелами цих відходів є СТО, шиномонтажі, автопарки комунальних служб, транспортні підприємства та звичайні громадяни. Законодавство вимагає, щоб юридичні особи самостійно забезпечували утилізацію шин, тож частину обсягів можна викупити або отримати на умовах безкоштовного вивезення у підприємств, які не мають власних договорів на утилізацію. Для цього створюються спеціальні мобільні пункти збору або укладаються довгострокові договори з місцевими операторами відходів. Органи місцевого самоврядування можуть оголошувати тендери на збирання та переробку шин, залучаючи ліцензовані компанії до цього процесу [5].

Відпрацьовані рослинні олії та тваринні жири збираються у герметичні пластикові або металеві бочки об'ємом від 20 до 200 літрів [6] Такі відходи утворюються переважно в закладах громадського харчування, харчових підприємствах, ресторанах, їдальнях, м'ясокомбінатах і молокозаводах. Власники таких закладів зазвичай зацікавлені у належній утилізації відпрацьованої олії, оскільки це передбачено санітарними та екологічними нормами. Часто ці жири й олії утилізуються безкоштовно, або навіть із додатковою платою підприємствам за передачу. Для організації збору укладаються договори з постачальниками сировини, а також проводяться переговори з великими мережами закладів харчування, які регулярно утворюють значні обсяги цієї вторинної сировини. У промислових масштабах такий збір організовується через укладення договорів або участь у тендерах на збір і транспортування харчових відходів, що містять жири та олії.

Отже, організація збору енергоємних відходів потребує системного підходу, який включає не лише інфраструктуру, що включає контейнери, баки, транспорт тощо, а й налагодження юридичних і господарських відносин з постачальниками відходів. Використання механізмів тендерів, довгострокових угод, партнерств із бізнесом і комунальними службами дозволяє забезпечити стабільні обсяги сировини для подальшої енергетичної утилізації.

Крок 2: Сортування і очищення

Сортування *пластикових відходів* зазвичай виконується на спеціалізованих сортувальних лініях, які входять до складу підприємств із переробки твердих побутових відходів або окремих центрів з обробки вторинної сировини. Сортування здійснюється за видом пластику (ПЕТ, ПЕ, ПП, ПВХ та інші), кольором, ступенем забруднення та можливістю подальшої переробки. Для цього використовуються ручні конвеєрні лінії, де оператори в захисному одязі вручну відбирають придатний до переробки пластик, а також автоматичні сепаратори – оптичні, інфрачервоні або повітряні [7]. Важливою частиною процесу є

подрібнення у шредерах або дробарках, після чого подрібнений пластик миється та сушиться. Деякі підприємства поєднують сортування й очищення в єдиний цикл – після сортування фракції автоматично подаються в мийні модулі, що дозволяє значно знизити витрати на логістику та зберігання. В Україні вже працюють приватні компанії, такі як "Укреко-Індастрі" [8], "Київміськвторресурси" [9], а також сортувальні станції при полігонах. Домовитись про співпрацю можна через комерційну пропозицію або довгостроковий договір, а у випадку з муніципальними установами – через участь у відкритих конкурсах або публічних закупівлях.

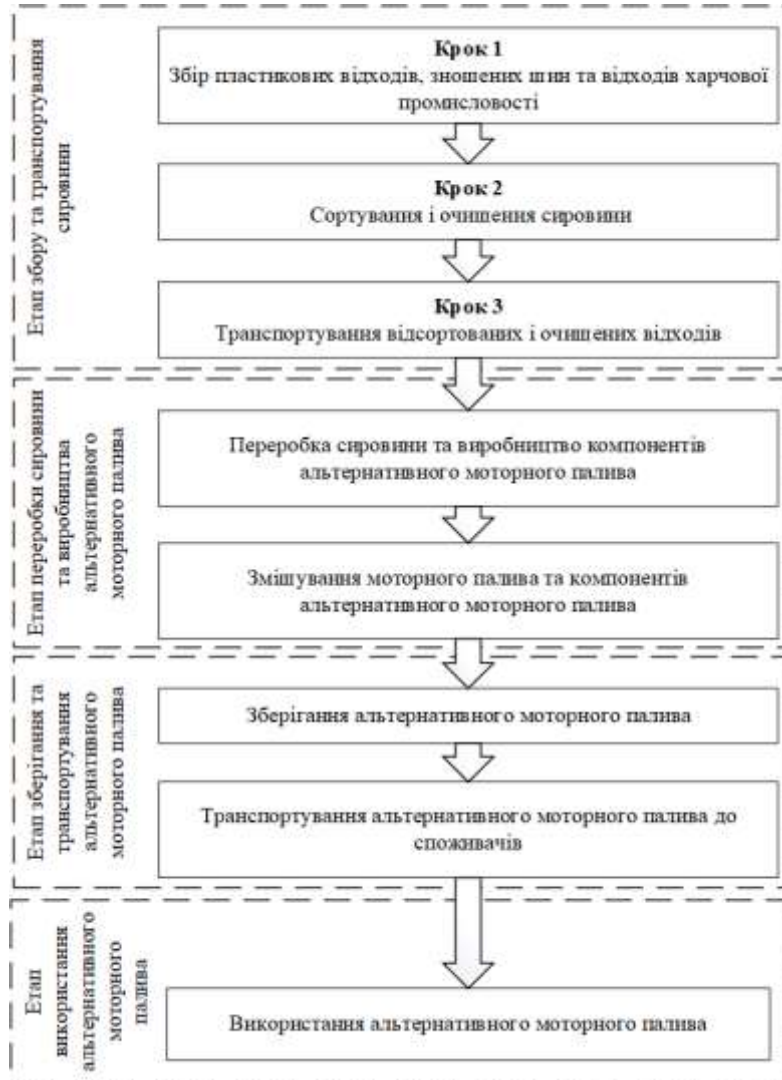


Рисунок 2 – Екологістична модель збору та утилізації енергоємних відходів із врахуванням збору, сортування, очищення і транспортування вторинної сировини

Сортування зношених шин зазвичай простіше за пластик, оскільки їх класифікація базується переважно на розмірах, ступені зносу та наявності домішок. Шини не сортують вручну на конвеєрі, а приймають як цілі об'єкти. Після первинного візуального контролю вони подаються в подрібнювачі – гідравлічні преси або роторні шредери, де розрізаються на фрагменти. В окремих випадках із шин попередньо видаляються сталеві корди за допомогою магнітних сепараторів. Після подрібнення, сировина може бути відразу спрямована на піроліз або зберігатися у спеціальних контейнерах. Підприємства, які займаються утилізацією шин, як правило, поєднують процеси сортування, подрібнення та часткового очищення у єдиній виробничій лінії. В Україні такі підприємства діють у Київській [10], Дніпропетровській областях [11] та місті Києві. Організувати співпрацю із такими підприємствами можна напряму, укладаючи договори про прийом або закупівлю сировини, або через спільні проекти з муніципалітетами.

Сортування відходів харчової промисловості, таких як відпрацьовані олії та тваринні жири, починається вже на етапі збору. Основне завдання – відокремити олії від інших кухонних відходів та механічних домішок [12]. Виробничі підприємства та заклади харчування зазвичай накопичують ці

відходи в окремі бочки, тому первинне сортування часто не потрібне. Проте після надходження на підприємство, сировина проходить контроль якості: перевіряють наявність домішок, вологи, кислотності та ступеня окиснення. Сировина, що відповідає технічним умовам, подається в установки для очищення. Тут сортування за типом (рослинні або тваринні) поєднується з фільтрацією, осадженням, центрифугуванням і, за потреби, нейтралізацією кислоти. Ці процеси часто об'єднані в замкнуту технологічну лінію. Підприємства, що спеціалізуються на переробці жирових відходів, виробляють біопаливо або компоненти для нього. Співпраця можлива через комерційні домовленості, постачання сировини на договірній основі або спільне створення інфраструктури збору й очищення.

Таким чином, в більшості випадків вже існують технічні рішення, обладнання і фахівці, які дозволяють інтегрувати цей етап у загальний процес переробки. Поєднання сортування й очищення в рамках єдиної лінії значно підвищує ефективність підготовки сировини до енергетичної утилізації. Співпраця з підприємствами у цій сфері є реальною за наявності чіткої моделі взаємодії, прозорих умов і узгодженого економічного інтересу.

Крок 3 Транспортування відсортованих і очищених відходів

Транспортування сировини після етапу збору й сортування є важливою складовою логістичного ланцюга, який забезпечує безперервність виробництва альтернативного моторного палива. Кожен тип відходів має свої особливості, що впливають на вибір транспортних засобів, типів тари та вимог до безпеки.

Пластикові відходи, особливо у вигляді подрібнених фрагментів, транспортуються у великих мішках або в полімерних контейнерах. Якщо матеріал подрібнений на дрібні гранули, їх перевозять у герметичних мішках або цистернах із сухим завантаженням, щоб уникнути розсипання. У разі транспортування непомилого або брудного пластику з високим вмістом органіки, можливе виділення неприємного запаху, що потребує швидкої доставки або ізоляції в герметичну тару. З екологічної точки зору, пластик не вважається отруйним, але при його нагріванні чи руйнуванні можуть виділятися шкідливі леткі речовини, такі як бензол, толуол, стирен, альдегіди, кетони і інші [13]. Тому працівники, які контактують із вантажем, мають використовувати рукавички, респіратори та захисний одяг, особливо під час навантаження вручну. Транспортування відбувається переважно автотранспортом – вантажівками з відкритим або закритим кузовом, залежно від погоди й виду тари.

Зношені шини зазвичай транспортуються подрібненими. Подрібнені шини переважно перевозять у мішках, контейнерах або в бункерах, якщо транспорт має завантажувальне обладнання. Через те, що гума може мати залишки мастил, пилу, важких металів або інших домішок, вважається, що вона має помірний рівень екологічної небезпеки [14]. Особливо це стосується транспортування влітку, коли підвищується ризик самонагрівання. Завантаження і розвантаження шин потребує механізації – автонавантажувачів, стрічкових конвеєрів або кранів. Часто використовуються вантажівки типу "мультиліфт" або великогабаритні контейнери, які можуть перевантажуватися на спеціалізованих майданчиках переробного заводу.

Відпрацьовані рослинні олії та тваринні жири транспортуються у герметичних металевих або полімерних бочках, а у промислових обсягах – у спеціальних ізотермічних цистернах. Ці рідини мають підвищену пожежонебезпеку, а також швидко окислюються і псуються при контакті з повітрям та високими температурами. Через це транспортування повинно бути швидким, контрольованим за температурою, а також виключати протікання. У разі порушення герметичності є ризик забруднення ґрунту, води і створення місць гниття, що призводить до утворення шкідливих випарів. Найчастіше транспортування організовується автоцистернами з термоізоляцією або бочками, встановленими на палетах, що дозволяє переміщати сировину навантажувачем.

Усі типи відходів повинні супроводжуватись відповідною документацією – товарно-транспортними накладними, сертифікатами походження та, за потреби, екологічними дозволами [15]. Транспортні засоби мають бути очищені після кожного перевезення, особливо у випадках, коли змінюється тип вантажу. У разі міжобласного перевезення або експорту можуть знадобитися додаткові дозволи відповідно до екологічного законодавства.

Особливу увагу варто приділяти координації логістики. Заводи, що виробляють екологічно чисте паливо, зазвичай працюють за чіткими графіками постачання, щоб забезпечити стабільне завантаження ліній. Будь-які затримки або порушення графіку можуть призвести до збоїв у переробці, псування сировини або перевищення складських можливостей. Тому логістичні процеси варто організовувати у встановлені строки або через створення буферних складів-сателітів, розташованих неподалік від заводу.

Етап транспортування відходів до переробного заводу потребує урахування фізико-хімічних властивостей сировини, її ризиків для довкілля та здоров'я людей, а також ефективної організації маршрутів, тари і взаємодії з перевізниками.

На рисунку 3 зображено структурну схему ефективного збору, логістики та переробки енергоємних відходів.

Екологістична модель містить також такі етапи, як переробка, зберігання та використання моторного палива (рис. 2). На етапі переробки відходи трансформуються в енергетично цінні компоненти. З пластиків та шин отримують піролізне паливо, яке після гідроочищення наближається за характеристиками до традиційного пального. Рослинні олії та тваринні жири проходять хімічну обробку і перетворюються на біопаливо. Ці процеси мають бути енергоефективними, із мінімальними викидами і можливістю повторного використання тепла та побічних продуктів.

Після переробки паливо зберігають у спеціально обладнаних резервуарах, які забезпечують необхідні умови для збереження його якості. Композиційне моторне паливо особливо чутливе до впливу навколишнього середовища, тому для нього важливо уникати окислення, розшарування та змін фізико-хімічних властивостей. Для цього підтримують стабільну температуру, забезпечують герметичність резервуарів, а також використовують спеціальні стабілізатори, які допомагають зберегти склад палива незмінним протягом тривалого часу. Такий контроль дозволяє зберігати паливо без втрати його ефективності і безпечно використовувати у подальшому. Далі паливо доставляють до заправних станцій або безпосередньо до кінцевих споживачів. Частина існуючої інфраструктури може бути використана для цього процесу, проте в окремих випадках доведеться будувати нові системи або модернізувати вже наявні, щоб вони відповідали вимогам нового виду палива. На цьому етапі особливо важливо забезпечити безпеку транспортування, уникнути витоків і зберегти якість палива, щоб воно не втрачало своїх властивостей під час перевезення та зберігання.

Завершальним етапом життєвого циклу є використання палива. Композиційне моторне паливо може застосовуватися як добавка до традиційного пального або як самостійний вид палива, залежно від типу двигуна та відповідної сертифікації. Використання такого палива допомагає зменшити викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин, що позитивно впливає на стан атмосфери і знижує екологічне навантаження. Таким чином, повне включення вторинної сировини у виробництво палива сприяє заміні викопних джерел енергії на більш сталу і дружню до довкілля альтернативу.



Рисунок 3 – Структурна схема етапу збору та транспортування сировини

Висновки

Розроблено екологістичну модель, яка враховує етапи збору, сортування та очищення сировини для виробництва альтернативного моторного палива. Розглянуто можливості одержання компонентів альтернативного моторного палива з енергоємних відходів, зокрема пластику (окремо поліетилену), зношених шин, а також залишків харчової промисловості та тваринництва. Запропонована екологістична модель збору та утилізації враховує усі основні етапи поводження з вторинною сировиною – від збору й сортування до очищення та транспортування. У межах моделі деталізовано три ключові кроки початкового етапу: збір відходів, сортування й очищення, що дозволяє оптимізувати логістику та підвищити ефективність переробки. Представлена структурна схема наочно відображає послідовність і взаємозв'язок процесів на цьому етапі. Отримані результати сприяють подальшому розвитку моделі життєвого циклу композиційного моторного палива та демонструють її потенціал у заміщенні традиційних викопних ресурсів сталими енергетичними альтернативами. Дана модель дозволяє виробити стратегію розвитку налагодження екологістики збору та утилізації небезпечних відходів, зокрема, пластикових відходів, відходів зношених шин, відходів відпрацьованої рослинної олії та тваринних жирів в Україні, що особливо важливо для зменшення відходоємності країни та збільшення обсягу виробництва власного палива, наслідком чого є енергетична безпека країни.

Список використаних джерел

1. Бойченко С., Жолтайли С., Шкільнюк І., Куберський І., Левандовський І. Аналіз потенціалу отримання композиційного моторного палива з відходів пластику та поліетилену та відходів зношених шин в Україні // Системні дослідження в енергетиці. 2024. № 4 (80). С. 41–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.041>.
2. Бойченко С.В., Докшина С.Ю., Шкільнюк І.О., Яковлева А.В., Зубенко С.О. Обґрунтування потенціалу отримання композиційного моторного палива з відходів виробництва рослинних олій та тваринництва // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 3. С. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2024.314631>.
3. Yakovlieva A., Kurdel P., Ceskovic M., Gecejova N. Risks determination during the life-cycle of conventional and sustainable aviation fuels – the environmental aspect. 2022 *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/NTAD57912.2022.10013613.
4. ДСТУ EN 840-2:2022. Контейнери на колісатках для збору твердих відходів. Частина 2. Технічні вимоги і методи випробування для контейнерів об'ємом до 1300 л з двома колесами. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.
5. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2022. № 41. Ст. 344.
6. Олія для біопалива. *EcoEst*: веб-сайт. URL: <https://ecoest.com.ua/oliya.php> (дата звернення: 28.06.2025).
7. Längle T., Maier G. Sensor-Based Sorting for Waste Plastics Recycling // Buettner A., Weidner E. (eds.) *Springer Handbook of Circular Plastics Economy*. Cham: Springer, 2025. P. 243–260. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-66209-6_18.
8. Укреко // Офіційний сайт: веб-сайт. URL: <https://ukreko.com.ua/uk/> (дата звернення: 28.06.2025).
9. Інститут соціальної та політичної психології НАПН України. Проекти: веб-сайт. URL: <https://ispn.kyivcity.gov.ua/FullInfo/1216> (дата звернення: 28.06.2025).
10. MOBIUS – центр утилізації шин: веб-сайт. URL: <http://www.mobius.ua> (дата звернення: 28.06.2025).
11. Nika Oil – біопаливо з олій: веб-сайт. URL: <https://www.nika-oil.com> (дата звернення: 28.06.2025).
12. Kosma I., Kalogianni A. Residual lipids pretreatment towards renewable fuels. *Book of Abstracts – 29th European Biomass Conference and Exhibition*. 2021. P. 512–516. URL: https://www.researchgate.net/publication/390824228_Residual_Lipids_Pretreatment_Towards_Renewable_Fuels (дата звернення: 28.06.2025).
13. Beel G., Langford B., Carslaw N., Shaw D., Cowan N. Temperature driven variations in VOC emissions from plastic products and their fate indoors: A chamber experiment and modelling study. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 882. Article 163497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163497>.
14. Gomes F.O., Rocha M.R., Alves A., Ratola N. A review of potentially harmful chemicals in crumb rubber used in synthetic football pitches. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 414. Article 124998. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124998>.
15. Гринько І.В., Левченко В.П. Управління відходами: теорія, практика, екологічна безпека. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2018. 332 с.

S. Boichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

S. Zholtaily¹, PhD, ORCID 0000-0001-8136-8779

I. Shkilniuk¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8808-3570

A. Yakovlieva¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-7618-7129

D. Muhenov¹, PhD, ORCID 0000-0001-7780-3416

S. Shman¹, Ph. D. student, ORCID 0009-0006-9750-824X

A. Zaporozhets¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-0704-4116

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ECOLOGICAL MODEL OF COLLECTION AND DISPOSAL OF ENERGY-INTENSIVE WASTE TO OBTAIN ADDITIONAL FUEL AND ENERGY RESOURCES.

Objective of the study is to develop and substantiate a model of environmentally oriented logistics for the efficient collection, sorting, cleaning, and transportation of energy-intensive waste with their subsequent use as raw materials for the production of alternative motor fuels. **Methodology:** The study employs a systems approach to analyze the life cycle of composite motor fuel. A structural scheme for the initial stage of logistics - waste collection and transportation has been developed. To assess the potential use of secondary raw materials, the characteristics of plastics (and separately polyethylene), worn tires, food, and livestock waste as sources of alternative fuel components were analyzed. **Research results:** A phased model of the logistics process is proposed, including three key steps: collection, sorting with cleaning, and transportation of energy-intensive waste. The presented structural scheme visualizes the interrelationship between these stages. The feasibility of using secondary raw materials for the production of pyrolysis oil and biofuel has been demonstrated, enabling a reduction in dependence on traditional fossil resources. **Conclusions:** The proposed model of environmentally oriented logistics enables effective integration of energy-intensive waste into the alternative fuel production process. Its implementation contributes to reducing negative environmental impacts, enhancing energy supply reliability, and laying the foundation for the introduction of circular economy principles in the energy sector.

The research is carried out within the framework of the project “Development of technological solutions for obtaining composite motor fuels from secondary raw materials to enhance energy security” funded by the state budget in accordance with the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 1572 dated 27.12.2023 “On approval of the list of fundamental scientific research projects, applied scientific research, scientific and technical (experimental) developments, whose performers are higher education institutions and scientific institutions under the Ministry of Education and Science of Ukraine, which passed competitive selection and whose funding will start in 2024 from the State Budget of Ukraine” (registration number 0124U000973).

Keywords: environmental logistics of hazardous waste, fuel independence, plastic recycling, used tire recycling, waste oil recycling, animal fat recycling, energy security, composite motor fuels.

References

1. S. Boichenko, S. Zholtaily, I. Shkilniuk, I. Kuberskyi, and I. Levandovskyi. (2024). Analysis of the potential for obtaining composite motor fuel from plastic, polyethylene and used tire waste in Ukraine. *System Research in Energy*, no. 4(80), pp. 41–55. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.041>.
2. S. V. Boichenko, S. Yu. Dokshyna, I. O. Shkilniuk, A. V. Yakovlieva, and S. O. Zubenko. (2024). Substantiation of the potential for obtaining composite motor fuel from vegetable oil and livestock waste. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*. no. 3, pp. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2024.314631>.
3. A. Yakovlieva, P. Kurdel, M. Ceskovic, and N. Gecejova. Risks determination during the life-cycle of conventional and sustainable aviation fuels – the environmental aspect. *Proc. 2022 IEEE Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2022. pp. 1–6. DOI: 10.1109/NTAD57912.2022.10013613.
4. DSTU EN 840-2:2022. Wheeled containers for the collection of solid waste - Part 2: Technical requirements and test methods for containers up to 1300 l with two wheels. Kyiv: DP “UkrNDNC”. 2022. [in Ukrainian].
5. Law of Ukraine “On Waste Management” dated 20.06.2022 No. 2320-IX. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, no. 41, art. 344, 2022. [in Ukrainian].
6. Biofuel oil EcoEst. [Online]. Available: <https://ecoest.com.ua/oliya.php>. Accessed on: Jun. 28, 2025
7. Längle, T., Maier, G. (2025). Sensor-Based Sorting for Waste Plastics Recycling. In: Buettner, A., Weidner, E. (eds) Springer Handbook of Circular Plastics Economy. Springer Handbooks. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66209-6_18.

8. “Ukreko,” Ofitsiynyi sait. [Online]. Available: <https://ukreko.com.ua/uk/>. [in Ukrainian]. Accessed: Jun. 28, 2025
9. “Proiekty,” Instytut sotsialnoi ta politychnoi psykholohii NAPN Ukrainy. [Online]. Available: <https://ispn.kyivcity.gov.ua/FullInfo/1216>. [in Ukrainian]. Accessed on: Jun. 28, 2025
10. “MOBIUS – tsentr utylizatsii shyn.” [Online]. Available: <http://www.mobius.ua>. [in Ukrainian]. Accessed on: Jun. 28, 2025
11. “Nika Oil – biopalyvo z olii.” [Online]. Available: <https://www.nika-oil.com>. [in Ukrainian]. Accessed on: Jun. 28, 2025
12. I. Kosma and A. Kalogianni. Residual lipids pretreatment towards renewable fuels. in *Book of Abstracts – 29th European Biomass Conference and Exhibition*. 2021. pp. 512–516. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/390824228_Residual_Lipids_Pretreatment_Towards_Renewable_Fuels. Accessed on: Jun. 28, 2025
13. G. Beel, B. Langford, N. Carslaw, D. Shaw, and N. Cowan. Temperature driven variations in VOC emissions from plastic products and their fate indoors: A chamber experiment and modelling study. *Sci. Total Environ.* vol. 882, art. no. 163497, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163497>.
14. F. O. Gomes, M. R. Rocha, A. Alves, and N. Ratola, “A review of potentially harmful chemicals in crumb rubber used in synthetic football pitches. *J. Hazard. Mater.* vol. 414. art. no. 124998, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124998>.
15. I. V. Hryenko and V. P. Levchenko. Waste management: theory, practice, environmental safety. Kyiv: Kondor. 2018. 332 p. [in Ukrainian].

Надійшла: 04.07.2025
Received: 04.07.2025

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ ТА АУДИТ

ENERGY MANAGEMENT AND AUDIT

УДК 620.9:005.8:378.147

DOI 10.20535/1813-5420.3.2025.342447

А.В. Чернявський¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2858-8224

О.В. Бориченко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945

В.Ф. Находов¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-7643-5965

К.А. Чернявський¹, студент, ORCID 0009-0006-7523-4102

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ ФОРМАТІВ НАВЧАННЯ ДЛЯ РОЗВИТКУ SOFT SKILLS ЕНЕРГОМЕНЕДЖЕРІВ ТА ЕНЕРГОАУДИТОРІВ

У статті розглянуто можливість застосування гібридних форматів навчання для розвитку soft skills енергоменеджерів та енергоаудиторів. Підкреслено зростаюче значення поведінкових компетентностей - комунікації, лідерства, командної взаємодії та стратегічного мислення - у процесі впровадження енергоефективних рішень. Доведено, що поєднання онлайн- та офлайн-компонентів створює ефективну модель навчання, яка забезпечує як засвоєння технічних знань, так і формування міжособистісних навичок. Методологічною основою є аналітичне порівняння освітніх форматів, розроблення структури курсу, що поєднує онлайн-, офлайн- та інтегровані інструменти, включно з кейс-методом, проектною діяльністю, рольовими іграми. Окреслено типові труднощі впровадження гібридних форматів і запропоновано шляхи їх подолання шляхом інтеграції цифрових платформ, фасилітації та системи менторського супроводу. Результати дослідження підтверджують доцільність використання гібридного підходу в підготовці та підвищенні кваліфікації енергоменеджерів та енергоаудиторів, оскільки він поєднує гнучкість дистанційного навчання з практичною орієнтованістю очних занять.

Ключові слова: *гібридне навчання, енергоаудитор, енергоменеджер, менторство, професійна підготовка, soft skills.*

Вступ

Сучасна енергетична політика Європейського Союзу, зокрема положення Директиви (EU) 2023/1791 про енергоефективність [1], визначає нову парадигму сталого розвитку, у якій підвищення енергоефективності розглядається як ключовий інструмент досягнення кліматичної нейтральності та енергетичної безпеки.

Результати міжнародних досліджень [2-8] показали, що у міру посилення регуляторних вимог та акценту на декарбонізацію, впровадження системи енергетичного менеджменту на базі ISO 50001 [9, 10] та проведення енергоаудиту у відповідності до вимог ISO 50002 [11, 12] дедалі активніше інтегруються у корпоративні стратегії як інструменти підвищення конкурентоспроможності, зменшення витрат та виконання кліматичних зобов'язань. В той же час роль енергоменеджерів і енергоаудиторів перетворюється на визначальний чинник успішної реалізації цих стратегій. Вони стають центральними учасниками процесів розроблення, впровадження та моніторингу заходів з підвищення енергоефективності, що інтегрують технічні, економічні й організаційні аспекти. Це вимагає якісно нових підходів до професійної підготовки та підвищення кваліфікації фахівців, здатних діяти як технічні консультанти, модератори між різними групами зацікавлених сторін і лідери процесів трансформації. Висока складність сучасних викликів вимагає не лише фахових технічних знань, а й розвинених soft skills - навичок комунікації, лідерства, управління змінами, критичного мислення та міждисциплінарної взаємодії.

Водночас реалії сьогодення в Україні накладають додаткові обмеження на організацію традиційного навчання. Повномасштабна війна, загроза ракетних обстрілів, перебої з електропостачанням, ризики пересування між регіонами та нестача часу у фахівців, які поєднують навчання з основною роботою, суттєво ускладнюють участь у тривалих очних курсах підвищення кваліфікації. Багато підприємств і муніципалітетів не можуть відпускати своїх енергоменеджерів або технічних працівників на стаціонарне навчання, оскільки кадровий дефіцит у галузі є критичним. До цього додаються фінансові та логістичні бар'єри, що обмежують мобільність слухачів.

За таких умов гібридні та дистанційні формати навчання стають не просто зручним інструментом, а єдино можливим шляхом забезпечення безперервного професійного розвитку. Вони дозволяють поєднувати роботу та навчання, зберігати безпеку учасників, мінімізувати витрати часу й ресурсів, а також інтегрувати сучасні цифрові технології у процес підготовки фахівців [13-17]. Саме гібридна модель забезпечує оптимальний баланс між гнучкістю онлайн-освіти та практичною цінністю очних занять, створюючи умови для цілісного розвитку технічних і поведінкових компетентностей.

Таким чином, актуальність дослідження визначається необхідністю адаптації системи професійної освіти у сфері енергоефективності до нових викликів - як європейських нормативних, так і національних соціально-економічних. Гібридні освітні моделі [13-17], орієнтовані на розвиток soft skills у поєднанні з технічною підготовкою, стають ключовим інструментом формування професійної спроможності енергоменеджерів та енергоаудиторів у контексті післявоєнного відновлення та зеленого енергетичного переходу України [18].

Мета та задачі дослідження. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні доцільності та розробленні концептуальної моделі гібридного навчання для розвитку soft skills енергоменеджерів та енергоаудиторів у контексті сучасних викликів енергетичної політики ЄС та соціально-економічних обмежень воєнного часу в Україні.

Для досягнення мети дослідження були поставлені такі задачі:

1. Визначити роль і значення soft skills у професійній діяльності енергоменеджерів та енергоаудиторів, підкресливши їхню важливість у комунікації, управлінні змінами, прийнятті рішень та взаємодії зі стейкхолдерами.

2. Проаналізувати сучасні підходи до організації освітнього процесу в контексті традиційних, дистанційних та гібридних форматів навчання, з особливим акцентом на їхній вплив на розвиток поведінкових компетентностей.

3. Узагальнити досвід міжнародних та національних освітніх програм, що застосовують гібридні формати для розвитку як технічних, так і soft skills.

4. Виявити сильні та слабкі сторони гібридних форматів навчання у порівнянні з іншими освітніми підходами, а також окреслити чинники, що впливають на їхню ефективність.

5. Сформулювати рекомендації щодо удосконалення навчальних програм для енергоменеджерів та енергоаудиторів, які поєднували б розвиток технічних компетенцій з формуванням ключових soft skills.

Виконання зазначених завдань дозволить отримати цілісне бачення потенціалу гібридних форматів навчання у підготовці сучасних енергоменеджерів та енергоаудиторів та сприятиме підвищенню якості професійної освіти в цій сфері.

Матеріал і результати досліджень

Об'єктом дослідження є процес професійної підготовки та підвищення кваліфікації енергоменеджерів і енергоаудиторів у сучасних освітніх системах.

Предметом дослідження виступають методи, інструменти та організаційні підходи застосування гібридних форматів навчання, що сприяють розвитку soft skills (комунікаційних, управлінських, аналітичних та лідерських компетентностей), які забезпечують успішну професійну діяльність фахівців у сфері енергоменеджменту та енергоаудиту.

Таким чином, дослідження зосереджується не стільки на технічній складовій освітнього процесу, скільки на аналізі ефективності гібридних форматів як інструменту формування критично важливих soft skills, що доповнюють і підсилюють традиційні професійні компетентності.

Слід зазначити, що на момент проведення дослідження в Україні вже існують затверджені професійні стандарти для таких професій як «Енергетичний аудитор будівель» [19], «Енергетичний аудитор процесів» [20], «Енергетичний аудитор транспорту» [21] та «Професіонал з енергетичного менеджменту» [22]. Всі професійні кваліфікації відповідають 7 рівню Національної рамки кваліфікацій. Цими професійними стандартами визначено основні знання, вміння та навички, якими має володіти фахівець відповідної професії. Серед них особливе місце в професійній кваліфікації приділено розвитку soft skills.

У професійній діяльності енергоменеджерів та енергоаудиторів традиційно ключовими вважаються технічні знання та вміння: розрахунок втрат та споживання енергоресурсів, складання енергетичних балансів, проведення вимірювань, ідентифікація заходів з енергоефективності з врахуванням вимог стандартів ISO та ДСТУ. Проте досвід практичного впровадження систем енергоменеджменту і проведення енергоаудитів показує, що навіть високий рівень технічної підготовки не гарантує успіху без належного рівня розвитку soft skills. Для енергоменеджера чи енергоаудитора soft skills - це компетентності, що забезпечують ефективну комунікацію, здатність переконувати, навички управління змінами та міждисциплінарну взаємодію. Вони дозволяють перетворювати технічні дані та аналітичні висновки на зрозумілі рекомендації, здатні бути прийнятими керівництвом підприємств, органами влади чи інвесторами.

До таких soft skills можуть бути віднесені:

1. Комунікаційні навички

- вміння презентувати результати енергоаудиту у доступній формі;
- здатність вести переговори з різними групами стейкхолдерів (дирекція підприємств, технічний персонал, міжнародні донори);
- навички активного слухання і постановки уточнювальних питань.

2. Навички роботи з командами та лідерство

- організація роботи міждисциплінарних команд (інженери, економісти, юристи, IT-фахівці);
- фасилітація колективних обговорень і мозкових штурмів у сфері енергоефективності;
- лідерство у процесі впровадження систем енергоменеджменту.

3. Аналітико-критичні компетентності

- здатність системно оцінювати складні енергетичні процеси;
- критичне осмислення даних про енергетичні процеси та перевірка їх достовірності;
- креативність у пошуку енергоефективних рішень у умовах обмежених ресурсів.

4. Управлінські та організаційні навички

- планування і тайм-менеджмент при виконанні енергоаудитів;
- управління змінами та подолання опору персоналу під час впровадження енергоефективних рішень;
- здатність формувати дорожні карти та плани дій у сфері енергоефективності.

5. Міжкультурні та етичні компетентності

- здатність працювати у міжнародних проектах та комунікувати англійською мовою;
- толерантність до культурних відмінностей у підходах до енергоефективності;
- дотримання принципів професійної етики та незалежності під час проведення енергоаудиту.

Разом ці навички, в поєднанні з технічними рішеннями, створюють умови для успішної реалізації проектів з енергоефективності.

Розвиток soft skills у майбутніх та діючих енергоменеджерів і енергоаудиторів значною мірою залежить від обраного формату освітнього процесу. Технічні знання можна ефективно передавати через лекції, підручники чи дистанційні модулі, проте формування компетентностей, що перелічені вище, вимагає специфічного освітнього середовища та форм взаємодії. На практиці для формування soft skills енергоменеджерів і енергоаудиторів можуть застосовуватися такі формати навчання (див. табл.1):

1. *традиційний (очний) формат навчання* - навчальний процес відбувається у фізичному просторі (аудиторії, семінари, тренінги) з безпосередньою участю викладача та слухачів;

2. *дистанційний (онлайн) формат навчання* - освітній процес здійснюється за допомогою цифрових платформ і технологій (Zoom, Moodle, Teams, інтерактивні тренажери) без фізичної присутності викладача та слухачів в аудиторії;

3. *гібридний (змішаний) формат навчання* - частина занять у аудиторії або на виробничому майданчику, частина - онлайн; інтеграція цифрових ресурсів із живою взаємодією.

Таблиця 1 - Порівняння різних форматів навчання у розвитку soft skills енергоменеджерів і енергоаудиторів

Формат навчання	Переваги для розвитку soft skills	Недоліки для розвитку soft skills
Традиційне (очне) навчання	<ul style="list-style-type: none"> - Жива міжособистісна комунікація - Розвиток командної роботи через групові проекти - Миттєвий зворотний зв'язок від викладача та інших слухачів 	<ul style="list-style-type: none"> - Обмеженість у масштабованості (невеликі групи) - Менша гнучкість за часом і місцем - Вищі витрати ресурсів (час, транспорт, приміщення)
Дистанційне (онлайн) навчання	<ul style="list-style-type: none"> - Доступність і гнучкість навчання - Розвиток цифрових навичок і адаптації до роботи у віртуальних командах - Можливість залучати міжнародних експертів - Зручність для самонавчання 	<ul style="list-style-type: none"> - Обмежені можливості для розвитку живої комунікації - Менший емоційний ефект і залученість - Ризик зниження мотивації та відчуження
Гібридне (змішане) навчання	<ul style="list-style-type: none"> - Оптимальне поєднання переваг очного й онлайн форматів - Розвиток комунікаційних, управлінських і аналітичних навичок - Гнучкість організації освітнього процесу - Можливість індивідуалізації навчання 	<ul style="list-style-type: none"> - Вимагає додаткових ресурсів (платформи, обладнання, підтримка) - Можливі технічні труднощі при інтеграції онлайн і офлайн компонентів

Порівняльний аналіз демонструє, що традиційний та дистанційний формати навчання мають суттєві переваги, але кожен з них по-своєму обмежує можливості розвитку soft skills. Тому, саме гібридне навчання поєднує переваги обох підходів, створюючи оптимальне середовище для комплексного розвитку компетентностей енергоменеджерів та енергоаудиторів, де технічна підготовка гармонійно інтегрується з формуванням комунікативних, управлінських і аналітичних навичок. Це робить його найбільш перспективним напрямом для удосконалення освітніх програм у сфері енергоменеджменту та енергоаудиту.

Успіх гібридного навчання для енергоменеджерів та енергоаудиторів значною мірою залежить від того, наскільки цілеспрямовано в освітні програми інтегровано завдання, спрямовані на формування soft skills. Важливо не лише передати технічні знання, а й створити навчальне середовище, яке моделює реальні професійні ситуації, у яких проявляються комунікація, лідерство, критичне мислення та інші поведінкові компетентності.

На нашу думку, для програм підготовки та підвищення кваліфікації енергоменеджерів і енергоаудиторів рекомендованим є поєднання трьох рівнів інструментів: онлайн - для засвоєння знань і розвитку аналітичних здібностей, офлайн - для формування комунікативних та лідерських навичок, інтегрованих методів - для моделювання реальних професійних ситуацій і відпрацювання комплексних компетентностей. Такий підхід забезпечує не лише ефективне навчання, але й підготовку фахівців, здатних успішно працювати в умовах зростаючої складності енергетичної галузі. Співвідношення онлайн/офлайн може базуватись на різних моделях. Найбільш популярні моделі, які використовувались авторами даного дослідження під час проведення в Центрі підготовки енергоменеджерів навчання для енергоаудиторів будівель та процесів, а також енергоменеджерів, наведено в табл.2.

Таблиця 2 – Порівняння моделей гібридного навчання у розвитку soft skills

Модель	Співвідношення онлайн/офлайн	Суть організації	Переваги для розвитку soft skills	Обмеження
«Теорія онлайн – практика офлайн»	70% онлайн / 30% офлайн	Теоретичні знання подаються дистанційно, практичні навички та soft skills відпрацьовуються під час очних воркшопів і симуляцій.	<ul style="list-style-type: none"> - Розвиток комунікації та переговорів у живому форматі - Формування лідерства та командної взаємодії - Зручне засвоєння теорії онлайн 	Потребує якісної підготовки офлайн-сесій, щоб максимально використати обмежений час
«Змішана рівновага»	50% онлайн / 50% офлайн	Баланс між онлайн і офлайн: теорія, кейси й частина тренінгів онлайн; практичні вправи, групові проекти та презентації – офлайн.	<ul style="list-style-type: none"> - Одночасний розвиток аналітичних та комунікативних навичок - Гнучкість та інтеграція цифрових інструментів - Оптимальний для тривалих освітніх програм 	Вимагає більших ресурсів (часових, організаційних, фінансових)
«Онлайн з підтримкою офлайн-модулів»	80% онлайн / 20% офлайн	Основна частина навчання онлайн, короткі інтенсивні сесії офлайн присвячені командним завданням та розвитку soft skills.	<ul style="list-style-type: none"> - Доступність і масштабованість - Розвиток цифрових комунікацій - Інтенсивний розвиток soft skills під час офлайн-модулів 	Можливий брак системного розвитку лідерських навичок через обмежений очний компонент

Аналіз моделей гібридного навчання свідчить, що кожна з них має власні переваги та обмеження, однак у контексті підготовки енергоменеджерів та енергоаудиторів найбільш оптимальною є модель «теорія онлайн – практика офлайн» (70/30). Такий підхід дозволяє гнучко організувати засвоєння великих

обсягів теоретичного матеріалу у дистанційному форматі, залишаючи очні заняття для розвитку критично важливих soft skills - комунікації, ведення переговорів, лідерства, роботи в команді та презентаційних навичок. Саме ці компетентності визначають успішність впровадження енергоефективних рішень, адже від здатності переконати керівництво та мотивувати персонал залежить практична реалізація технічних рекомендацій. Таким чином, рекомендованою для професійних програм у сфері енергоменеджменту та енергоаудиту є модель, де онлайн-компонента забезпечує фундамент теоретичних знань, а офлайн-компонента виступає ключовим середовищем розвитку soft skills. Такий баланс робить навчальний процес водночас ефективним, гнучким і практикоорієнтованим.

Розвиток soft skills у сфері енергоменеджменту та енергоаудиту потребує застосування активних стратегій навчання, що базуються на принципах «learning by doing» і моделюванні реальних професійних ситуацій. Для цього можуть застосовуватися метод кейсів для аналізу конкретних практичних ситуацій (наприклад, результатів енергоаудиту промислового підприємства чи впровадження системи енергоменеджменту в громаді) або роліві ігри для розвитку навичок переговорів та переконування (наприклад, коли один учасник виступає в ролі енергоаудитора і має довести доцільність заходів з енергоефективності з урахуванням технічних, економічних та управлінських аргументів, для керівника підприємства та фінансового директора), або робота у малих групах (наприклад, спільний аналіз енергетичних балансів, розроблення дорожньої карти впровадження системи енергоменеджменту, підготовка колективних презентацій результатів енергоаудиту тощо). Проектно-орієнтоване навчання дозволяє учасникам створювати реальні чи наближені до реальних продукти: енергетичний план дій для підприємства, рекомендації з модернізації системи тепlopостачання, концепцію освітлення будівлі тощо. Саме ці підходи дозволяють сформувати у слухачів не лише технічні компетентності, але й уміння ефективно комунікувати, працювати в команді, брати на себе лідерські ролі та приймати управлінські рішення. Для розвитку soft skills особливо важливим є індивідуальний супровід. Тому, застосування коучингу допомагає слухачам формувати власні освітні траєкторії, ставити реалістичні цілі та знаходити способи їх досягнення, а застосування менторства, у свою чергу, дозволяє передати практичний досвід від досвідчених енергоменеджерів та енергоаудиторів до колег з малим досвідом. Таким чином, ці стратегії, інтегровані у гібридні моделі навчання, дозволяють забезпечити гармонійне поєднання технічних знань і поведінкових компетентностей.

Попри численні переваги гібридних форматів навчання, їхня ефективність у розвитку soft skills залежить від низки умов. Якщо вони не враховані, існує ризик зниження якості освітнього процесу та недосягнення очікуваних результатів у підготовці енергоменеджерів та енергоаудиторів.

По-перше, дистанційні формати добре працюють для засвоєння теорії та розвитку аналітичних компетентностей, проте їхній потенціал у сфері «живої» комунікації, лідерства й переговорних навичок є значно нижчим. Існує ризик, що учасники залишаться «пасивними слухачами», не отримавши достатнього досвіду взаємодії.

По-друге, для повноцінної участі у гібридному навчанні необхідна якісна технічна база - швидкісний інтернет, сучасні платформи, інтерактивні інструменти. У випадку технічних збоїв або недостатнього цифрового рівня підготовки учасників виникають труднощі у командній роботі, що може негативно впливати на розвиток комунікаційних soft skills.

По-третє, якщо онлайн і офлайн етапи не доповнюють один одного, існує ризик дублювання матеріалів або, навпаки, втрати цілісності процесу. Це може знизити ефективність формування навичок співпраці та командної взаємодії.

Також, з практичного досвіду проведення різноманітних онлайн тренінгів ми переконались, що частина слухачів може обмежуватися формальним відвідуванням занять, не включаючись активно у дискусії чи командні завдання. Це особливо небезпечно для розвитку soft skills, оскільки навички комунікації та лідерства формуються лише за умови активної взаємодії.

Більш того, якщо навчальний процес орієнтований переважно на технічні компетентності, а soft skills інтегруються лише у вигляді додаткових активностей, вони не формуються системно. Це призводить до ситуації, коли слухачі отримують знання з енергоаудиту чи енергоменеджменту, але не здатні ефективно застосовувати їх у професійній комунікації.

Однак, для енергоменеджерів і енергоаудиторів, діяльність яких вимагає постійної комунікації зі стейкхолдерами, особливо критичною є правильна організація офлайн-частини навчання, а також інтеграція soft skills у всі етапи освітнього процесу. Використання інтерактивних інструментів, залучення менторства та підготовка викладачів створюють умови, за яких гібридний формат стає оптимальною моделлю підготовки енергоменеджерів та енергоаудиторів. Саме ці аспекти мають враховуватися при розробці освітніх програм, щоб подолати ризики і максимально реалізувати потенціал гібридного навчання.

Для освітніх установ та тренінгових центрів ключовим завданням є створення комплексних освітніх програм, де технічні знання з енергоефективності гармонійно поєднуються з розвитком soft skills. Саме гібридні формати та активні методи навчання забезпечують найвищу ефективність у підготовці фахівців,

здатних не лише аналізувати та планувати впровадження заходів з енергоефективності, а й успішно впроваджувати їх у практику через ефективну комунікацію, лідерство та роботу в команді, здатність впроваджувати зміни, аргументувати рішення та ефективно співпрацювати з різними стейкхолдерами. Тому запропонована модель курсу (див. табл.3) має спиратися на гібридний формат, який інтегрує онлайн, офлайн та інтегровані інструменти навчання.

Подана структура демонструє, що розвиток soft skills є результатом не окремих тренінгів, а системного включення відповідних активностей та інструментів оцінювання у всі етапи курсу. Онлайн-модулі формують аналітику і самодисципліну, офлайн - навички комунікації, переговорів і лідерства, інтегровані проекти - командну роботу та стратегічне мислення, а підсумковий етап - здатність презентувати й захищати рішення.

Таблиця 3 – Пропонована структура курсу гібридного навчання у розвитку soft skills енергоменеджерів та енергоаудиторів

Модуль	Основні активності	Методи оцінювання soft skills
Базовий (онлайн)	Відеолекції, тести, онлайн-дискусії, симуляції управлінських рішень	Участь у дискусіях (активність, якість аргументації); результати онлайн-тестів
Практичний (офлайн)	Рольові ігри (переговори з керівництвом підприємства), воркшопи, групові завдання	Спостереження викладачів за комунікацією та лідерством учасників; взаємооцінка у командних завданнях; аналіз умінь переконувати
Проектний (інтегрований)	Розробка дорожньої карти енергоменеджменту чи енергетичного плану підприємства; командні презентації	Оцінювання командної взаємодії; якість презентації та аргументації; відгуки менторів; самооцінка внеску у команду
Підсумковий (гібридний)	Захист індивідуальних і групових проєктів; рефлексивні сесії	Комплексна оцінка: виступ перед експертами, здатність відповідати на критичні запитання; письмова рефлексія; підсумкова взаємооцінка

Створення ефективного гібридного курсу для енергоменеджерів та енергоаудиторів вимагає чіткої структуризації освітнього процесу. Ключовими складовими такої програми є навчальні модулі, практико-орієнтовані активності та система оцінювання soft skills, яка дозволяє відстежувати прогрес учасників не лише у знаннях, але й у професійних поведінкових компетентностях.

Запропонована модель поєднує масштабованість і доступність онлайн-навчання з емоційною насиченістю й практичним спрямуванням офлайн-модулів. Завдяки інтегрованим інструментам (кейс-метод, проекти, менторство) вона забезпечує не лише формування знань у енергоменеджерів та енергоаудиторів, а й системний розвиток їх soft skills.

Також, одним із ключових факторів успіху гібридних програм підготовки енергоменеджерів та енергоаудиторів є ефективна система підтримки та супроводу слухачів. Саме завдяки налагодженій взаємодії між викладачами, менторами та цифровими платформами формується цілісне освітнє середовище, яке забезпечує не лише засвоєння технічних знань, а й розвиток soft skills. Ефективна підтримка у гібридному навчанні є багатовимірною: викладач виступає фасилітатором і модератором, коуч і ментор допомагають індивідуалізувати процес, а цифрові платформи для онлайн-навчання (Moodle, Google Classroom, Microsoft Teams, Zoom тощо) створюють інфраструктуру для безперервного розвитку. Така інтегрована система супроводу дозволяє забезпечити баланс між технічними знаннями та розвитком soft skills, що є критично важливим для підготовки енергетичних фахівців нового покоління.

Ефективність гібридних освітніх програм значною мірою залежить від того, наскільки вони враховують вихідний рівень підготовки слухачів. Оскільки професійна спільнота енергоменеджерів та енергоаудиторів включає як початківців, так і досвідчених фахівців, важливо забезпечити диференційований підхід, що дозволяє адаптувати зміст і методики навчання до різних цільових груп.

Висновки.

1. Аналіз показав, що гібридний формат навчання є найбільш доцільною моделлю підготовки та підвищення кваліфікації енергоменеджерів і енергоаудиторів, оскільки він поєднує гнучкість дистанційного навчання з практичною цінністю очних занять, забезпечуючи ефективне формування як технічних, так і поведінкових компетентностей (soft skills), необхідних для сучасного енергетичного фахівця.

2. У ході аналізу виявлено, що ключовими перевагами гібридного підходу є можливість поєднання теоретичного засвоєння знань із практичним відпрацюванням навичок комунікації, командної роботи, лідерства та критичного мислення, однак його ефективність значною мірою залежить від методичної

інтеграції онлайн- та офлайн-компонентів, а також від рівня підготовленості викладачів до фасилітації та коучингової взаємодії зі слухачами.

3. Застосування гібридного навчання у підготовці енергоменеджерів та енергоаудиторів сприяє підвищенню якості професійної освіти, оскільки дозволяє адаптувати навчальний процес до різних рівнів підготовки учасників - від початківців до досвідчених експертів, - формуючи у кожній групі відповідні soft skills, що відповідають етапу їхнього професійного розвитку.

A. Cherniavskiy¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2858-8224

O. Borychenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6127-2945

V. Nakhodov¹, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7643-5965

K. Cherniavskiy¹, Cand. Sc. (Eng.), Student, ORCID 0009-0006-7523-4102

¹**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

APPLICATION OF HYBRID LEARNING FORMATS FOR THE DEVELOPMENT OF SOFT SKILLS OF ENERGY MANAGERS AND ENERGY AUDITORS

The article explores the application of hybrid learning formats for developing soft skills among energy managers and energy auditors. It highlights the growing importance of non-technical competencies - such as communication, leadership, teamwork, and strategic thinking - in ensuring the successful implementation of energy efficiency projects. The research emphasizes that the integration of hybrid learning, combining online and offline modalities, offers a flexible and effective framework for enhancing both technical knowledge and behavioral competencies required in modern energy management.

The study provides a conceptual analysis of hybrid formats, identifies their key components (theoretical, practical, and integrative modules), and presents methodological approaches that facilitate soft skills formation through case studies, project-based activities, role-playing, and mentoring. The paper also outlines potential challenges and risks of hybrid learning, including unequal access to digital resources and difficulties in synchronizing online and offline components. To address these issues, a comprehensive support system is proposed, encompassing the roles of teachers as facilitators, mentors as practice-oriented guides, and digital platforms as tools for continuous engagement and feedback.

The findings confirm the suitability of hybrid learning for professional education in the energy sector, particularly within qualification upgrade and lifelong learning programs. The article concludes that a balanced hybrid approach not only fosters the acquisition of technical expertise but also ensures the systematic development of soft skills crucial for leadership, negotiation, and decision-making in energy efficiency management. Future research should focus on empirical validation of the proposed model through case studies and quantitative assessments of soft skills progress in hybrid educational environments.

Keywords: energy auditor, energy manager, hybrid learning, mentoring, professional training, soft skills.

References

1. European Union. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast). Brussels. European Official Journal. (2023).
2. Survey of energy audits and energy management systems in the Member States, Publications Office, 2015, <https://data.europa.eu/doi/10.2790/291064>.
3. Piterà, L. A., & La Mura, S. (2024). Evolution of energy audits and energy management systems: Legislation, tools and professionals at the service of energy efficiency. E3S Web of Conferences, 523, 04008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452304008>.
4. Ciriminna, R., Meneguzzo, F., Pecoraino, M., Pagliaro, M. (2016). Reshaping the education of energy managers. Energy Research & Social Science, Volume 21, 44-48. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.06.022>.
5. Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., & Thollander, P. (2016). Energy management in industry: a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. Journal of Cleaner Production, 112(5), 3692-3708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060>.
6. Radulescu, V. (2022). New Requirements for All Levels of Education in Energy Management in the Current Context of Global Crisis. Revista Românească pentru Educație Multidimensională, 14(4Sup1), 155-170. <https://doi.org/10.18662/rrem/14.4Sup1/664>.
7. Capehart, B.L., Turner, W.C., & Kennedy, W.J. (2016). Guide to Energy Management, Eighth Edition (8th ed.). River Publishers. <https://doi.org/10.1201/9781003151982>.
8. IEA (2022), Skills Development and Inclusivity for Clean Energy Transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/skills-development-and-inclusivity-for-clean-energy-transitions>, Licence:CC BY 4.0.

9. DSTU ISO 50001:2020 Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymohy ta nastanova shchodo vykorystannia (ISO 50001:2018, IDT).

10. Kerivnytstvo z vprovadzhennia systemy enerhetychnoho menedzhmentu vidpovidno do vymoh mizhnarodnogo standartu ISO 50001:2018/ A. Cherniavskiy, Ye. Inshekov, O. Solovei, O. Borychenko, P. Pertko // Za zahalnoi redaktsiieiu Ye. Insheкова, A. Cherniavskoho. - K.: Proiekt UNIDO/GEF «Vprovadzhennia standartu system enerhomenedzhmentu v promyslovosti Ukrainy», 2021. – 137 s.

11. DSTU ISO 50002:2016 Enerhetychni audyty. Vymohy ta nastanova shchodo yikh provedennia (ISO 50002:2014, IDT).

12. Praktychni posibnyk z enerhetychnoho audytu promyslovykh pidpriemstv/ A. Cherniavskiy, A. Safiants, N. Usenko, O. Solovei, O. Borychenko, P. Pertko, Yu. Shyshko, A. Hoienko// Za zahalnoi redaktsiieiu N. Usenko ta A. Cherniavskoho. – K.: Proekt «Konsultuvannia pidpriemstv shchodo enerhoefektyvnosti» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH za doruchenniam Federalnogo ministerstva ekonomichnogo spivrobitnytstva ta rozvytku Nimechchyny (BMZ), 2020. – 280 s.

13. Innovatsiini tekhnolohii navchannia v umovakh modernizatsii suchasnoi osvity : monohrafiia / za nauk. red. d. ped. n., prof. L. Z. Rebukhy. Ternopil: ZUNU, 2022. 143 s.

14. Suchasni modeli profesiinoi osvity i navchannia v krainakh Yevropeiskoho Soiuzu: porivnialnyi dosvid: monohrafiia / V. O. Radkevych, L. P. Pukhovska, O. V. Borodiienko, O. P. Radkevych, N. V. Bazeliuk, N. M. Korchynska, S. O. Leu, V. V. Artemchuk ; za zah. red. V. O. Radkevych. – Kyiv: IPTO NAPN Ukrainy, 2018.- 223 s.

15. Adaptivna khmaro oriientovana systema navchannia ta profesiinoho rozvytku vchyteliv zakladiv zahalnoi serednoi osvity :[Elektronne vydannia]: monohrafiia / Demianenko V. M. ta in. ; za nauk. red. M. P. Shyshkinoi. Kyiv: Pedahohichna dumka, 2020. 183 s., il.

16. Tendentsii rozvytku osvity doroslykh u rozvynenykh krainakh svitu: monohrafiia / [Avsheniuk N.M., Ohiienko O.I., Postryhach N.O., Marusynets M.M., Kotun K.V., Diachenko L.M., Hodlevska K.V.]. – IPOOD imeni Ivana Ziaziuna NAPN Ukrainy. Kropyvnytskyi : ImeksLTD, 2020. – 645 s.

17. Tekhnolohii formuvannia Soft Skills v systemi profesiinoi pidhotovky pedahoha : navchalnyi posibnyk [Elektronnyi resurs] / uklad. T. Y. Babiuk, N. H. Kanosa, S. M. Babiuk. Kamianets-Podilskiy : Vydavets Kovalchuk O.V., 2023. 222 s. ISBN 978-617-8105-15-0.

18. Zvorych, R., Masna, O. (2023). Zeleny enerhetychny perekhid v kontseptsii pislyavoyennoi vidbudovy Ukrayiny [Green energy transition in the concept of post-war reconstruction of Ukraine]. Visnyk ekonomiky – Herald of Economics, 3. P. 170–181. DOI: <https://doi.org/10.35774/visnyk2023.03.170>.

19. Profesiinyi standart «Enerhetychni auditor budivel». Zatverdzheno Ministerstvom rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy, nakaz vid 22 veresnia 2023 r. №859. Link: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/544-energeticnij_auditor_budivel.pdf.

20. Profesiinyi standart «Enerhetychni auditor protsesiv». Zatverdzheno Derzhavnym ahenstvom z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy, nakaz vid 16 kvitnia 2024 r. №37-24. Link: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/612-557_01_01_01_09_4_31.pdf.

21. Profesiinyi standart «Enerhetychni auditor transportu». Zatverdzheno Derzhavnym ahenstvom z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy, nakaz vid 31 travnia 2024 r. №51-24. Link: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/625-psea_transportu_pisla_perevirki_1.pdf.

22. Profesiinyi standart «Profesional z enerhetychnoho menedzhmentu». Zatverdzheno Natsionalnym tekhnichnym universytetom Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho", nakaz vid 4 kvitnia 2025 r. №NOD/292/25. Link: https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/734-profesional_z_energeticnogo_menedzhmentu_compressed.pdf.

Надійшла: 28.09.2025
Received: 28.09.2025