

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

ECOLOGICAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 556.33

DOI 10.20535/1813-5420.2.2024.303095

А.В. Бодюк¹, канд. екон. наук, ORCID 0000-0002-6200-1784

В.П. Розен¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0440-4251

О.М. Терентьев¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2523-2804

А.І. Крючков¹, к.т.н. доцент, ORCID 0000-0002-2234-0546

М.І. Сергієнко¹, викладач, ORCID 0000-0001-8284-9072

¹Національний технічний університет України

”Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”

ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ПРОЦЕСАМИ ЗАЛІЗОРУДНОГО НАДРОКОРИСТУВАННЯ

В Україні, як і в більшості країн світу, до складно вирішуваних проблем належить збереження природних якостей наземних і підземних водних ресурсів. Забруднення підземних вод здійснюється стихійно й в результаті організованих викидів на поверхні території і у підземні порожнини. Забруднені площі територій навколо родовищ корисних копалин, промислових об'єктів, як і маси забруднюючих речовин, зростають. За масштабності потрібно виокремлювати забруднення підземних вод в результаті видобування руд та розміщення порід у відвали, як найбільш шкідливі і для сільськогосподарських угідь, наземних водних об'єктів.

Обчислення розміру відшкодування заподіяних збитків забрудненням підземних вод шкідливими речовинами потребує подальших офіційних коригувань з врахуванням фактору народної власності на природні ресурси взагалі. Тому необхідно, щоб офіційно у нормативно-правових актах місцевих органів влади були враховані наступні ситуації: підземні води та їх середовище належать до об'єктів народної власності, тому в методиках визначень й обчислення екологічних наслідків забруднень підземних вод та й їх підземного середовища необхідно передбачати, що збитки потрібно вивчати й оцінювати з погляду шкоди народній власності; забруднені підземні води та й їх підземне середовище знаходяться локально на територіях територіальних старостівських округів, які представляють народ України; відповідно до п.1, при обчисленні розміру компенсацій за забруднення взагалі необхідно визначати збитки для населення цих округів та розміри їм нарахувань і виплат; місцевим органам влади необхідно організувати компенсаційні процеси, контролювати їх виконання і результативність.

Визначення екологічного податку не відповідає визначенню поняття податку як безумовному платежу до бюджету, оскільки по своїй суті він є покарання за скиди забруднених речовин у водні об'єкти й екологічні забруднення водних ресурсів.

Ключові слова: підземні води, ресурси, водні ресурси, народна власність, забруднення, екологічний податок.

Вступ. Вода належить до найбільш поширених неорганічних речовин на Землі. Її хімічна формула H₂O, як хімічна речовина вона прозора, безбарвна рідина, без запаху і смаку (в нормальних умовах). У Водному кодексі України не дано конкретного визначення води. У статті 95. Охорона вод (водних об'єктів) Водного кодексу України «Усі води (водні об'єкти) підлягають охороні від забруднення, засмічення, вичерпання та інших дій, які можуть погіршити умови водопостачання, завдавати шкоди здоров'ю людей, спричинити зменшення рибних запасів та інших об'єктів водного промислу, погіршення умов існування диких тварин, зниження родючості земель та інші несприятливі явища внаслідок зміни фізичних і хімічних властивостей вод, зниження їх здатності до природного очищення, порушення гідрологічного і гідрогеологічного режиму вод» [1].

Води на молекулярному рівні під дією сили тяжіння і температури поверхнево стоять горизонтально на рівній поверхні землі (у водному об'єкті як фізичне тіло), протікають по нахиленій, вільно проникають на різну глибину земельної території, заповнюють природними процесами підземні простори, зокрема, пустоти, порожнини, проміжки, пори, тріщини, в ґрунті капіляри.

Нагадаємо, що у Водному кодексі України: до підземних належать води, якщо вони «...знаходяться нижче рівня земної поверхні в товщах гірських порід верхньої частини земної кори в усіх фізичних станах» [1]. Господарське використання наземних і підземних вод широко масштабне, але воно супроводжується викидами у їх об'єкти різних шкідливих речовин. Забруднення підземних вод наземними речовинами

здійснюється природними і не природними процесами. Взагалі-то забруднення вод, а то й деградація джерел водопостачання, все більше поширюється внаслідок скиду у водні об'єкти, прибережені території промислових, побутових та сільськогосподарських відходів, хімізації посівних площ і т. д.

Водні ресурси поруч з атмосферними та космічними належать до невичерпних природних. Теоретично вони невичерпні як фізичні речовини з певним хімічним складом фізичними властивостями. Проте такі ресурси як вода та й повітря фактично суттєво піддаються значним змінам в процесі техногенезу, а при значному забрудненні можливе часткове вичерпання цих ресурсів. Особливо руйнівний вплив на стан і забруднення територій, ґрунтовий покрив, водні об'єкти надто великий в результаті воєнних подій.

Тому в нашій країні глобалізуються проблеми зокрема з прісною водою за її забруднення, нерационального використання водних об'єктів, взагалі надмірного вилучення і забруднення природних ресурсів по територіях.

Окремо відзначимо, що негативний вплив на зміни розміщення зовнішніх і підземних джерел водних об'єктів, склад і стан у них водних ресурсів здійснюється організовано підчас різних процесів господарського надкористування. У процесі організованого видобування руд, зокрема залізних, мають місце скиди агрегатованими технічними засобами забруднюючих речовини у відвали, а далі водними потоками забруднюючі речовини попадають у підземні водні об'єкти.

На Криворіжжі прикладом агрегування технічних засобів у залізородних родовищах є технологічний комплекс переміщення порід у відвал за допомогою консольного відвалоутворювача і транспортно-відвального моста. Цей комплекс включає роторний або багатоковшевий екскаватор, відвалоутворювач, транспортно-відвальний міст (ТВМ, рис.1), дороги для його переміщення по родовищу (Рис.1).



Рисунок 1 - Переміщення на кар'єрах порід у відвали з застосуванням транспортно-відвального мосту

Взагалі-то, різні види техніко-технологічних засобів експлуатуються на діючих рудодобувних і рудопереробних комбінатах, своєрідно впливають на екологічну ситуацію на родовищах та за їх межами.

З формуванням потужної техногенної зони аерації в надрах проявляються негативні наслідки: порушується природний режим вологості порід; посилюються процеси депресивного ущільнення піщано-глинистих порід; як наслідок різних ущільнень може бути подальше навіть просідання поверхні землі і т. д. Тому актуальним проблемам збереження водних об'єктів і водних ресурсів присвячені праці широкого кола науковців і практиків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Регламентатії щодо визначення й оцінювання забруднень шкідливими речовинами підземних вод, які необхідно застосовувати науковцями для розробки відповідних рекомендацій, встановлені Водним кодексом України, Кодексом України про надра, Податковим кодексом України; законами України: Про охорону навколишнього природного середовища, Про охорону земель, Про державний контроль за використанням та охороною земель та ін. [1 – 6].

Природоохоронна діяльність у сфері надкористування регламентована зокрема Гірничим законом України. В ньому визначені такі основні вимоги до проведення гірничих робіт, як дотримання безпечного проведення гірничих робіт, раціональне видобування, використання корисних копалин, охорони надр.

Питання оцінки забруднень, методики визначення їх шкідливих наслідків висвітлили, наприклад, Коржнев М. М., Сухіна О. М. [7, с. 135 – 156]; Загнітко В. М., Гулій В. М. [8, с. 316 – 334]; Багрій С. М., Кузьменко Е. Д. [9]; Носачова Ю. В., Макаренко І. М., Шаблій Т. О. [10] та ін. Але їхні методики, рекомендації все-таки в межах офіційно затверджених методик проведення обчислень щодо забруднення водних об'єктів і т. д.

Дослідження екологічного оподаткування провів, наприклад, Міщенко В. С. [7, с. 157 – 168] (в рамках економічної геології).

Методи досліджень. У процесі написання статті застосовані ресурсний підхід, методи конкретизації, логічний, абстрактний, документальний, за базові прийнято названі нами ресурсе-понятійні визначення.

Мета та завдання. Метою написання статті є обґрунтування, з конкретизацією окремих із затверджених положень офіційно, методики обчислення шкоди від забруднень підземних водних ресурсів і змін підземних водних об'єктів, належних до об'єктів народної власності.

Завдання підготовки статті: дослідити чинні методики визначення збитків від забруднення підземних водних ресурсів; встановити нормативно-правову базу для визначення екологічних наслідків забруднення підземних водних ресурсів; започаткувати запровадження фактору народної власності в обчисленнях збитків забрудненням підземних водних ресурсів; сформулювати систему власного понятійного апарату тлумачення хіміко-фізичних наслідків забруднення водних ресурсів; обґрунтувати зміни до системи чинного екологічного оподаткування; розвинути ресурсний підхід до визначень, пов'язаних з підземними водними об'єктами, їх наповнення, надровим середовищем.

Матеріал і результати досліджень. Для орієнтації в обґрунтуванні завдань статті розглянемо офіційні тлумачення понять, що стосуються водних об'єктів, зокрема підземних. За визначенням Водного кодексу України, до підземних належать води, якщо вони «...знаходяться нижче рівня земної поверхні в товщах гірських порід верхньої частини земної кори в усіх фізичних станах».

Одним з визначень ґрунтові води трактуються як «гравітаційні підземні води першого від поверхні Землі постійного водоносного горизонту, що залягають на першому водонепроникному шарі земної кори і утворюються головним чином шляхом інфільтрації (просочування) атмосферних опадів і вод річок, озер, водосховищ, зрошувальних каналів та шахтових водовідвідних каналів» [11]. Отже, ґрунтові води названі підземними, бо знаходяться під поверхнею, але ж не «в товщах гірських порід верхньої частини земної кори в усіх фізичних станах».

Далі, у Водному кодексі України, ст. 5, Водні об'єкти загальнодержавного і місцевого значення: підземні води, які є джерелом централізованого водопостачання, належать до водних об'єктів загальнодержавного значення; підземні води, які не можуть бути джерелом централізованого водопостачання, належать до водних об'єктів місцевого значення.

Але ж наприклад, приватні суб'єкти господарювання видобувають мінеральні води одноосібно, у процесі якого централізованого водопостачання немає.

Далі, статтею 6. Власність на води (водні об'єкти) визначено, що «Води (водні об'єкти) є виключно власністю Українського народу і надаються тільки у користування».

Отже, по-перше, підземні води належать до об'єктів народної власності, тому і збитки від їх забруднень, втрат від нераціонального використання логічне відносити до збитків народу. По-друге, уже мають місце факти приватизації водних об'єктів або їх частини окремими громадянами, тому такі об'єкти вже не належать до об'єктів народної власності, тому визначення збитків необхідно виконувати за новими методиками тобто зокрема з коефіцієнтом «незаконності», який потрібно ще установити.

Тому названі законодавчі положення щодо водних об'єктів достатньо ще не обґрунтовані. Зокрема все більше поширюється практика їх «приватизації». Цей факт, на наш погляд, потребує організації на законодавчому рівні реприватизації. А до її проведення потрібно коригувати методики обчислення покарань за забруднення приватизованих і не приватизованих об'єктів приватними особами.

За ознакою придатності для використання і застосування у різних сферах підземні води поділені на такі види:

- питні, що придатні для господарсько-питного застосування;
- технічні, що придатні для виробничо-технічного водопостачання, зрошення земель, обводнення пасовищ;
- лікувальні мінеральні води, що використовуються за бальнеологічними потребами і як столові напої;
- теплоенергетичні (включаючи пароводяні суміші), застосовуються для тепlopостачання промислових, сільськогосподарських та громадських об'єктів, зокрема і для вироблення електроенергії;
- промислові води, придатні для вилучення із них цінних компонентів.

Логічне виділяти і досліджувати процеси забруднення підземних вод наземними забрудненими водами, забруднюючими речовинами, які безпосередньо організовано розмістили або розмістилися у водному об'єкті, або в результаті їх одночасності. До речі, мають місце і забруднення підняттям нижчих вод, переміщенням горизонтальних забруднених вод і по горизонталі забруднюючих речовин. Нами виділяється наступні ситуації з забрудненням підземних вод з наземних об'єктів: забрудненими наземними водами; наземними твердими речовинами; нафтою і нафтопродуктами; природними газами і газоподібними речовинами; штучно утвореними газами і газоподібними речовинами.

Практично до забруднюючих належать мул, глина, піски, глини, інші наземні використовувані у господарствах речовини; нафта і нафтопродукти, солі важких металів, радіонукліди, відходи виробництва,

хімічні добрива, мікроорганізми з виробництв продуктів харчування і стічних вод, породи з родовищ корисних копалин, фільтрати, побутове і з виробництв сміття, поліетиленові вироби, папір та ін.

Узагальнено види територіальних екологічних негативних наслідків залізрудного надрокористування показані на рис.2. З даного рисунка наочно видно надто велика системність екологічних порушень на процесах видобування залізних руд на Криворіжжі, відповідно й екологічних збитків. Тому, до речі, для залізрудного надрокористування характерні великі суми сплачуваних екологічних податків.

Розглянемо питання визначення штрафних санкцій за забруднення водних об'єктів, зокрема підземних. Нами виділяється два види офіційно встановлених «покарань» на практиці водокористування: 1) відшкодування заподіяних забрудненням водних об'єктів збитків державі; 2) екологічний податок.

За затвердженою Кабінетом Міністрів України Методикою [12], визначення розміру відшкодування заподіяних забрудненням водних об'єктів державі, тобто трактується як державі. Але ж, як згадувалося, у статті 6. Власність на води (водні об'єкти) Водного кодексу України закріплено, що «Води (водні об'єкти) є виключно власністю Українського народу і надаються тільки у користування». Отже не держава є власником природних водних об'єктів, а народ. Тому в текст обчислень потрібно офіційно вводити відповідні правки щодо народної власності та територіального розміщенні водних об'єктів тобто на територіях громад.



Рисунок 2 - Види територіальних екологічних негативних наслідків залізрудного надрокористування.

Для обчислення розміру відшкодування заподіяних державі, а точніше народу, а локально територіальним громадам збитків (у грн) забрудненням підземних вод шкідливими речовинами потрібно використовувати зі згаданої Методики формулу (як і далі конкретизовані):

$$З_{\Pi} = K_{кат} K_{Рп} L M_{\Pi i} Y_i, \quad (1)$$

де: $K_{кат}$ – коефіцієнт, яким враховують категорію водного об'єкта, визначається згідно з табл.1;

$K_{Рп}$ – регіональний коефіцієнт дефіцитності підземних вод, який визначається згідно з табл. 2.

З табл. 1 видно, що категорії підземних вод присвоєний максимальний коефіцієнт, тому і він об'єктивно впливає на суму збитків.

Далі, L – коефіцієнт, яким враховують природну захищеність підземних вод: для ґрунтових – 1,0; для міжпластових безнапірних – 1,3; для міжпластових напірних (артезіанських) – 1,6; $M_{\Pi i}$ – маса i -ї забруднюючої речовини, яка потрапила в підземні води (τ), яку необхідно обчислювати, з використанням даних еколого-гідрологічних вишукувань, по формулі:

$$M_{\Pi i} = V (C_i - C_{\Phi i}) 10^{-6}, \quad (2)$$

де: V – об'єм води в забрудненій частині водоносного горизонту (m^3), який визначати по формулі:

$$V = F \cdot m \cdot n_a \quad (3)$$

де: F – площа забруднення, m^2 ; m – середня потужність забрудненої частини водоносного горизонту, m ; n_a – активна пористість водонасичених порід, як і визначається згідно з табл. 3.

Таблиця 1 - Значення коефіцієнта $K_{кат}$, що враховує категорію водного об'єкта

Категорія водного об'єкта	$K_{кат}$
Поверхневі водні об'єкти: господарсько-побутового використання питного водокористування	1,0 1,4
Поверхневі водні об'єкти рибогосподарського використання: II категорії I категорії вищої категорії	1,6 2,0 2,5
Підземні води: питні та мінеральні інші (промислові, технічні)	5,0 3,0

Таблиця 2- Значення регіонального коефіцієнта дефіцитності підземних вод $K_{рп}$

Області	$K_{рп}$	Області	$K_{рп}$
Чернігівська	1,00	Івано-Франківська	1,15
Харківська	1,04	Житомирська	1,18
Сумська	1,05	Закарпатська	1,20
Полтавська	1,06	Херсонська	1,22
Волинська	1,07	Львівська	1,23
Рівненська	1,08	Чернівецька	1,23
Тернопільська	1,10	Донецька	1,34
Черкаська	1,11	Луганська	1,37
Дніпропетровська	1,13	Автономна Республіка Крим	1,41
Київська	1,13	Одеська	1,43
Хмельницька	1,14	Миколаївська	1,46
Вінницька	1,15	Кіровоградська	1,50
Запорізька		Зміна коефіцієнта	1 – 1,50

Таблиця 3 - Орієнтовні значення активної пористості водонасичених порід

Назва породи	Активна пористість
Гравелисто-галечні відкладення	0,28-0,30
Крупнозерністі піски	0,24-0,26
Різнозерністі піски	0,20-0,24
Дрібнозерністі піски	0,18-0,22
Тонкозерністі піски	0,15-0,19
Пилуваті та глинисті піски	0,05-0,15
Супіски	0,08-0,10
Суглинки	0,05-0,08
Тріщинуваті породи (крейда, вапняк, пісковик)	0,04-0,07

За відсутності характеристик конкретної водонасиченої породи для розрахунків приймати середні значення наведених інтервалів.

C_i – середня концентрація i -ї забруднюючої речовини у воді підземного водного об'єкта, $г/м^3$; $C_{фi}$ – фонові концентрації i -ї забруднюючої речовини у воді підземного водного об'єкта, $г/м^3$; 10^{-6} – коефіцієнт перерахування маси забруднюючих речовин.

За відсутності даних про фонові концентрації для підземних водних об'єктів замість $S_{\text{фi}}$ використовувати відповідні ГДК_i (гранично допустимої концентрації) для вод господарсько-питного водопостачання.

Y_i – питомий економічний збиток від забруднення водних ресурсів, віднесений до 1 тонни умовної забруднюючої речовини (грн/т), який визначати по формулі:

$$Y_i = Y \cdot A_i \quad (4)$$

де Y – проіндексований питомий економічний збиток від забруднення водних ресурсів у поточному році (на дату виявлення порушення) (грн/т), який визначати по формулі:

$$Y = Y_p \cdot I / 100, \quad (5)$$

де: Y_p – проіндексований питомий економічний збиток від забруднення водних ресурсів у попередньому році, грн/т; I – індекс інфляції (індекс споживчих цін), середньорічний по Україні за попередній рік, %; A_i – безрозмірний показник відносної небезпечності i -ї забруднюючої речовини, який визначати із співвідношення по формулі:

$$A_i = 1 / \text{ГДК}_i, \quad (6)$$

де: ГДК_i – безрозмірна величина, чисельне рівна ГДК_i забруднюючої речовини у воді водного об'єкта відповідної категорії.

Для речовин значення ГДК яких більше одиниці, в чисельнику вводиться поправний коефіцієнт 10. Для речовин, за якими відсутня величина гранично допустимої концентрації, показник відносної небезпечності A_i приймати рівним 500, а при ГДК «відсутність» – 10000. За офіційними даними індексація питомого економічного збитку від забруднення водних ресурсів, віднесеного до 1 тонни умовної забруднюючої речовини, грн/т. з 2012 року щорічно здійснюється щорічно [12].

До речі, якщо скидані забруднюючі речовини у складі продукції, сировини, відходів чи сміття або забруднюючі речовини із зворотними водами безпосередньо попадають в підземний водний об'єкт, то масу скинутих забруднюючих речовин визначати по даним документів (якщо скид зафіксований) або по результатах спеціального розслідування.

Про масштаби і стан забруднення довкілля, включаючи наземні і підземні водні об'єкти, на Криворіжжі, зокрема в результаті розробки родовищ залізних руд, свідчать наступні метричні показники. «П'ять такого профілю діючих Криворізьких гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) видобувають руди на 9 кар'єрах глибиною понад 300 м загальною площею близько 6 тис. га. На цих техногенних об'єктах накопичено майже 4 млрд м³ промислових відходів. Ними ж зайнята площа перебільшує 12 тис. га. З них 5 тис. га знаходиться під відвалами і більше 7 тис. га - під хвостосховищами» [15 48 17]. Ці ГЗК дуже забруднюють навколишнє середовище міста і за містом різними видами викидів. Крім них забруднення довкілля здійснюється іншими відходами. Тому, до речі, Кривий Ріг належать до найбільш забруднених міст України. Хоча найбільші суми екологічного податку сплачує Київ.

Розглянемо офіційно визначені положення щодо справляння чинного екологічного податку за забруднення водних об'єктів.

У стаття 30. Збори за спеціальне водокористування Водного кодексу України визначено, що «Збори за спеціальне водокористування справляються з метою стимулювання раціонального використання і охорони вод та відтворення водних ресурсів і включають рентну плату за спеціальне використання води та екологічний податок за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти, які встановлюються Податковим кодексом України». Відповідно п. 249.5. ПКУ «Суми податку, який справляється за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти (Пс), обчислюються платниками самостійно щокварталу виходячи з фактичних обсягів скидів, ставок податку та коригуючих коефіцієнтів за формулою»:

$$P_c = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot N_i \cdot K) \quad (7)$$

де: M_i – обсяг скиду i -тої забруднюючої речовини в тоннах (т); N_i – ставки податку в поточному році за тону i -того виду забруднюючої речовини у гривнях з копійками; K – коефіцієнт, що дорівнює 1,5 і застосовується у разі скидання забруднюючих речовин у ставки і озера (в іншому випадку коефіцієнт дорівнює 1).

Як приклад розміру екологічного податку, Приватне акціонерне підприємство «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПРАТ «ПВНГЗК», Кривий Ріг), що займається видобутком залізних руд (07.10 Добування залізних руд), у 2020 р. мало дохід 24 063 793 000 грн, сплатило екоподатків на суму 151 674 670 грн (його Статутний капітал 579 707 000 грн), що складає 26% статутного капіталу [46 <https://opendatabot.ua/c/00191023>].

Але ж свої особливості мають наземні водні об'єкти і підземні тобто відрізняються за рядом факторів: типом вод, їх складом, обсягами, розміщенням поверхнево територіальним і об'ємним в надрах і т. д. Тому приведену у ПКУ єдину формулу для розрахунків суми платежу не можна вважати об'єктивною. Тому нами пропонується скоригувати приведену формулу з врахуванням особливостей підземних водних об'єктів. Для цього застосуємо коефіцієнт обсягу водного об'єкта і коефіцієнт фізичних, складових і надропросторових особливостей водного об'єкта і водних ресурсів в ньому K_m :

$$P_c = \sum_{i=1}^n (M_{ли} N_{пi} K_{ос} K_{об} P K_m,) \quad (8)$$

де: $K_{об}$ – коефіцієнт обсягу водного об'єкта; P – знак множення; K_m – коефіцієнт змінюється від одиниці до m .

Цей фактор, тобто обсягу, необхідно враховувати, оскільки при однакових масах скинутих забруднених речовин при різних об'ємах водних об'єктах забрудненість водних ресурсів буде не однаковою. У великих водних об'єктах вона може бути і допустимою, у малих – може привести до гибелі живих організмів і т. д.

Зауважимо, що у згаданій статті значиться місце розміщення відходів: в межах населених пунктів і за їх межами, якщо у межах населеного пункту застосовується коефіцієнт 3, за межами коефіцієнт 1. Але ж знов таки територіально наземні і підземні водні об'єкти і в межах населеного пункту, і за його межами по різному забруднюються однаковою кількістю забруднених речовин, шкідливі наслідки забруднень не однакові.

Отже, визначення і щодо поняття й обчислення екологічного податку потребує подальших обґрунтувань, офіційного визнання.

Статтею 110 Відповідальність за порушення водного законодавства Водного кодексу України визначено, що «Порушення водного законодавства тягне за собою дисциплінарну, адміністративну, цивільно-правову або кримінальну відповідальність згідно з законодавством України». Але на законодавчому рівні не визначена відповідальність за забруднення перед народом взагалі і територіальними органами влади за забруднення їх територій, підземних водних ресурсів і підземних порожнин.

Висновки. Забруднення підземних вод здійснюється стихійно й в результаті організованих забруднювань як на поверхні територій, та і підземних порожнин. В Україні забруднені площі територій навколо родовищ залізних руд, як і маси забруднюючих речовин, збільшуються. За масштабності потрібно виокремлювати забруднення підземних вод в результаті видобування руд та розміщення порід у відвали, як найбільш шкідливі і для сільськогосподарських угідь, наземних водних об'єктів і т. д.

Обчислення розміру відшкодування заподіяних державі збитків забрудненням підземних вод шкідливими речовинами потребує подальших коригувань з врахуванням фактору народної власності на природні ресурси взагалі. Ми вважаємо, щоб офіційно у нормативно-правових актах місцевих органів влади були враховані наступні ситуації:

1) підземні води та їх середовище належать до об'єктів народної власності, тому в методиках визначень й обчислення екологічних наслідків забруднень підземних вод та й їх підземного середовища необхідно передбачати, що збитки потрібно вивчати й оцінювати з погляду шкоди народній власності;

2) забруднені підземні води та й їх підземне середовище знаходяться локально на територіях територіальних старостівських округів, які представляють народ України;

3) відповідно до п.1, при обчисленні розміру компенсацій за забруднення необхідно визначати збитки для населення цих округів та розміри їм нарахувань і виплат;

4) місцевим органам влади необхідно організувати компенсаційні процеси, контролювати їх виконання і результативність.

Визначення екологічного податку не відповідає визначенню поняття податку як безумовному платежу до бюджету. Екологічний податок потрібно розуміти, що по своїй суті є покарання за скиди забруднених речовин у водні об'єкти й екологічні забруднення водних ресурсів, тому потребуються його офіційні уточнення.

Список використаної літератури

1. Водний кодекс України: Закон України від 6 червня 1995 року № 213/95-ВР (зі змін. і доповн.).
2. Кодекс України про надра: Закон України від 27 липня 1994 року № 132/94-ВР (зі змін. і доповн.).
3. Гірничий закон України від 6 жовтня 1999 року № 1127-XIV (зі змін. і доповн.).
4. Податковий кодекс України: Закон України від 2 грудня 2010 року (зі змін. і доповн.).
5. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25 червня 1991 року № 1264-XII (зі змін. і доповн.).
6. Про охорону земель: Закон України від 19 червня 2003 року № 962-IV (зі змін. і доповн.).

7. Основи економічної геології: Навч. посіб. для студ. геол. спец. вищ. навч. закл. освіти /М.М. Коржнев, В.А. Михайлов, В.С. Міщенко та ін. Київ: Логос, 2006. 223 с.
8. Горючі корисні копалини України: Підручник / В. А Михайлов, М. В. Курило, В. Г. Омельченко та ін. Київ: КНТ, 2009. 376 с.
9. До питання оцінки забруднення підземних вод електрометричними методами / С. М. Багрій, Е. Д. Кузьменко // Геодинаміка. 2013. № 2. С. 93 – 96. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/geod_2013_2_32.
10. Носачева Ю. В. Оцінка ефективності інгібіторів корозії металів в водних середовищах різної мінералізації / Ю. В. Носачева, І. М. Макаренко, Т. О. Шаблій. // Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2014. С. 55 – 60. Режим доступу: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/11035>.
11. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ґрунтові_води.
12. Методика розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів, затверджена наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України 20 липня 2009 року № 389.
13. Антонік В.І., Антонік І.П. Проблеми і специфіка ландшафтної екології Криворіжжя. Режим доступу: http://elibrary.kdpu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/3025/1/ПРОБЛЕМИ_І_СПЕЦИФІКА_ЛАНДШАФТНОЇ_ЕКОЛОГІЇ_КРИВОРІЖЖЯ.pdf.
14. Режим доступу: <https://opendatabot.ua/c/00191023>.
15. Режим доступу: https://mepr.gov.ua/files/docs/ДНІПРОПЕТРОВСЬКА_ОБЛАСТЬ.pdf.4.

A. Bodyuk¹, Cand. Sc. (Economics), ORCID 0000-0002-6200-1784

V. Rozen¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-0440-4251

O. Terentiev¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2523-2804

A. Kruchkov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-2234-0546

M. Sergienko¹, teacher, ORCID 0000-0001-8284-9072

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

POLLUTION OF GROUNDWATER RESOURCES BY PROCESSES IRON ORE SURFACE USE

In Ukraine, as in most countries of the world, preservation of the natural qualities of surface and underground water resources is one of the difficult to solve problems. Groundwater pollution is carried out spontaneously and as a result of organized emissions on the surface of territories and into underground cavities. Contaminated areas of territories around mineral deposits, industrial facilities, as well as masses of pollutants, are growing. In terms of scale, it is necessary to single out groundwater pollution as a result of ore extraction and placement of rocks in dumps, as the most harmful for agricultural lands and surface water bodies. Calculating the amount of compensation for damages caused by contamination of groundwater with harmful substances requires further official adjustments, taking into account the factor of public ownership of natural resources in general.

Therefore, it is necessary that the following situations are officially taken into account in the normative legal acts of local authorities: underground waters and their environment belong to objects of public property, therefore, in the methods of determining and calculating the ecological consequences of pollution of underground waters and their underground environment, it is necessary to provide that damages must be studied and assessed from the point of view of damage to public property; polluted underground waters and their underground environment are located locally on the territories of territorial Starostov districts, which represent the people of Ukraine; in accordance with clause 1, when calculating the amount of compensation for pollution, it is generally necessary to determine the losses for the population of these districts and the amounts of charges and payments to them; local authorities need to organize compensation processes, monitor their implementation and effectiveness.

The definition of an environmental tax does not correspond to the definition of the concept of a tax as an unconditional payment to the budget, since in its essence it is a punishment for the discharge of polluted substances into water bodies and ecological pollution of water resources.

Keywords: groundwater, resources, water resources, public property, pollution, environmental tax.

Надійшла: 05.03.2024

Received: 05.03.2024

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 621.039.586

DOI 10.20535/1813-5420.2.2024.303099

Ю.А. Онищук¹, аспірант, ORCID 0000-0002-3556-2922
С.В. Клевцов¹, канд. техн. наук., доцент, ORCID0000-0003-1405-5048

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

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ НА РУ ВВЕР-1000 ЗІ ЗАСТОСУВАННЯМ СПРЯЖЕНОГО ПІДХОДУ

Дослідження та моделювання теплогідралічних процесів в обладнанні АЕС необхідне для глибокого та вдосконаленого обґрунтування надійної та безпечної експлуатації ядерних установок. З урахуванням накопиченого досвіду та новітніх технологій, дослідження теплогідралічних процесів розвивається в напрямку застосування інноваційних підходів до проведення як експериментальних досліджень так і розширення розрахункових можливостей теплогідралічних кодів.

В статті представлено підхід до декомпозиції теплогідралічної моделі реакторної установки ВВЕР-1000 на підмоделі, які розраховуються в спряженні окремими екземплярами системного теплогідралічного коду RELAP5/Mod 3.2. Реалізація спряження здійснюється за допомогою спеціально розробленого модуля спряження. Такий підхід дозволяє «обійти» внутрішні обмеження RELAP5 в кількості компонентів (гідродинамічних об'ємів, теплових структур, «тріпів» та контрольних змінних), які можуть використовуватися для розрахункового аналізу. В результаті з'являється можливість досягти вищого ступеню деталізації для всієї реакторної установки. Окрім того, в статті підтверджується можливість застосування раніше розробленого модуля спряження на такій нерівноважній моделі, як модель ядерного реактора. При цьому застосування в якості моделі реактору RELAP5-моделі, дає можливість уникнути неточностей, які виникають при застосуванні припущень щодо поперечних профілів вхідних змінних CFX-моделі, а також виконати валідацію RELAP5-моделі петель РУ.

Виконується спряжений розрахунок стаціонарного та перехідного режиму РУ ВВЕР-1000. Проводиться оцінка достовірності результатів розрахунків, отриманих в спряженні, шляхом їх порівняння з результатами автономних розрахунків в RELAP5. Аналіз результатів розрахункового моделювання підтверджує можливість застосування розробленого модуля спряження на такій нерівноважній моделі, як модель ядерного реактора, а також підтверджує коректність RELAP5-моделі петель реакторної установки отриманої на основі модифікації повноцінної RELAP5-моделі.

Ключові слова: аварійний процес, перехідний процес, максимальна проектна аварія, моделювання, спряження, теплогідралічні процеси, РУ ВВЕР-1000, RELAP5.

Вступ

Вдосконалення моделювання аварійних процесів на АЕС потребує як додаткових експериментальних даних, так і розробки нових підходів в розрахункових методах. Одним зі шляхів до зменшення невизначеності є проведення додаткових аналізів вже наявних результатів досліджень та розробка більш деталізованих розрахункових засобів моделювання.

У рамках аналізу безпеки АЕС виникає потреба розширення моделей реакторних установок для теплогідралічних кодів, таких як RELAP5, для можливості більш детального та реалістичного моделювання локальних явищ різних аварійних сценаріїв. Так в роботі [1] для врахування ефектів стратифікації і перемішування теплоносія в холодних та гарячих петлях проводяться зміни в їх нодалізації шляхом дворівневого моделювання. Таке рішення дає можливість більш коректного моделювання, наприклад, роботи САОЗ на петлі з низькою швидкістю циркуляції теплоносія, в яких може виникати температурне розшарування теплоносія. Як наслідок, потрапляння такого теплоносія в опускную камеру реактору, може призводити до зміни картини руху в ній. Для реалізації можливості квазі-двовимірного моделювання опускної ділянки реактору в роботах [2, 3] проводиться її розбиття, що дає можливість більш

реалістичного моделювання поведінки теплоносія при наявності, як описано вище, неоднорідності температури теплоносія за перерізом ГЦТ. Даний підхід в свою чергу дає можливість здійснити оцінку термічних навантажень на корпусу реактору та ризик його руйнування [4].

Існує ще достатня кількість завдань, які вимагають більш комплексної деталізації систем та елементів реакторної установки. Однак, враховуючи власні обмеження RELAP5 в кількості компонентів (гідродинамічних об'ємів, теплових структур, «тріпів» та контрольних змінних), які можуть використовуватися для розрахункового аналізу, наразі неможливо досягти високого ступеню деталізації для всієї реакторної установки. Одним зі способів вирішення цього завдання є застосування спряженого підходу, що дозволить здійснити поділ загальної теплогідролічної моделі реакторної установки на підмоделі, які будуть розраховуватися окремими екземплярами коду RELAP5. При цьому обмін даними відбуватиметься через граничну передачу даних між підмоделями.

Окрім того, в рамках продовження роботи [5], що стосується розробки та тестування модулю спряження RELAP5/CFX на простих теплогідролічних моделях, існує необхідність підтвердження можливості застосування розробленого модуля спряження на такій нерівноважній моделі, як модель ядерного реактора. При цьому застосування в якості моделі реактору RELAP5-моделі, дасть можливість уникнути неточностей, які виникають при застосуванні припущень щодо поперечних профілів вхідних змінних CFX-моделі, а також виконати перевірку коректності розробленої RELAP5-моделі петель РУ.

Мета та завдання

Метою роботи є розширення модулю спряження для RELAP5/RELAP5-спряжених моделей, що дозволить:

- «обійти» внутрішні обмеження RELAP5 щодо загальної кількості компонентів і об'ємів, які застосовуються в розрахунковому аналізі реакторної установки;
- підтвердити коректність розробленого модуля спряження на такій нерівноважній моделі, як модель ядерного реактора;
- підтвердити коректність RELAP-моделі петель РУ, отриманої на основі модифікації повноцінної RELAP-моделі РУ ВВЕР-1000.

Матеріал і результати дослідження

Процедура спряження в загальному випадку обов'язково має включати обмін даних між різними областями застосування кодів, що породжує три ключові питання: які дані передаються, коли передаються і спосіб їх передачі. Тип даних, що передаються, обумовлений граничними умовами спряження та просторовою декомпозицією розрахункової області між кодами, реалізація якої можлива шляхом «перекриття» або безпосередньої «декомпозиції». В даній роботі, враховуючи її мету, застосовується підхід з «декомпозицією», що полягає у поділі системи, яка моделюється, на дві дискретні області: одна моделюється за допомогою одного екземпляру коду, а інша – за допомогою другого.

Час і метод обміну даними між областями розрахункової моделі залежать від обраної числової схеми обміну даними. При явній числовій схемі обміну даними, яка застосовувалася в роботі [5], здійснюються послідовні обчислення кодами без фактичної перевірки та синхронізації результатів. Кожен код виконує одноразове обчислення і отримані результати використовуються в якості нових граничних умов для іншого коду. Перевагою такої схеми є відносно легка реалізація, а також швидший час обчислень, оскільки граничні умови не змінюються протягом одного часового кроку. Однак, вона більш схильна до нестабільності, розбіжності рішень та суперечливості результатів, внаслідок обмеження розміру кроку в часі межею Куранта-Фрідріха-Леві [6]. Тому застосування даної схеми вимагає обов'язкового аналізу прийнятого часового кроку розрахунку. Покращення збіжності рішення в явній числовій схемі можливе шляхом застосування часової релаксації, що обмежує зміну пов'язаних граничних умов між кроками спряження. Однак це рекомендується лише для розрахунків стаціонарного стану або дуже повільних перехідних процесів, оскільки часова релаксація безпосередньо впливає на спотворення результатів розрахунку в часі [7].

Напівявна числова схема обміну даними, що застосовується в даній роботі, забезпечує узгодженість отриманих результатів на інтерфейсі між розрахунковими областями, шляхом ітераційних обчислень перед переходом до наступного часового кроку. Основна ідея даної схеми полягає в тому, що результати, надані кожним кодом, повторно використовуються в якості оновленої граничної умови для іншого, з оцінкою узгодженість отриманих результатів за критерієм прийнятності, визначеним користувачем. Якщо критерій прийнятності виконується, схема переходить до наступного часового кроку, а якщо ні – виконується ще одна внутрішня ітерація та обчислення для того самого часового кроку з оновленими граничними умовами. Такий підхід забезпечує надійне спряження та дає можливість застосування на швидких перехідних процесах та з використанням більшого часового кроку без виникнення нестабільності [8].

Опис розрахункової моделі

Розробка розрахункової моделі для коду RELAP5/Mod 3.2 виконана шляхом модифікації теплогідролічної моделі енергоблоку №1 ЗАЕС з РУ ВВЕР-1000/В-320 [9]. Базова вихідна модель

являється чотирьохпетлевою і орієнтована на реалістичні розрахунки процесів в РУ. Модель верифікована та валідована на репрезентативних інцидентах ЗАЕС та використовувалася для аналізу запроектованих аварій енергоблоків ВВЕР-1000.

В якості граничних умов на інтерфейсі спряження моделі петель застосовуються:

- параметри на входах в гарячі петлі – масова витрата та температура, значення яких отримуються з крайніх об'ємів на виходах моделі реактору;

- параметри на виходах з холодних петель – тиски, значення яких отримуються з крайніх об'ємів на входах моделі реактору.

В свою чергу для моделі реактору встановлюються наступні граничні умови:

- параметри на входах в реактор – масова витрата та температура, значення яких отримуються з крайніх об'ємів моделі холодних петель;

- параметри на виходах з реактору – тиски, значення яких отримуються з перших об'ємів моделі гарячих петель.

В теплогідравлічному коді RELAP5 рівняння маси та енергії вирішуються в контрольних об'ємах, а рівняння імпульсу розв'язуються в компонентах з'єднання, тобто в обох об'ємах. Таким чином, величини, які виходять із розв'язку рівнянь маси та енергії, наприклад тиск і температура, обчислюються в центрі вузлів. Натомість, такі величини, як швидкість і масова швидкість потоку, які виходять із розв'язку рівняння імпульсу, оцінюються на межі розділу між двома суміжними об'ємами. Враховуючи це, для задання граничних умов в RELAP5 доцільно застосовувати три основні компоненти: «Time-Dependent Volume Component» (TDV), «Single-Junction Component» (SJ) та «Time-Dependent Junction Component» (TDJ).

Компонент TDV дає можливість накласти на модель граничні умови, пов'язані з об'ємом, наприклад, тиск чи температуру теплоносія. Для реалізації спряження даних компонент застосовується на виході теплоносія з петель та вході в них. На виході теплоносія з моделей петель та реактору компонент TDV дає змогу задання тиску. При цьому він приєднується до решти обчислювальної моделі петель за допомогою «Single-Junction Component» та активно взаємодіє з рештою моделі. На вході в моделі петель та реактору компонент TDV використовується для задання температури теплоносія. В даному випадку він приєднується до решти обчислювальної моделі петель за допомогою «Time-Dependent Junction Component», що забезпечує накладання на модель граничної умови потоку – масової витрати або швидкості. При цьому тиск, що визначений в TDV, використовується лише для визначення термодинамічного стану теплоносія, що надходить у петлі.

На рисунку 1 показано модифіковану частину петель та реактору, що застосовується для встановлення граничних умов при спряженні.

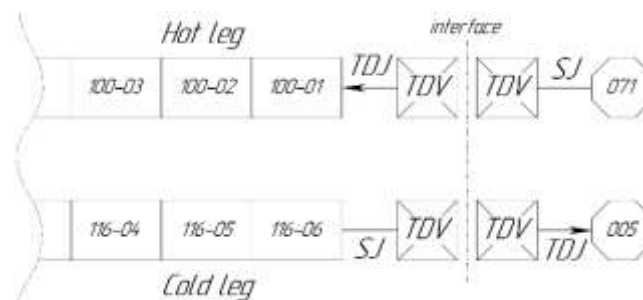


Рисунок 1 – Модифікована частина RELAP-моделі 1-ої циркуляційної петлі та реактору

Ініціалізація стаціонарного стану

Розрахункова процедура складається з кількох послідовних етапів ініціалізації початкового спряженого стаціонарного стану. На початковому етапі проводиться автономний розрахунок стаціонарний стану повноцінної RELAP5-моделі РУ ВВЕР-1000. Далі новим рестартом проводиться розрахунок петель РУ на модифікованій RELAP-моделі. При цьому входи теплоносія в гарячі петлі в петель, перемодельовуються відповідно до рисунку 1 на «Time-Dependent Volume Component» із заданням температури в поєднанні з «Time-Dependent Junction Component» із заданням масової витрати. Виходи теплоносія з холодних петель – «Time-Dependent Volume Component» із заданням тиску в поєднанні з «Single-Junction Component». Після завершення розрахунку модуль спряження отримує результати на інтерфейсі спряження зі сторони контуру. Процедура отримання результатів відбувається за допомогою «strip-блоку»: у вхідному «strip-файлі» вказуються змінні, величини яких необхідно витягнути з вихідного файлу RELAP5; після цього запускається процедура генерації вихідного «strip-файлу», в якому записуються результати. Отримані результати встановлюються в моделі реактору в якості граничних умов, після чого розпочинається її розрахунок. На основі отриманих параметрів RELAP-моделей контуру та

реактору проводиться спряжений стаціонарний розрахунок за напівнеявною схемою.

Результати розрахунку, які показані на рисунках 2 - 7, демонструють стабілізацію основних параметрів РУ на номінальних значеннях і підтверджують коректність створеної моделі, що дає змогу використовувати її для розрахунків перехідних аварійних процесів.

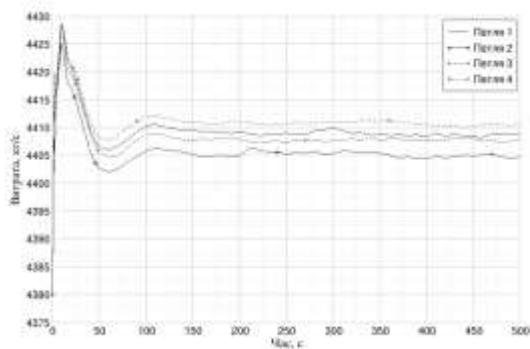


Рисунок 2 – Масова витрата на вході в реактор

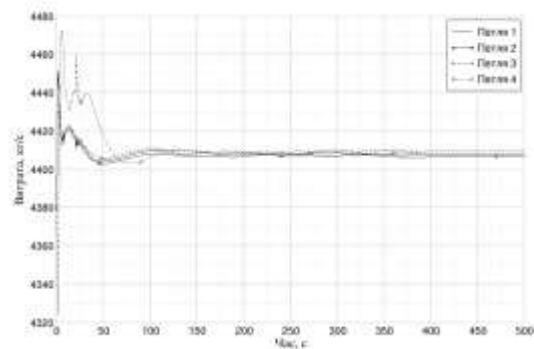


Рисунок 3 – Масова витрата на виході з реактору

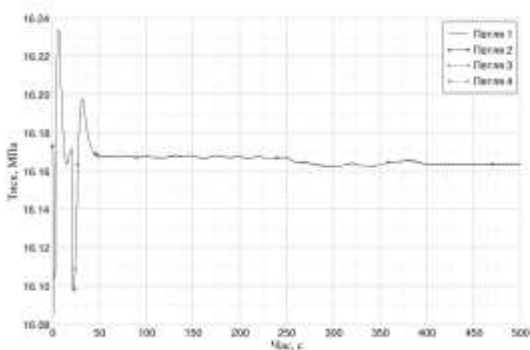


Рисунок 4 – Тиск на вході в реактор

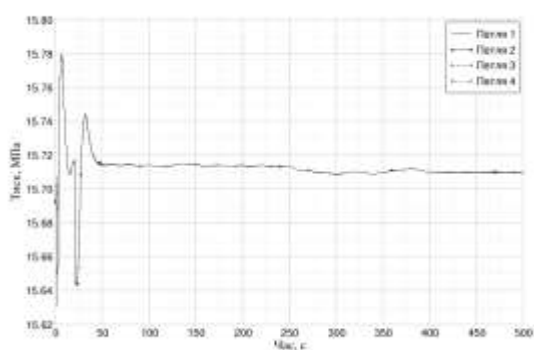


Рисунок 5 – Тиск на виході з реактору

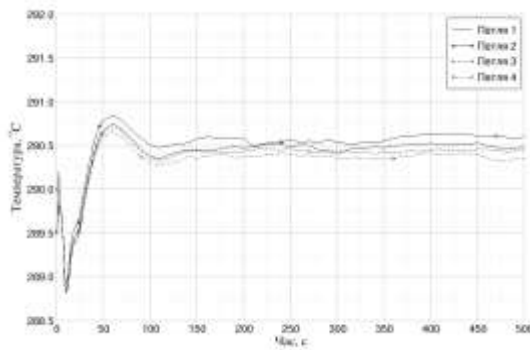


Рисунок 6 – Температура на вході в реактор

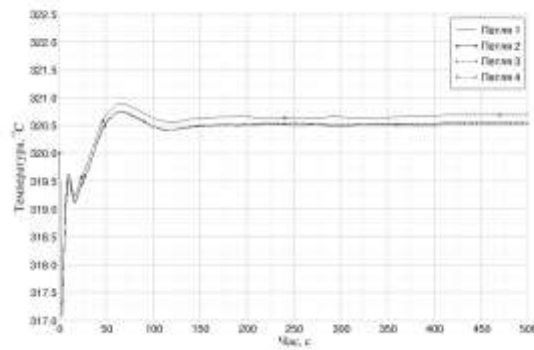


Рисунок 7 – Температура на виході з реактору

Спряжений розрахунок перехідного процесу

В якості вихідної події обрана максимальна проектної аварія (МПА) для реакторів типу ВВЕР-1000. В детерміністичному аналізі безпеки АЕС дана аварія розглядається як «Велика течя» (LOCA) внаслідок гільйотинного розриву циркуляційної петлі еквівалентним діаметром 2×850 мм.

В рамках даної роботи розрахункове моделювання виконано для перших 15 с аварійного процесу, що охоплює перший пік температури оболонок твел.

Вихідна подія призводить до утворення течі сумарною витратою в перший момент близько 47 т/с (див. рисунок 8). В результаті, як показано на рисунку 9, відбувається різке зниження тиску першого контуру і вскипання теплоносія. Оскільки місце розриву приймається на холодній нитці, тобто на вході в реактор, то відбувається розворот потоку теплоносія в активній зоні. Це призводить до підвищення температури оболонок твел в перші секунди зі швидкістю близько 300°C/с, і близько 50°C/с до 5 с (див. рисунок 10). Температура палива має тенденцію до зниження (див. рисунок 11) через дію зворотних зв'язків за густиною теплоносія, а також через припинення ланцюгової реакції внаслідок спрацювання аварійного захисту. На рисунках 12 - 13 показана масова витрата теплоносія на інтерфейсі спряження на вході та виході з реактора.

Загалом порівняння результатів моделювання аварійного процесу зі застосуванням спряженого підходу демонструє хорошу відповідність результатам отриманих при автономному моделюванні з використанням повноцінної моделі реакторної установки.

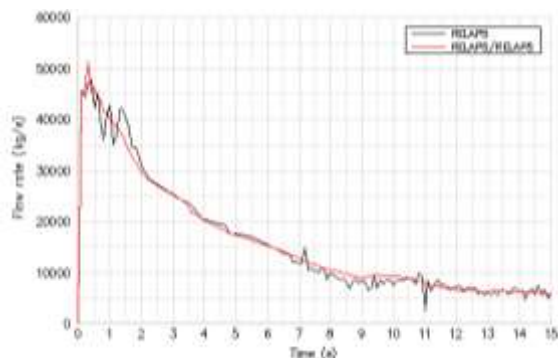


Рисунок 8 – Масова витрата в течу

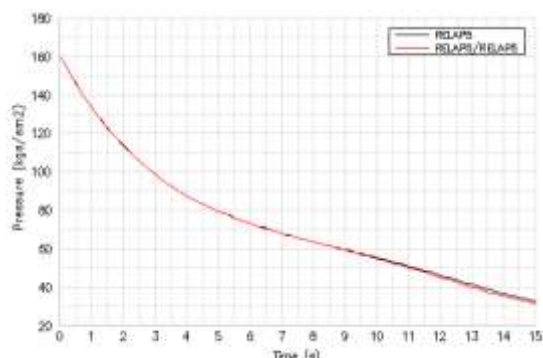


Рисунок 9 – Тиск в першому контурі

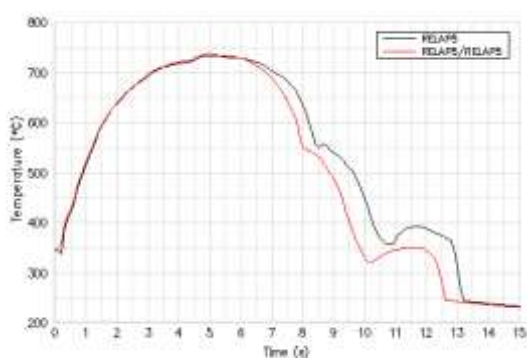


Рисунок 10 – Максимальна температура оболонки твела

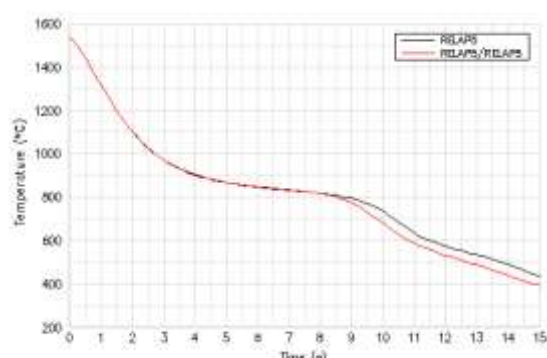


Рисунок 11 – Максимальна температура палива

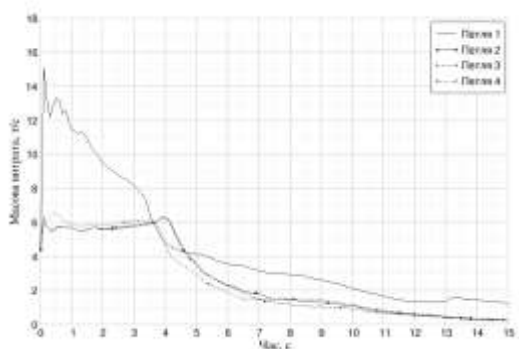


Рисунок 12 – Масова витрата на інтерфейсі спряження на вході в реактор

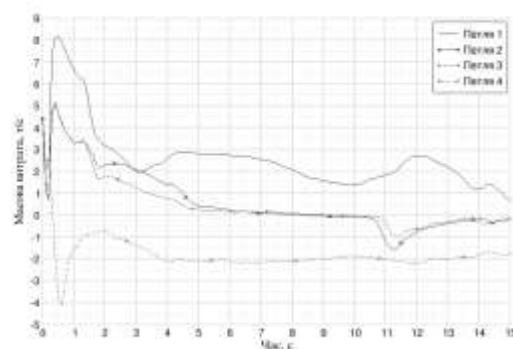


Рисунок 13 – Масова витрата на інтерфейсі спряження на виході з реактору

Висновки

Системний теплогідравлічний код RELAP5 містить велику кількість загальних моделей компонентів, за допомогою яких можна моделювати теплогідравлічні системи. Однак, враховуючи власні обмеження RELAP5 в кількості таких компонентів, неможливо досягти значно більшого ступеню деталізації для всієї реакторної установки, в порівнянні з тим, що застосовується в даний час.

У статті наведено підхід до декомпозиції теплогідравлічної моделі реакторної установки ВВЕР-1000 на підмоделі, яка розраховується в спряженні окремими екземплярами системного теплогідравлічного коду RELAP5/Mod 3.2. Керування розрахунком здійснюється за допомогою розробленого модулю спряження. Даний підхід дозволяє значно деталізувати створені підмоделі реакторної установки шляхом ренодалізації систем та елементів реакторної установки на більшу кількість RELAP5-компонетів.

Результати отримані при моделюванні максимальної проекційної аварії зі застосуванням спряженого підходу близькі до тих, що отриманні при автономному моделюванні з використанням повноцінної моделі реакторної установки. Це дозволяє зробити висновок щодо можливості застосування розробленого модуля

спряження на такій нерівноважній моделі, як модель ядерного реактора, а також підтверджує коректність RELAP5-моделі петель РУ, отриманої на основі модифікації повноцінної RELAP5-моделі РУ.

Список використаної літератури

1. Воробьев Ю. Ю., Терещенко И. А. Моделирование температурного расслоения в главном циркуляционном трубопроводе при естественной циркуляции теплоносителя первого контура для оценки термошока корпуса реактора с помощью кода RELAP5/MOD3.2. Ядерна та радіаційна безпека. 2013. № 1. С. 14–21.
2. Воробьев Ю. Ю. Теплогидравлическая модель реактора ВВЭР-1000 для получения граничных условий для оценки сопротивления хрупкому разрушению с использованием компьютерного кода RELAP5/MOD3.2. Ядерна та радіаційна безпека. 2011. № 2 (50). С. 13–19.
3. Модель опускного участка реактора ВВЭР-1000. Ю. П. Алексеев та ін. Ядерна та радіаційна безпека, 2011. № 3 (51). С. 44-46.
4. Technical Basis for Revision of the Pressurized Thermal Shock (PTS) Screening Limit in the PTS Rule (10 CFR 50.61) // NUREG-1806, Vol. 1. Summary Report. 2007.
5. Онищук Ю. А., Клевцов С. В. Модуль спряження RELAP5-CFX: тестування на простих теплогидравлических моделях. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2022. №3. С. 98-106. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.272087>.
6. Mahgerefteh H., Rykov Y., Denton G. Courant, Friedrichs and Lewy (CFL) impact on numerical convergence of highly transient flows. Chemical Engineering Science. № 64. pp. 4969–4975.
7. Bertolotto D. Coupling a System Code with Computational Fluid Dynamics for the Simulation of Complex Coolant Reactivity Effects. № 5227. 2011.
8. Coupled system thermal Hydraulics/CFD models: General guidelines and applications to heavy liquid metals / A. Pucciarelli and other. Annals of Nuclear Energy № 153. 2021.
9. Запорожская АЭС. Энергоблок №1. Отчет по анализу безопасности. Анализ запроектных аварий. Адаптация. Итоговый отчет. EP43-2008.3811.ОД.2.

Y. Onyshchuk¹, Ph.D. student, ORCID 0000-0002-3556-2922

S. Klevtsov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-1405-5048

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

SIMULATION OF TRANSIENT PROCESS ON WWER-1000 USING COUPLED APPROACH

Research and modeling of thermohydraulic processes in NPP equipment is necessary for a deep and improved justification of reliable and safe operation of nuclear installations. Taking into account the accumulated experience and the latest technologies, the study of thermohydraulic processes is developing in the direction of applying innovative approaches to conducting both experimental studies and expanding the calculation capabilities of thermohydraulic codes.

The article presents an approach to the decomposition of the thermohydraulic model of the WWER-1000 reactor plant on submodels, which are calculated in coupling with separate instances of the system thermohydraulic code RELAP5/Mod 3.2. Coupling is implemented using a specially developed module. This approach allows you to "bypass" the internal limitations of RELAP5 in the number of components (hydrodynamic volumes, thermal structures, "trips" and control variables) that can be used for computational analysis. As a result, it becomes possible to achieve a higher degree of detail for the entire reactor installation. In addition, the article confirms the possibility of applying the previously developed coupling module to such a non-equilibrium model as a nuclear reactor model. At the same time, the use of the RELAP5 model as a reactor model makes it possible to avoid inaccuracies that arise when applying assumptions about the transverse profiles of the input variables of the CFX model, as well as to perform the validation of the RELAP5 model of the RU loops.

Coupled calculation of stationary and transient mode of reactor installation WWER-1000 is performed. The reliability of calculation results obtained in conjugation is evaluated by comparing them with the results of autonomous calculations in RELAP5. The analysis of the results of computational modeling confirms the possibility of applying the developed coupling module to such a non-equilibrium model as a model of a nuclear reactor, and also confirms the correctness of the RELAP5 model of the loops of the reactor plant obtained on the basis of the modification of the full-fledged RELAP5 model.

Keywords: emergency process, transition process, maximum design accident, modeling, coupling, thermohydraulic processes, WWER-1000, RELAP5.

References

1. Yu. Yu. Vorobyev, I. A. Tereshchenko, "Modeling of temperature stratification in the main circulation pipeline during natural circulation of the coolant of the first circuit to estimate the thermal shock of the reactor body using the RELAP5/MOD3.2 code", Nuclear and radiation safety, № 1, pp. 14-21, 2013.
2. Yu. Yu. Vorobyov, O. R. Kocharyants, "WVER-1000 Thermal/Hydraulic Model for Determining Boundary Conditions for Fracture Toughness Assessment with Use of RELAP5/MOD3.2 Computer Code", Nuclear and radiation safety, № 2 (50), pp. 13-19, 2011.
3. Yu. P. Alekseev, A. I. Berezhnoi, A. S. Mazurok, A. V. Kornysky "Model of the descent section of the VVER-1000 reactor", Nuclear and radiation safety, № 3(51), pp. 44-46, 2011.
4. Technical Basis for Revision of the Pressurized Thermal Shock (PTS) Screening Limit in the PTS Rule (10 CFR 50.61) // NUREG-1806, Vol. 1. Summary Report, 2007.
5. Y. A. Onyshchuk, S. V. Klevtsov, "RELAP5-CFX coupling module: testing on simple thermohydraulic models", POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology, № 3. pp. 98-106, 2022, Available: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.272087>.
6. H. Mahgerefteh, Y. Rykov, G. Denton "Courant, Friedrichs and Lewy (CFL) impact on numerical convergence of highly transient flows", Chemical Engineering Science, № 64. pp. 4969-4975.
7. D. Bertolotto "Coupling a System Code with Computational Fluid Dynamics for the Simulation of Complex Coolant Reactivity Effects", № 5227, 2011.
8. A. Pucciarelli, A. Toti, D. Castelliti, F. Belloni, K. Van Tichelen, M. Moscardini, F. Galleni, N. Forgiione "Coupled system thermal Hydraulics/CFD models: General guidelines and applications to heavy liquid metals", Annals of Nuclear Energy, № 153, 2021.
9. Zaporizhzhia NPP, Power unit №1, "Security analysis report. Analysis of extra-design accidents. Adaptation. Final report", ER43-2008.3811.OD.2.

Надійшла: 18.03.2024

Received: 18.03.2024

Б.І. Басок^{1,2}, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8935-4248

О.М. Недбайло^{1,2}, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ORCID 0000-0003-1416-9651

Д.Б. Давиденко¹, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ORCID 0009-0003-5791-1980

Н.Г. Беспала², магістрант, ORCID 0000-0002-4466-6491

¹Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФІЗИЧНІ ЧИННИКИ ВПЛИВУ ВИБУХУ НА ОГОРОДЖУВАЛЬНІ СВІТЛОПРОЗОРИ КОНСТРУКЦІЇ. ОГЛЯД МЕТОДІВ ТЕСТУВАННЯ

В статті розглянуті основні фізичні параметри вибухової хвилі, властивості вибухових навантажень, а також особливості розповсюдження хвиль у просторі та їхній динамічний вплив на огороджувальні конструкції, в т.ч. світлопрозори. Розглянуті часові та просторові умови, за яких має місце формування квазіплоского фронту вибухової хвилі та вибухові навантаження можна розглядати як розподілені рівномірно за вертикальною площиною. Якщо відстань до вибухового заряду перевищує половину значення ширини та висоти споруди або її елемента (за умови, що заряд розташовано по центру конструкції або елемента), то навантаження на них можна вважати наближено усередненими за площею. Проаналізовані теплофізичні чинники впливу, яким повинна протистояти будівельна конструкція. Описані основні відмінності вибухових і ударних впливів від статичних навантажень, що враховуються під час будівельного проектування.

Розглянуті основні натурні методи визначення параметрів вибухової хвилі у режимі реального часу та чинники її руйнівного впливу на елементи огороджувальних конструкцій будівель.

Ключові слова: вибух, детонація, вибухова хвиля, вибухове навантаження, огороджувальна світлопрозора конструкція.

Вступ

Для того, щоб розробити критерії визначення конструктивних характеристик, а згодом і критерії випробувань для вибухостійкого скління, необхідно визначити фактори, що слід враховувати під впливом вибуху.

Окрім системних досліджень руйнівного впливу вибухів під час ведення воєнних дій також актуальною є потреба в розробленні вибухостійкого скла для захисту від випадкових аварійних газових або нафтохімічних вибухів. Однак у цьому випадку вибухові хвилі матимуть значно нижчий тиск і більшу тривалість, ніж вибухові хвилі від фугасних подій. Вибухові навантаження найчастіше прийнято розглядати як похідні екзотермічних реакцій, що відбуваються наслідок детонації, втім ударні хвилі в повітрі можуть виникати також у результаті розриву посудин під тиском і високої швидкості розповсюдження фронту полум'я під час згоряння.

Міські сценарії детонації можуть призвести до різних і більш складних профілів навантаження. Можливі ефекти посилення або затінення можна розглядати в рамках методів тестування.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є аналіз фізичних чинників руйнівного впливу вибухових ударних хвиль на огороджувальні (в т.ч. світлопрозорі) конструкції будівель.

Основним завданням при цьому є визначення оптимальних до використання в лабораторних умовах методів досліджень відповідних параметрів вибухових хвиль, а також їхнього динамічного впливу на огороджувальні конструкції (в т.ч. світлопрозорі).

Матеріал і результати дослідження

Властивості ударних хвиль. Зазвичай клас вибуху в разі миттєвого займання або детонації встановлюється в залежності від виходу наявної енергії. Це зазвичай відбувається у вигляді потужного удару, що викликаний динамічним впливом (імпульсом), детонацією первинної вибухової речовини або ж внаслідок нагрівання середовища від тертя поверхонь. Під час вибуху ініціюється детонатор із чутливою первинною вибухівкою, що створює ударну хвилю, яка поширюється з надзвуковою швидкістю через основний вторинний заряд вибухової речовини, викликаючи відповідну швидку та стабільну хімічну реакцію. Швидкість детонації при цьому може досягати значення до 8000 м/с для високоякісних військових вибухівок. Детонаційна хвиля (стрибок ущільнення середовища) перетворює вибухівку на суміш гарячих газів під високим тиском, що спричиняють ударний фронт в повітрі та продовжують розширюватися для підтримання вибухової хвилі.

Існує ряд ефектів, що викликаються детонацією заряду фугасної речовини.

Бризанс (руйнівна здатність вибухівки), як вплив надлишкового тиску середовища. Якщо вибухівку підірвано в контакт з об'єктом (будівлею) або дуже близько до нього, високошвидкісна ударна хвиля пошириться безпосередньо до огорожувальних конструкцій. Це основний спосіб навантаження на конструкції після вибуху. Наслідки від цього залежатимуть від швидкості детонації вибухової речовини, що набагато вища для військових вибухових речовин, ніж для промислових вибухових речовин.

Тепловий вплив. Високотемпературні гази, що утворюються в результаті детонації вибухової речовини, випромінюють теплоту і можуть спричинити теплові пошкодження внаслідок утворення термічних напружень розширення матеріалів поблизу місця вибуху.

Якщо вибух відбувається у відкритому повітрі та поблизу землі, ударна хвиля поширюватиметься у півкулі. При внутрішніх вибухах ударна хвиля відбиватиметься від стін, підлоги та стелі. Це відбувається неодноразово зі зниженою інтенсивністю, створюючи складне поле тиску. Якщо немає отворів, через які гази виходять, вони зрештою досягнуть рівномірного та стабільного тиску. Такий стан простору характеризується як квазістатичний.

Якщо вибух відбувся на поверхні землі ударна хвиля, що спричиняє утворення кратера, буде проходити через ґрунт та спричинятиме його пружні коливання, що призводять передаються на об'єкти та можуть призводити до їхньої деформації та руйнування.

Поширення ударної хвилі в повітрі за межі вибухового матеріалу після детонації називається **вибуховою хвилею**.

Залежно від амплітуди та форми профілю хвилі, а також від властивостей середовища, в якому хвиля поширюється, слід розрізняти пружні та пластичні хвилі.

Хвилі стиснення на великій відстані від джерела демонструють якісно однакові характеристики, незалежно від сценарію (Sauer *et al.*, 2020) [1]. У випадках контактної детонації та близької детонації характеристики хвиль стиснення можуть сильно відрізнятися.

Ударні хвилі (у вигляді залежності тиску p від часу t) характеризуються *фазою стиснення* (позитивна фаза t_0^+) з високим (піковим) значенням тиску p_{s0}^+ і наступною *фазою розрідження* його до значення p_{s0}^- , що менший за атмосферний p_0 (негативна фаза t_0^-) (рис. 1).

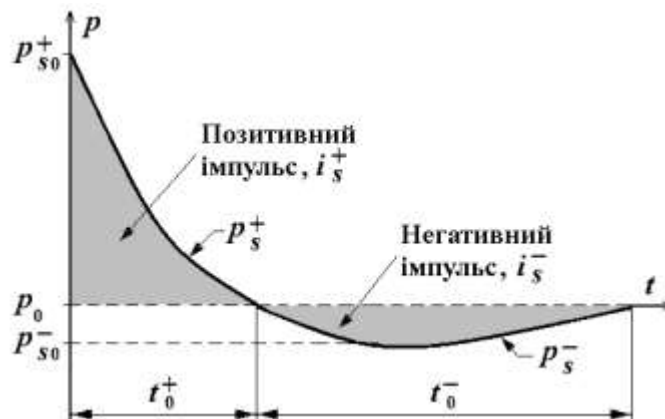


Рисунок 1 - Залежність тиску вибухової хвилі від часу її розповсюдження у вільному просторі

Фаза стиснення починається з ударного фронту.

Вибухи відрізняються швидкістю процесу горіння. У разі *детонації* вибухової речовини процес відбувається зі швидкістю *вищою за швидкість звуку* у вибуховій речовині, тоді як *швидкість дефлаграції є нижчою*.

В ідеальних умовах вибухові хвилі поширюються сферично, якщо немає перешкод, що здійснюють відбиття.

Зі збільшенням відстані між навантаженою конструкцією і джерелом вибуху ударна хвиля стає близькою до плоскої. Це призводить до квазіплоского навантаження, що характеризується певним значенням тиску в момент часу в будь-якій точці огорожувальної (в т.ч. світлопрозорої) конструкції.

Міські сценарії детонації можуть призвести до різних і більш складних профілів навантаження (Gebben *et al.*, 2012) [2]. Можливі ефекти посилення або затінення можна розглядати в рамках методів тестування (NATO 2008, STANAG 2280) [3].

Ударні хвилі сильно відрізняються від лінійних пружних хвиль щодо їх розширення та поширення. Дуже високі амплітуди тиску характеризують стан середовища у нелінійній області кривої залежності тиск – щільність (Riedel *et al.*, 2004) [4].

Оскільки швидкість поширення хвилі залежить від градієнту кривої залежності тиск - щільність (рис. 2), пік хвилі **b** поширюється швидше, ніж її передній **a** і задній фронти, що призводить до формування крутого ударного фронту (зображено праворуч), що характеризується розривом функції тиску та щільності у напрямку поширення.

Ліворуч: співвідношення тиск – щільність, праворуч: утворення фронту ударної напруги (*Riedel ma in., 2010*) [5].

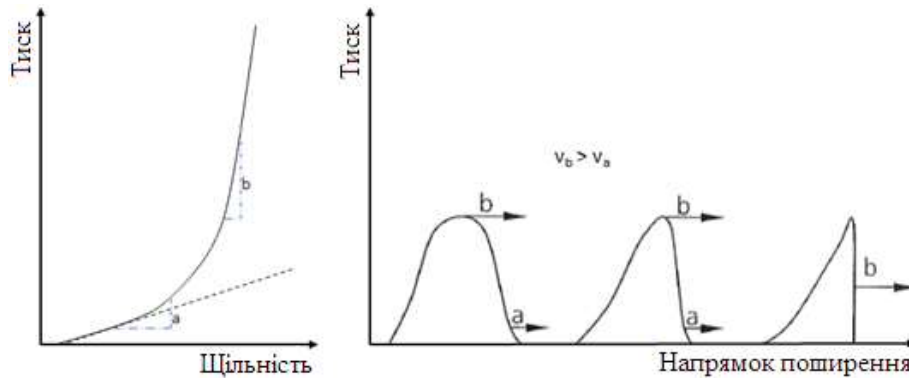


Рисунок 2 – Схема утворення та розповсюдження ударних хвиль

Найвищий тиск виникає на близькій відстані від джерела детонації. Зі збільшенням відстані від джерела детонації тиск сильно знижується. Піковий тиск у контактному сценарії детонації досягає значення в декілька ГПа за дуже короткий час (мікросекунди). Повітряний вибух від детонації з великою дистанцією поміж джерелом і структурою призводить до значного зниження тиску (кПа) і тривалості навантаження в мілісекундах. Через це існує різниця між сценаріями навантаження на огорожувальні конструкції.

Класифікація детонаційного сценарію можлива через застосування масштабованої відстані Z , що визначена як

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

де R – відстань від джерела детонації до навантаженої (в т.ч. світлопрозорої) конструкції, м;
 W – маса заряду вибухівки (в тротиловому еквіваленті), кг.

Відповідно до (*Riedel ma in., 2010*) [5], таблиця 1 нижче узагальнює деякі сценарії класифікації навантажень і відповідні масштабовані відстані для залізобетонних і легких конструкцій.

Таблиця 1 – Класифікації навантажень і відповідні масштабовані відстані для залізобетонних і легких конструкцій під впливом вибуху

Навантажена конструкція	Масштабована відстань Z	Сценарій
Залізобетонні конструкції	$Z < 0,5$	Близька детонація
	$Z > 0,5$	Вибух
Легкі конструкції	$Z < 2-6^*$	Контактна детонація
	$Z > 2-6^*$	Вибух

Контактна детонація характеризується високим тиском, що навантажує структуру лише на мікросекунди. Вплив на структуру локальний. Активується руйнування при зсуві та продавлюванні, що, залежно від міцності та пластичності навантаженого матеріалу, призводить до фрагментації як з боку навантаження, так і з тильної сторони конструкції.

Вибухове навантаження призводить до навантаження великої або повної площі задіяної конструкції. Тиск значно нижчий, що призводить до менших пошкоджень (таблиця 2). Це призводить до глобальної структурної реакції, наприклад до пошкодження через вигин.

Видно, що в динамічному навантаженні елементів конструкції бризантними вибуховими речовинами домінує маса заряду та відстань поміж джерелом детонації та елементом.

Європейські та міжнародні стандарти почали забезпечувати класифікацію «вибухобезпечної стійкості» скляних конструкцій, вікон і дверей. Наприклад, європейський стандарт EN13123-1 [6] визначає

типову історію вибухового навантаження від тиску та часу, що повинна бути реалізована в класифікаційних випробуваннях з ударними трубами та детонаціями у вільному полі (CEN) [7].

Таблиця 2 – Параметри окремих сценаріїв вибухових подій

Сценарій	Тиск, МПа	Швидкість деформації, s^{-1}	Пошкодження
Контактна детонація	5000	$10^6 \dots 10^8$	Місцевий
Близька детонація	500	$10^7 \dots 10^8$	Локальний/ глобальний
Вибух	1	$10^7 \dots 10^8$	Глобальний

Повномасштабні випробування на арені з використанням вибухових речовин проводяться для оцінки ефективності елементів конструкції та будівельних компонентів проти вибухових навантажень. Один або кілька тестових зразків розміщують на відповідній відстані від заряду на рівній площі без перешкод (рис. 3).

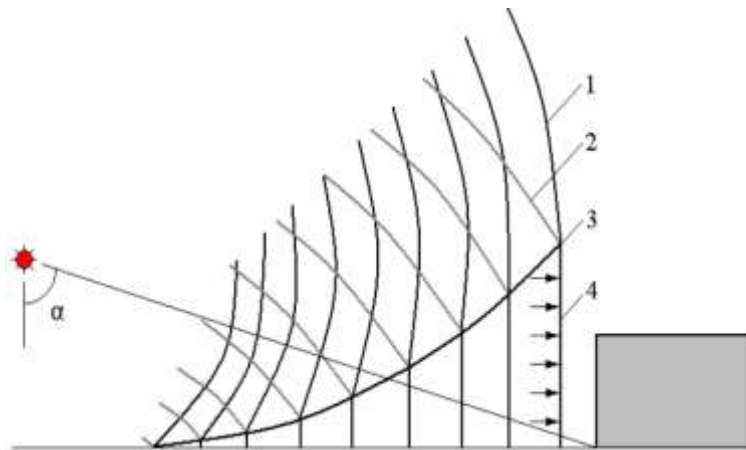


Рисунок 3 - Спрощена схема розповсюдження в просторі ударної хвилі від повітряного вибуху:
1 – падаюча ударна хвиля; 2 – відбита ударна хвиля; 3 – траєкторія потріпної точки (інтерференція хвиль); 4 – фронт основної ударної хвилі (хвилі Маха); ☼ – епіцентр вибуху.

Випробувальні зразки слід поміщати в міцні камери, щоб гарантувати, що поведінка випробовуваного зразка не змінюється впливом вибухової хвилі, що навантажує задню частину зразка. Тестова арена має бути покрита бетоном або асфальтом для зниження ризику пошкодження об'єктів досліджень вторинними уламками.

Це також гарантує, що кількість енергії, що поглинена при утворенні кратерів, мінімізується, і випробування наближається до умов повітряного вибуху напівсферичної поверхні Kingery-Bulmash (Kinney та ін., 1985) [8]. Гладка поверхня землі також зменшує вплив на розповсюдження хвиль, що може бути спричинений будь-якими нерівностями поверхні або рослинністю.

Заряд формують у сферу та розміщують на підставці з крихкого матеріалу, наприклад, пінополістиролу (рис. 4). Оскільки заряд трохи піднятий, це являє собою повітряний вибух на низькій висоті. При цьому неминучим є відбиття від землі ударної хвилі, що наздожене прямий фронт хвилі, утворюючи фронт хвилі Маха (рис. 3). Для діапазонів, що зазвичай розглядаються, якщо світлопрозора конструкція не є надзвичайно високою, хвиля Маха буде вищою за тестовий зразок. Подібним чином, якщо зразок не є надзвичайно широким, сферичний ударний фронт фактично стане квазіплоскою хвилею до моменту, коли він досягне поверхні, що досліджується. На практиці припущення, що заряд є напівсферичним поверхневим вибухом, дає адекватне фізичне наближення.

Найпростішим пристроєм для фізичного моделювання спрямованої повітряної ударної хвилі є відкрита ударна труба з постійною площею поперечного перерізу (рис. 5).

Для створення імпульсу тиску на початку труби встановлюється заряд вибухівки. При детонації заряду утворюється напівсферичний фронт ударної хвилі. В контакт з стінками труби він стає все більш рівномірним за профілем. Приблизно через п'ять значень діаметрів труби фронт удару утворює приблизно плоску поверхню за винятком невеликого прогину в тонкому шарі поряд із внутрішньою поверхнею.

Під час руху тунелем крива профілю тиску стає плоскішою. Через відповідну відстань крива має типову форму вибухової хвилі. На цій відстані можна облаштувати вікно для спостереження та проведення

вимірювань параметрів хвилі. Якщо зафіксувати параметри зміни тиску в часі, можна визначати типову форму вибухової хвилі, що зображена в нижній частині схеми.



Рисунок 4 - Фото розташування тестових світлопрозорих конструкцій та вибухового заряду на арені для вибухів

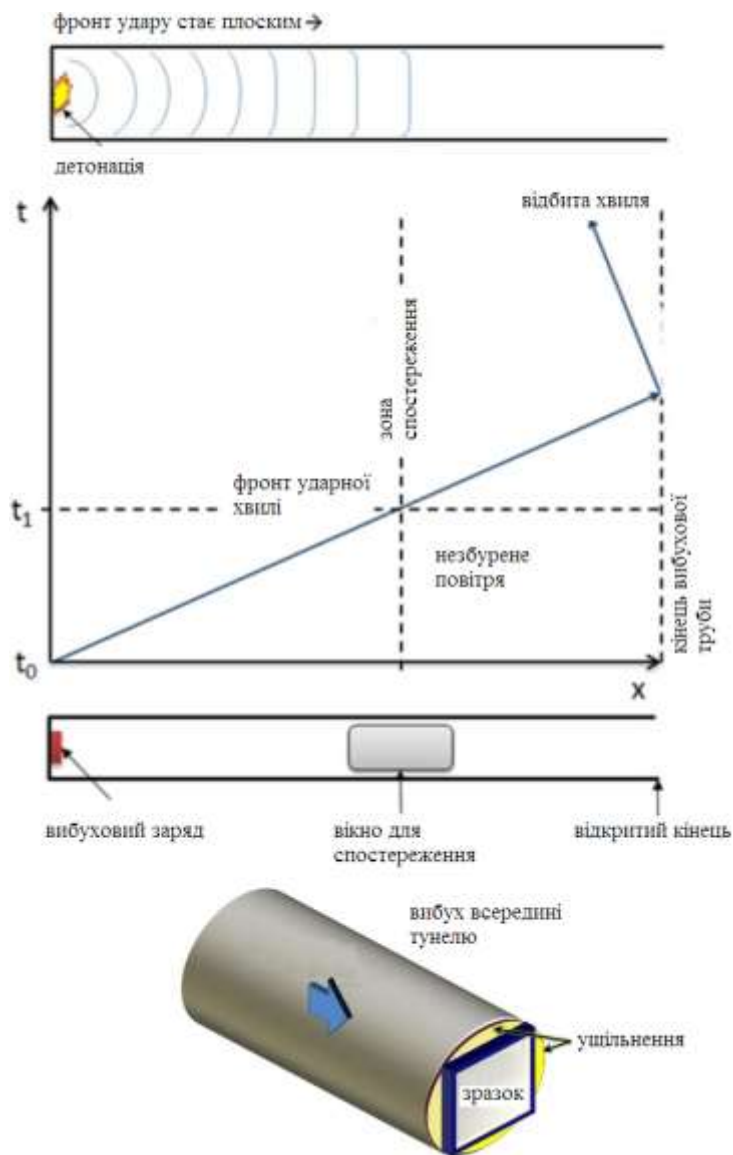


Рисунок 5 - Схема поширення хвилі в ударній трубі

На рис. 5 також наведена діаграма час t – траєкторія x рухомого фронту ударної хвилі.

Коли фронт досягає відкритого кінця ударної труби, створюється хвиля розрідження, що повертається вгору. Ця хвиля розрідження прискорює газ, що витікає, і тим самим призводить до того, що його тиск також падає нижче тиску довкілля. Потім у цій зоні низького тиску починається процес наповнення середовищем, що призводить до коливального повітряного потоку до труби та з неї.

У прикладі, що схематично наведений на рис. 5, хвиля розрідження не мала жодного впливу на ділянку спостереження. Швидкість, з якою тиск зменшується, і поява негативної фази залежить від технічних характеристик відкритого кінця та всієї конструкції ударної труби.

Через генерацію ударної хвилі ідеалізуються умови для одновимірної частини детонаційної хвилі, що фізично моделюється за допомогою випробувань з ударною трубою.

При попаданні ударної хвилі на конструкцію виникає відбиття, що описується коефіцієнтом відбиття $c_{ra} = p_r/p_i$, де p_r – тиск хвилі, що відбита від поверхні, кПа; p_i – тиск хвилі, що діє (падає) на поверхню, кПа.

Коефіцієнт відбиття c_{ra} є функцією падаючого надлишкового тиску, а також кута його дії α . Для поверхонь, паралельних напрямку поширення (кут падіння 90°), відбитий тиск дорівнює падаючому тиску, тому його також називають бічним тиском.

Пік надлишкового тиску відбитої хвилі визначає навантаження на конструкцію. Це явище викликане тим фактом, що молекули газів зі складу повітря, які знаходяться поряд із об'єктом, не можуть вільно рухатися при цьому (*Gebbeken та ін., 2012*) [2].

Висновки

Визначені основні теплофізичні чинники руйнівного впливу вибуху, яким повинна протистояти будівельна конструкція. Проаналізовані основні відмінності вибухових і ударних впливів від статичних навантажень на огорожувальні конструкції (в т.ч. світлопрозорі). Визначення критичного тиску для конкретної конструкції прив'язане до визначення критичної відстані, на якій конструкція не витримає руйнівного впливу ударної хвилі.

Розглянуті основні натурні методи визначення параметрів вибухової хвилі у режимі реального часу. Визначено, що використання методу ударної труби є раціональним для проведення досліджень в лабораторних умовах.

Робота виконана за сприяння Національного фонду досліджень України. Матеріали статті містять наукові результати, що отримані в рамках виконання проекту № 208/0172 «Аеродинаміка, теплообмін та інновації для підвищення енергоефективності віконних конструкцій і їх використання для відбудови пошкоджених війною будівель України» конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Список використаної літератури

1. Sauer, M., Klommfass, A. and Thoma, K. 2005, Interaktion von Detonationswellen und Gebäuden. Seminar Interaktionsprobleme im Ingenieurbau. Technische Universität Dresden.
2. Gebbeken N., Döge T., Larcher M., 2012. Safety and Security of Urban Areas through Innovative Architectural and Structural Concepts, Proceedings 7th Security Research Conference Future Security Sept. 4-6, 2012, Bonn, Germany.
3. NATO 2008, STANAG 2280 Ed.1, Design Threat Levels and Handover Procedures for Temporary Protective Structures.
4. Riedel, W. 2004. Beton unter dynamischen Lasten Meso- und Makromechanische Modelle und ihre Parameter. Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik, Heft 4.
5. Riedel, W., et al. 2010. Engineering and Numerical Tools for Explosion Protection of Reinforced Concrete. International Journal of Protective Structures.
6. CEN, 2001. EN 13123-1: Windows, Doors and Shutters – Explosion Resistance – Requirements and classification/ Part 1: Shock Tube.
7. CEN, 2001, EN 13123-2: Windows, Doors and Shutters – Explosion Resistance – Requirements and classification. Part 2: Range test.
8. Kinney, G.F. and Graham, K.J. 1985. Explosive Shocks in Air. Second Edition, Springer Berlin.

B. Basok^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8935-4248
O. Nedbailo^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0000-0003-1416-9651
D. Davydenko¹, Dr. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0009-0003-5791-1980
N. Bospala², master student, ORCID 0000-0002-4466-6491

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

²National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

PHYSICAL FACTORS OF THE INFLUENCE THE EXPLOSION ON ENCLOSURE GLASS STRUCTURES. OVERVIEW OF TESTING METHODS

The article examines the main physical parameters of an explosive wave, the properties of explosive loads, as well as the peculiarities of the propagation of waves in space and their dynamic influence on enclosing structures, including translucent. The considered temporal and spatial conditions under which the formation of the quasi-flat front of the blast wave takes place and the blast loads can be considered as uniformly distributed along the vertical plane. If the distance to the explosive charge exceeds half of the value of the width and height of the structure or its element (provided that the charge is located in the center of the structure or element), then the load on them can be considered approximately averaged by area. The thermophysical factors of influence, which the building structure must withstand, are analyzed. The main differences of explosive and shock effects from static loads, which are taken into account during construction design, are described.

The main real-time methods of determining the parameters of the blast wave in real time and the factors of its destructive effect on the elements of the enclosing structures of buildings are considered.

The determination of the critical pressure for a specific structure is tied to the determination of the critical distance at which the structure will not withstand the destructive impact of the shock wave.

The main real-time methods of determining the blast wave parameters in real time are considered. It was determined that the use of the shock tube method is rational for conducting research in laboratory conditions.

The work was carried out with the assistance of the National Research Fund of Ukraine. The materials of the article contain scientific results obtained as part of the implementation of the project No. 208/0172 "Aerodynamics, heat exchange and innovations to increase the energy efficiency of window structures and their use for the reconstruction of war-damaged buildings of Ukraine" of the competition "Science for the reconstruction of Ukraine in the war and post-war periods".

Keywords: explosion, detonation, explosive wave, explosive load, enclosing translucent structure.

References

1. Sauer, M., Klommfass, A. and Thoma, K. 2005, Interaktion von Detonationswellen und Gebäuden. Seminar Interaktionsprobleme im Ingenieurbau. Technische Universität Dresden.
2. Gebbeken N., Döge T., Larcher M., 2012. Safety and Security of Urban Areas through Innovative Architectural and Structural Concepts, Proceedings 7th Security Research Conference Future Security Sept. 4-6, 2012, Bonn, Germany.
3. NATO 2008, STANAG 2280 Ed.1, Design Threat Levels and Handover Procedures for Temporary Protective Structures.
4. Riedel, W. 2004. Beton unter dynamischen Lasten Meso- und Makromechanische Modelle und ihre Parameter. Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik, Heft 4.
5. Riedel, W., et al. 2010. Engineering and Numerical Tools for Explosion Protection of Reinforced Concrete. International Journal of Protective Structures.
6. CEN, 2001. EN 13123-1: Windows, Doors and Shutters – Explosion Resistance – Requirements and classification/ Part 1: Shock Tube.
7. CEN, 2001, EN 13123-2: Windows, Doors and Shutters – Explosion Resistance – Requirements and classification. Part 2: Range test.
8. Kinney, G.F. and Graham, K.J. 1985. Explosive Shocks in Air. Second Edition, Springer Berlin.

Надійшла: 18.03.2024

Received: 18.03.2024

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ.

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 620:91: 697.1

DOI 10.20535/1813-5420.2.2024.303116

М.М. Шовкалюк¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-1898-3493

І.В. Кононенко¹, магістр, ORCID 0009-0001-8846-0065

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ БАГАТОКВАРТИРНИХ БУДИНКІВ

Актуальність використання енергії, отриманої від зовнішнього середовища за допомогою теплових насосів для енергозабезпечення будівель обумовлена зростанням витрат на централізоване енергозабезпечення; удосконаленням технологій і зниженням вартості впровадження подібних технічних рішень; активним розвитком даного напрямку в Європейському Союзі і зміною законодавчої бази в Україні для стимулювання більш широкого впровадження використання відновлюваних джерел енергії.

Об'єкт дослідження: процеси енергоспоживання та техніко-економічні показники комбінованого енергозабезпечення багатоквартирних будівель із застосуванням теплових насосів.

Предметом дослідження є методи та засоби для оцінювання ефективності застосування теплових насосів на потреби гарячого водопостачання та опалення багатоквартирних будівель з використанням теплового насосу та централізованого теплопостачання. Методи дослідження: аналітичні методи, системний аналіз, математичне моделювання, метод порівняльного і структурного аналізу. Дане дослідження проводилося в рамках виконання магістерської дисертації. Практичне значення результатів полягає в застосуванні розробленої математичної моделі для моделювання роботи теплового насосу з урахуванням динамічної зміни COP і водорозбору на прикладі багатоквартирних будівель.

Ключові слова: будівля, тепловий насос, енергоспоживання, енергоефективність, моделювання, техніко-економічні показники.

Вступ

Розв'язання проблеми залежності від імпортованих енергоносіїв потребує комплексного підходу, тому в законодавчій базі України [1,2] передбачено заохочення широкого використання альтернативних та відновлювальних джерел енергії під час комплексної термомодернізації будівельного сектору та реконструкції інженерних мереж. Застосування теплових насосів (ТН) для опалення та гарячого водопостачання (ГВП) сприяє досягненню глобальних цілей сталого розвитку (№ 7 affordable and clean energy, № 8 decent work and economic growth; № 9 industry, innovation and infrastructure; № 13 climate action) та імплементації Європейської зеленої угоди. Країни Європи широко впроваджують теплові насоси в системах теплопостачання. Значного прогресу в цих питаннях досягли Швеція, Німеччина, Норвегія, Франція, Данія. Багато країн пропонують субсидії та податкові пільги для переходу на централізоване опалення з використанням ТН. У Швеції і Данії вже проведено подібні масштабні проєкти, у Німеччині існує програма KfW, яка фінансує до 30% вартості. Однак в Україні це обладнання поки не знайшло широкого застосування, передусім, через його високу вартість. Державний стандарт [3], присвячений використанню теплових насосів децю застарілий та не враховує сучасних реалій. Ситуація з ринком теплових насосів в Україні на даний момент залишає бажати кращого. Частка теплових насосів у системах опалення значно менша, ніж у європейських країнах. Це пов'язано з низкою чинників: високою вартістю обладнання; недостатньому рівню державної підтримки і державних програм; недостатній інформованості; високою інертністю в прийнятті рішень. Однак перспективи зростання цього сегмента ринку досить обнадійливі з кількох причин:

-політичний фактор: Україна прагне знизити залежність від імпорту енергоресурсів, а ТН є альтернативою традиційним джерелам енергії;

-економічний фактор: незважаючи на високі початкові витрати, ТН окупаються завдяки низьким експлуатаційним витратам та тривалому строку експлуатації;

-екологічний фактор: використання ТН дозволить покращити стан якості повітря, що є актуальною проблемою для багатьох міст в Україні, з урахуванням ринку квот на викиди CO₂ надає додаткові економічні вигоди;

-технологічний фактор: розвиток технологій призводить до появи на ринку більш ефективних, надійних і дешевих ТН;

-соціальний фактор: зростає обізнаність населення про необхідність економії енергоресурсів та використання екологічно чистих технологій, що стимулює попит;

-інтеграція з іншими джерелами, що робить систему більш економічно привабливою.

Внаслідок повномасштабного вторгнення РФ в Україні було пошкоджено чи зруйновано значну кількість житлових та громадських будівель, постраждала критична інфраструктура, зокрема ТЕЦ, що забезпечували централізоване опалення та гаряче водопостачання. Відновлення та відбудову важливо здійснювати на засадах сталого розвитку та у співпраці з ЄС, використовуючи сучасні технології. Для житлових багатоквартирних будівель існує можливість утилізації теплоти вентиляційних викидів та використання теплоти для ТН. Зважаючи на достатньо високу вартість інвестиційних витрат на проекти із ТН для мешканців будівель постає питання щодо вибору потужності основного обладнання.

Проблеми використання ТН для багатоквартирних будівель вивчалися в роботах [4-6]. В [4] сформульовано задачу вибору оптимальної встановленої потужності базового та пікового теплового джерела, в якості критерію оптимізації використано величину сумарних витрат (капітальних та експлуатаційних) за весь період експлуатації обладнання. В [5] розглядалося застосування повітряних теплових насосів для систем гарячого водопостачання (ГВП) при роботі в комплексі з когенераційною установкою. В [6] розроблено оптимізаційну модель тригенерації з використанням теплових насосів в громадській будівлі. В дослідженні [7] проведено аналіз термодинамічної ефективності теплонасосних схем теплопостачання і запропонована методика для визначення оптимальної глибини використання низькопотенційного тепла у випарнику теплового насоса. В публікації [8] розглядається задача використання теплових насосів, що працюють на альтернативних джерелах енергії для опалення та гарячого водопостачання будівель. Серед висновків дослідження – витрати на енергоносії при використанні теплових насосів – в декілька разів менша, у порівнянні з витратами на централізоване опалення, роботу газових або електричних котлів аналогічної потужності, а впровадження ТН – перспективний напрямок використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб будівель в тепловій енергії. Також важливим висновком дослідження є доцільність поєднання експлуатації теплових насосів з піковим джерелом теплоти. В [9] проаналізовано можливості використання ТН різних типів, враховано залежність їх ефективності від температури зовнішнього повітря.

Аналіз технічних та економічних показників при виборі сценаріїв комбінованої роботи теплового насоса та централізованого енергозабезпечення є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Метою дослідження є розвиток методів і засобів для оцінювання техніко-економічних показників проєктів впровадження теплових насосів для енергозабезпечення багатоквартирних будівель.

Завдання дослідження: виконати аналіз розвитку ринку теплових насосів із оглядом законодавчої бази та стимулюючих програм підтримки для житлового сектору; розробити модель для можливості оцінювання технічних та економічних показників проєктів із застосуванням різних типів теплових насосів залежно від ступеня забезпечення потреб споживачів у тепловій енергії та гарячій воді та інших впливових факторів; провести розрахунки за розробленою моделлю на прикладі декількох багатоквартирних будівель в різних містах України та оцінити як змінюються техніко-економічні показники за різних сценаріїв.

Матеріал і результати досліджень

Розвиток європейського ринку теплових насосів

Згідно з даними Eurostat, у 2019 році загальна встановлена потужність теплових насосів у ЄС становила близько 35 GWt, а кількість встановлених теплових насосів наближалася до 11 мільйонів. Ці цифри значно зросли порівняно з 2010 роком, що відображає зростаючий інтерес та інвестиції в цю технологію. За період з 2016-2022 р.р. ринок ТН у Європі значно розширився. Це зростання було зумовлене кількома факторами: посилення фокусу на екологічних технологіях, зростання цін на традиційні джерела енергії, покращення технологій теплових насосів, адже нові моделі стали ефективнішими, що знизило вартість їх експлуатації та підвищило привабливість для споживачів. Динаміка продажів і загальної кількості встановлених ТН за період від 2005 до 2022 року становить від 446 тис. до 3 млн. в рік, загалом за вказаний період продано 19,79 млн. ТН [10]. Багато країн ЄС внесли зміни в законодавчу і нормативну базу стосовно заохочення використання екологічно чистих технологій. Наприклад, у Німеччині було запропоновано субсидії та податкові пільги для встановлення теплових насосів, що привело до росту ринку теплових насосів на 28 % в 2021 році, і на 53 % в 2022-му [11]. З 2016 по 2022 р.р. попит на ТН в Європі зростав у середньому на 10-15% на рік (рис.1), загальна кількість підключених ТН в системах опалення становить близько 20 мільйонів, приблизно в 16 % житлових і комерційних будівель Європи. Країни Європи впроваджують теплові насоси в системи опалення різною мірою. Однак, є певні лідери, які зробили

значний прогрес у цій галузі, зокрема Швеція, Німеччина, Норвегія, Франція, Велика Британія. Швеція вважається одним із піонерів у використанні теплових насосів. Країна впровадила їх ще на початку 2000-х і з 2021 року близько 90 % нових будівель вже будуються з ТН. У Норвегії частка теплової енергії від ТН становить приблизно 50 %, у Франції цей показник становить близько 18 % [10].

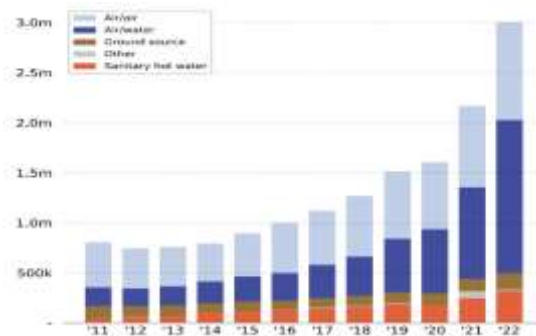


Рисунок 1 – Продажі теплових насосів в ЄС за категоріями, 2011-2022 р. [10]

Європейський союз останніми роками активно працює над переходом до зеленої енергетики. На рівні ЄС розроблено низку документів і стратегій, як-от «Зелений курс» і «Чиста планета для всіх», які передбачають значні інвестиції в поновлювані джерела енергії. Ще одним ключовим документом є стратегія «Energy Roadmap 2050», що акцентує увагу на використанні поновлюваних джерел енергії та технологій з низьким рівнем викидів. Кожна країна-член ЄС розробляє свої національні плани та стратегії, де передбачаються заходи для стимулювання використання теплових насосів.

Таким чином, тенденції у сфері теплопостачання з урахуванням прийнятих амбітних стратегічних планів в європейських країнах вказують на перспективи подальшого розвитку ринку теплових насосів як в ЄС, так і в Україні. Можна прогнозувати прискорений розвиток нових технологій, здешевлення теплових насосів і їх більш широке застосування для забезпечення тепловою енергією споживачів, в тому числі і багатоквартирних будинків. Задача оптимального вибору ТН для багатоквартирних будівель потребує додаткових розрахунків, техніко-економічних обґрунтувань. Тематика застосування теплових насосів у сфері теплопостачання є надзвичайно актуальною і потребує подальших досліджень.

Розрахункові моделі для вибору теплових насосів

Існує ряд програмних продуктів для розрахунків проектів з використанням теплових насосів та моделювання їх роботи, наприклад: GeoT*SOL, Daikin Altherma Simulator, HyGCHP (Hybrid Ground-Coupled Heat Pumps), TRNSYS (Transient System Simulation Tool), EnergyPlus, HAP (Hourly Analysis Program) від Carrier, EES (Engineering Equation Solver), Ground Loop Design (GLD). Аналіз показав, що існуюче програмне забезпечення: переважно розроблялось в першу чергу для розрахунку теплових насосів для приватного будинку і має ряд обмежень, не дає можливості моделювати різні сценарії, що можуть виникати при інтеграції теплових насосів в централізовані системи теплопостачання, а також не враховують динаміку водорозбору на протязі доби.

По результатам аналізу не було виявлено програмного забезпечення, що мало достатню гнучкість для розв'язання задачі підбору потужності теплового насосу і теплоакumuлюючого баку для теплопостачання багатоквартирних житлових будинків, які б давали можливість: комбiнувати тепловий насос з ІТП, використовувати ТН для попереднього підігріву води для потреб ГВП, враховувати динамічний водорозбір на протязі доби, моделювання підігріву зворотного теплоносія системи опалення і теплоакumuлюючого баку з взаємною залежністю температур.

Для подальших досліджень було розроблено математичну модель в MS EXCEL.

Завданням моделі є: розрахунок оптимальної з економічної і технічної точки зору потужності теплового насоса та об'єму теплоакumuлювальних баків; оцінювання параметрів роботи теплового насоса; можливість урахування додаткових заходів, такі як термомодернізація огорожень до сучасних норм [12] та модернізація інженерних мереж будівлі. Блок-схема розробленої моделі наведена на рис.2.

Модель дозволяє:

- розрахувати окупність проекту впровадження теплового насоса з обраними параметрами;
- розрахувати оптимальне співвідношення між потужністю теплового насоса та об'ємом теплоакumuлювального баку для даного об'єкта;
- урахування змін інвестиційної складової залежно від проекту модернізації;
- моделювання роботи теплового насоса з урахуванням динамічно змінюваного COP внаслідок зміни погодних умов, температури води в теплоакumuлюючому баку, водорозбору, температурного графіка системи опалення.

Кожного місяця змінюються наступні вхідні параметри: температура зовнішнього повітря, що впливає на COP, усереднений добовий водорозбір, температура холодної води. Результатом помісячного моделювання роботи ТН є результати виробництва теплової енергії і споживанню електричної енергії тепловим насосом за кожен місяць року. Фінальним етапом розрахунків є визначення економічних параметрів проекту.

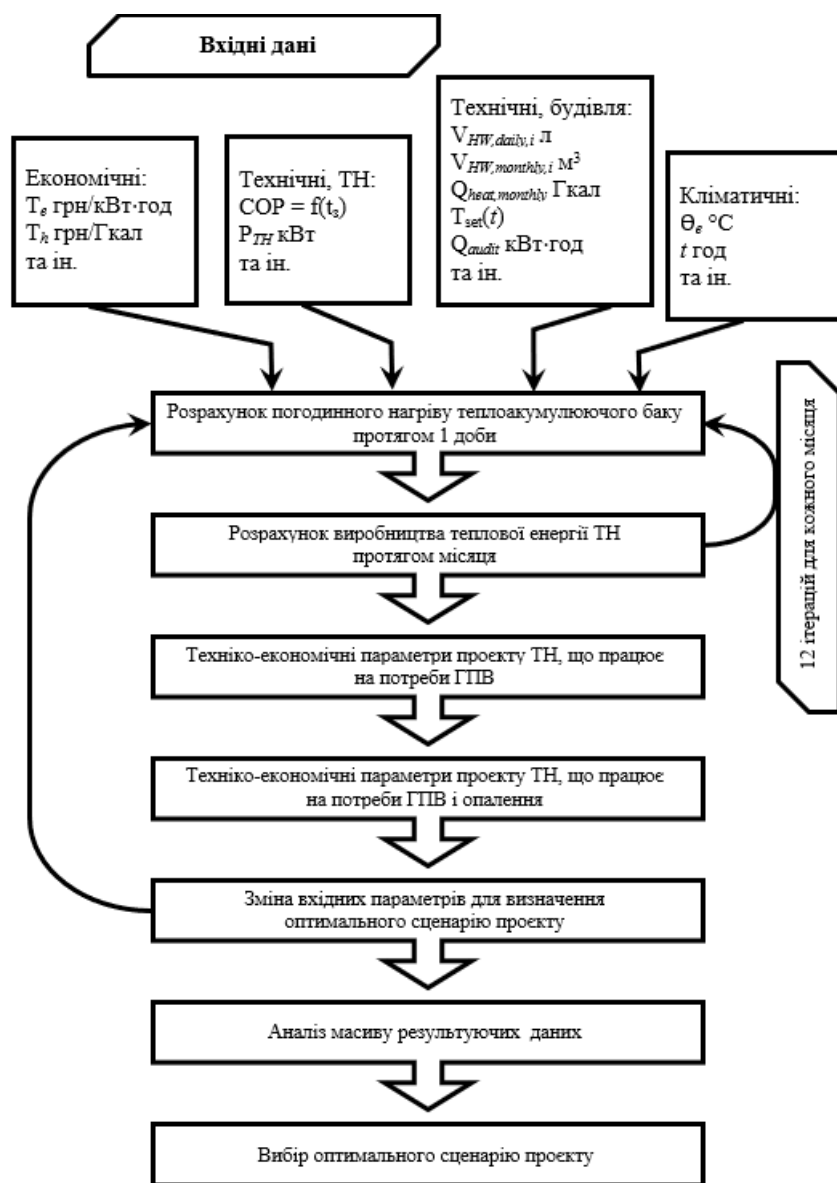


Рисунок 2 – Блок-схема розробленої математичної моделі

Техніко-економічні показники проектів комбінованого енергозабезпечення будівель

На основі розробленої математичної моделі було проведено оцінку оптимальних сценаріїв використання теплових насосів – це є важливим кроком для визначення найбільш ефективних в коротко- і середньостроковій перспективі сфер застосування теплових насосів. Для проведення такого аналізу, було обрано ряд об'єктів різного типу і параметрів, щоб проаналізувати, в яких сценаріях теплові насоси можуть показати кращі перспективи застосування.

Для кожного об'єкту був проведений помісячний розрахунок кількості теплової енергії, що може бути вироблена тепловими насосами різної потужності, з урахуванням зміни COP теплового насосу в залежності від зміни температури навколишнього середовища (зовнішнього повітря – для теплових насосів типу повітря-вода, і ґрунту – для геотермальних теплових насосів). Обмежувачими факторами виступали: енергопотреба будівель; економічна доцільність проектів; діапазони температур, підігріву теплоносія, що доцільні для використання теплових насосів; коефіцієнт використання встановленої потужності ТН.

В розрахунках використовуються ринкові тарифи на електроенергію і природний газ. Дані тарифи близькі до середньоєвропейських, і прогнозується перспектива, що з часом, тарифи, в тому числі і для населення, будуть наблизитися до тарифів на енергоносії в ЄС. В різних містах відрізняється доля вартості газу в виробництві теплової енергії, відповідно, відрізняється і її, розрахована відповідно до ринкової вартості газу, вартість.

Використання ТН для існуючої житлової багатоповерхової серійної будівлі в м. Київ

Об'єкт дослідження - житловий 5-поверховий будинок, побудований в 1965 р., типовий зразок радянської забудови (типовий проект 1-480-19А), проведено утеплення, встановлено ІТП, налаштування ІТП оптимальні, температурний графік – оптимізовано. В будинку по декілька місяців не було доступне централізоване ГВП, що робить питання надійного постачання ГВП максимально актуальним. Даний об'єкт було обрано через наявність автоматизованої системи енергетичного моніторингу з датчиками в ІТП, що надає можливість побудувати фактичний графік водорозбору гарячої води.

Передбачається встановлення теплового насосу типу "повітря-вода" і теплоакumuлюючих баків з теплообмінниками і сепараторами. Дана система інтегрується з ІТП в підвалі будинку. Теплоакumuлюючий бак підключається до трубопроводу подачі холодної води на ГВП, і, таким чином, тепловий насос працює на попередній підігрів води для ГВП. Тепловий насос налаштовується на підігрів води в баку на 55 градусів. З урахуванням змінної температури повітря, режимів водорозбору і інших факторів, температура води на виході з баку в певні періоди буде менше 55 градусів, і її догрів буде відбуватися на теплообміннику ГВП в ІТП. Об'єм теплоакumuлюючого баку приймаємо виходячи із 40-50 % добового споживання гарячої води в січні (об'єм баку 2000 л), тепла потужність ТН 16 кВт; електрична потужність ТН - 4,57 кВт. Результати помісячних розрахунків представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання роботи ТН за кожен місяць року

Місяць року	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Споживання гарячої води за місяць ГВП, м ³	148,9	146,7	142,2	133,3	120,4	82,8	88,1	89,9	97,6	127,7	110,9	122,0
Споживання Гкал на ГВП, з урахуванням циркуляції, Гкал	10,19	10,07	9,85	8,74	7,56	6,05	6,26	6,34	6,64	8,49	8,28	8,84
Середньомісячний COP	3,31	3,40	3,68	3,85	4,19	4,18	4,25	4,23	4,06	4,15	3,67	3,40
Середня температура теплоакumuлюючого баку °С	54,3	53,7	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
Споживання електроенергії, кВт·год	2797	2628	2443	1795	1512	1092	1139	1164	1293	1967	1949	2302
Виробництво теплової енергії, кВт·год	9246	8926	8992	6913	6335	4567	4837	4921	5251	8159	7157	7827

З проведених розрахунків можна зробити наступні висновки, що потужності теплового насоса і об'єму теплоакumuлюючого баку в цілому достатньо для забезпечення потреб в ГВП протягом року, за винятком січня і лютого, коли середня температура в баку знижується до 54,3 °С і 53,7 °С відповідно, при підігріві системи циркуляції ГВП - теплоносієм, що надходить централізовано. Влітку тепловий насос здатний забезпечувати і потреби системи ГВП, що дозволить зекономити теплову енергію, покращити комфорт мешканців, і не буде необхідності користуватися електричними водонагрівачами.

Подальше моделювання дозволило зробити наступні висновки: використання теплового насоса комбіновано на потреби опалення і ГВП більш економічно доцільне (табл.2), ніж виключено на потреби ГВП, при заданих параметрах. Чим нижча температура подачі і зворотки системи опалення, тим більш доцільно використовувати тепловий насос для забезпечення потреб в опаленні.

При тарифах на електроенергію 6,2 грн/кВт·год і на теплову енергію 3959,45 грн/Гкал простий строк окупності такого проєкту складе 4,5 років.

Оскільки коефіцієнт ефективності роботи ТН є функцією від температур зовнішнього середовища і теплоносія, що нагрівається, зниження температури останнього дозволяє підвищити ефективність роботи ТН, а отже – економічні показники. Перехід на низькотемпературні системи опалення потребують додаткових капіталовкладень. Розроблена математична модель дозволяє розраховувати сценарії з різним

температурним графіком для оцінки доцільності таких заходів. Для даного моделювання було використано ТН з тепловою потужністю 30 кВт. З отриманих результатів можна зробити висновок, зміна температурного графіку суттєво впливає на окупність проекту. Так, в неутепленому будинку без ІТП, або з не налаштованим ІТП, з температурами в системі опалення в середньому на 17 градусів вищою, ніж в досліджуваному об'єкті, строк окупності складатиме при тих же параметрах 8,36 років проти 6,21 роки в досліджуваній будівлі. Модель дозволяє оцінити як економічну доцільність реконструкції системи опалення, так і кумулятивний ефект, що виникає при одночасній термомодернізації будівлі, встановленні і налаштуванні ІТП, що дозволяють знизити температурний графік, при встановленні ТН.

Таблиця 2 – Економічні параметри впровадження ТН на потреби опалення і ГВП

Інвестиції, грн	832 000
Річна економія теплової енергії, кВт·год	102 164
Річна витрата електроенергії, кВт·год	26 530
Річна економія, грн (при існуючих тарифах)	74 232
Проста окупність, років (при існуючих тарифах)	11,2

Установка ТН в центральному тепловому пункті у м. Луцьк

Об'єктом дослідження є центральний тепловий пункт в м. Луцьк (рис.3.18) зі встановленою тепловою потужністю 1,482 Гкал/год, що забезпечує будинки району тепловою енергією на потреби опалення і ГВП. Оператор центрального теплостачання модернізує центральні теплові пункти (ЦТП), замінює теплообмінники, циркуляційні насоси та впроваджує системи автоматизації. Запропонований проект має на меті встановлення ТН типу "повітря-вода" тепловою потужністю 210 кВт для забезпечення більш ефективного та екологічно чистого рішення для нагріву гарячої води (рис.2). Це допоможе знизити витрати енергоносіїв на підготовку гарячої води. Цілодобово користувачами послуги з постачання гарячої води буде 21 житловий будинок, КП «Луцький клінічний пологовий будинок», дитячий садок №27 «Незабудка, Волинський обласний ліцей з посиленою військово-фізичною підготовкою, військова частина та КЗ «Луцька міська бібліотека». Реалізація проекту передбачає встановлення ТН типу повітря-вода з тепловою потужністю 210 кВт для попереднього підігріву гарячої води. Для акумулювання тепла передбачається встановлення 8 теплоакumuлюючих баків об'ємом по 5000 л. Схема підігріву аналогічна підготовці гарячої води в ІТП багатоквартирних будинків – підігріта в баках вода при водорозборі направляється на теплообмінник ГВП в ЦТП, де догрівається до нормативної температури гарячої води (55 °С) і направляється споживачам. На рисунку 3 представлена доля теплової енергії, що буде вироблятися тепловим насосом по відношенню до кількості необхідної теплової енергії на потреби ГВП.

В таблицях 3-4 представлено узагальнені результати розрахунків.

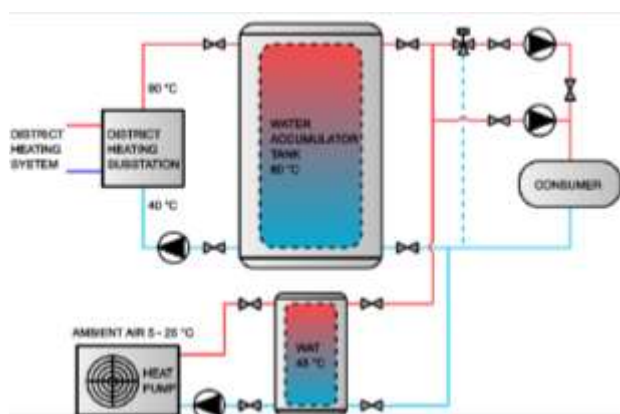


Рисунок 2 – Принципова схема включення ТН в ЦТП

Таким чином, розраховано, що проекти з використанням теплових насосів з інтеграцією в ЦТП, для попереднього підігріву ГВП доцільний і економічно обгрунтований захід.

Використання теплових насосів типу «грунт-вода» для автономного забезпечення тепловою енергією житлового комплексу у м. Хмельницький (містечко для переселенців)

Об'єктом дослідження є житловий комплекс, що проектується (рис.4). На етапі проектування прораховується можливість встановлення теплових насосів. Зібрані вхідні дані, що характеризують загальну енергопотребу містечка і параметри окремих його будівель (табл.5). Згідно результатів

моделювання, після проведення розрахунків енергопотреби будівель, для гарантованого забезпечення нормативної температури в будинках при $t_{p.o.}$ температури зовнішнього повітря і ГВП, повністю виключно тепловими насосами, необхідно забезпечити теплову потужність з урахуванням тепловтрат в мережах – 400 кВт. Був проведений аналіз геології ґрунтів ділянки і, з урахуванням їх властивостей, розраховано необхідну довжину скважин, їх кількість, за умови, що глибина скважин – 50 м, оптимальну відстань між скважинами і площу ділянки для буріння (табл.6)

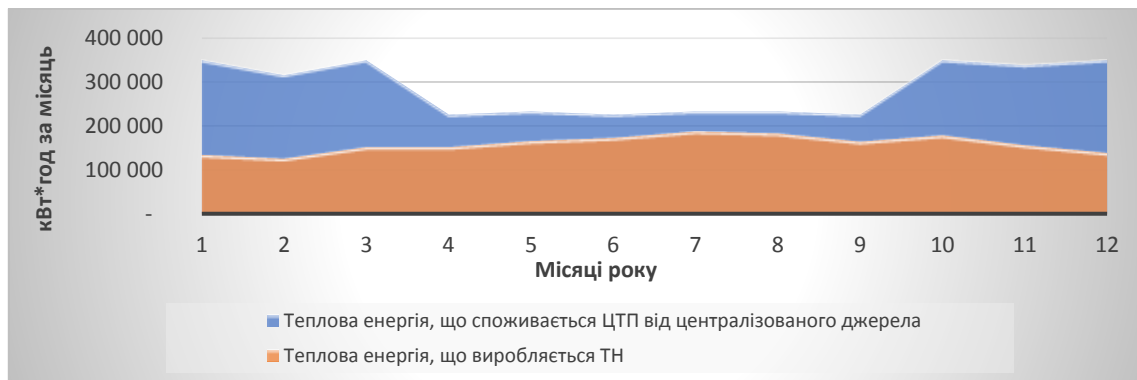


Рисунок 3 – Розподіл частки теплової енергії на ГВП між централізованим джерелом та ТН

Таблиця 3 – Техніко-економічні характеристики проекту

Технічні показники:	
Встановлена теплова потужність ТН, кВт	210
Встановлена електрична потужність ТН, кВт	60
Об'єм теплоакуюлюючих ємностей, що встановлюються, м ³	40
Середньорічний SCOP роботи теплового насосу	3,625
Середня температура догріву води в опалювальний сезон, °С	37
Середня температура догріву води в неопалювальний сезон, °С	49
Розрахункове покриття енергопотреби ГВП ТН в неоп. сезон	74%
Розрахункове покриття енергопотреби ГВП ТН в оп. сезон	44%

Таблиця 4 – Фінансові характеристики проекту

Фінансові показники:	
Інвестиції, грн	13 800 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	538 560
Річна економія теплової енергії, Гкал	1 640
Річна економія теплової енергії, кВт·год	1 906 992
Економія коштів, грн/рік	2 692 356
Проста окупність, років (при ринкових тарифах)	5,13



Рисунок 4 – Схема містечка

Таблиця 5 – Вхідні дані про містечко

Кількість будівель	10	Кількість мешканців на будинок	33
Габарити будівель	Д/Ш/В– 25/14,7/9,4 м	Розрахункова енергопотреба на 1 будівлю	33 кВт
Поверховість	3	Споживання ГВП на людину	1,6 м ³
Утеплення будівель	за ДБН В.3.6-31:2021	Загальна теплова потужність ТН	400 кВт
Централізоване опалення і ГВП	Передбачене	Необхідна електрична потужність	140 кВт

Таблиця 6 – Технічні характеристики проекту

Загальна потужність ТН, кВт	400
Необх. ел. потужність, кВт	140
Загальна довжина скважин, м	5285,8
Кількість скважин	106
Відстань між скважинами, м	7,5
Площа ділянки для скважини, м ²	5962,5

Було проведено декілька моделювань для різних сценаріїв з урахуванням встановлення газової котельної в якості резервного джерела для температур зовнішнього повітря нижче -4 С. Змінним параметром був температурний графік системи опалення – для системи опалення з радіаторами в якості опалювальних приладів в квартирах температурний графік 40/60, для системи з теплими підлогами – 26/35. Для сценарію з наявним резервним джерелом – загальна теплова потужність ТН і довжина геотермальних скважин були знижені на 40 %. Результати розрахунків представлені в таблицях 7,8.

Таблиця 7 – Фінансові характеристики проекту з ТН в якості єдиного джерела опалення

Грунт - вода - автономно, без резервного джерела		
Показник	Радіатори	Тепла підлога
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	6,12	
Вартість природного газу, грн/м ³	18,5	
Вартість встановленої теплової потужності ТН, \$/кВт	1500	
Курс \$	40	
Інвестиції, грн	28 800 000	26 520 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	233362	198757
Річна економія теплової енергії, кВт·год	834779,4	834779,4
Економія коштів, грн/рік	1 407 060	1 821 359
Проста окупність, років	18,85	14,56

Таблиця 8 – Фінансові характеристики проекту з ТН в комбінації з резервним джерелом

Грунт - вода - в комбінації з резервним джерелом		
Показник	Радіатори	Тепла підлога
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	6,12	
Вартість природного газу, грн/м. куб.	18,5	
Вартість встановленої теплової потужності, \$/кВт	1500	
Інвестиції, грн	18 600 000	17 340 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	211 694	188 819
Річна економія теплової енергії, кВт·год	762098,4	887449,3
Економія коштів, грн/рік	1 292 815	1 858 550
Проста окупність, років	13,41	9,33

*Витрати на встановлення резервного джерела тепла не враховуються.

По результатам виконаних досліджень і розрахунків, з урахуванням заданих параметрів, аналіз результатів показує, що використання теплових насосів типу «грунт-вода» – ефективний спосіб забезпечити автономне і економічне опалення для житла, при умові наявності достатньої площі ґрунту для буріння скважин і фінансових ресурсів для здійснення капітальних витрат. На відміну від теплових насосів «повітря-вода», при використанні ґрунту в якості джерела тепла можливо ефективно забезпечити енергопотребу в опаленні навіть в найбільш морозну погоду.

При цьому, є наступні шляхи оптимізації проекту, які значно покращать економічні показники:

1. Розглянути можливість використовувати резервне джерело тепла. Це може бути газова котельня, або, найбільш простий спосіб – електроТЕНи. Це дозволить значно зменшити необхідну встановлену потужність теплового насосу, що скоротить інвестиційні витрати на 30-40 %, і значно покращить економічні показники проекту, але в той же час потребуватиме підведення додаткових мереж.

2. Використання "теплої підлоги" (кращий варіант) значно скоротить поточні витрати на електроенергію, оскільки ефективність роботи теплових насосів тим вища, тим нижча температура теплоносія в системі опалення.

3. Використання централізованої системи кондиціювання влітку – оптимальний варіант для ґрунтових теплових насосів.

Основні фактори, що впливають на окупність проектів:

- температурний графік теплоносія в системі опалення;
- проведення комплексної термомодернізації будівель з модернізацією системи опалення дозволить суттєво скоротити потужність і вартість ТН;
- використання теплових насосів в тому числі на потреби ГВП (доцільно відновлювати централізоване ГВП навіть там, де воно було відключено раніше);
- доля потреби в опаленні, яку необхідно забезпечити тепловим насосом.
- співвідношення ціни на газ і електроенергію (чим більша вартість газу по відношенню до вартості електроенергії – тим більш вигідний тепловий насос по відношенню до газового/централізованого опалення та централізованого ГВП).

Дане дослідження було проведено в рамках виконання магістерської дисертації [13-15].

Висновки

В роботі проведено аналіз існуючого стану ринку теплових насосів і огляд існуючих наукових досліджень, що підтверджує актуальність теми. Тестування функцій існуючих програмних продуктів показало, що вони мають недостатню гнучкість для розв'язання задачі підбору потужності теплового насосу і теплоакumuлюючого баку для теплопостачання багатоквартирних житлових будинків. Було розроблено математичну модель, що дозволяє моделювати роботу теплового насосу на забезпечення тепловою енергією для ГВП і опалення багатоквартирних будівель, з можливістю урахування погодинної динаміки зміни температури в теплоакumuлюючому баці, впливу водорозбору, різні схеми приєднання ТН для існуючих і нових багатоквартирних житлових будівель. Модель дозволяє визначити фінансово-економічні показники проектів з урахуванням заданих вартостей обладнання і тарифів на енергоносії.

Розроблена модель дозволяє визначити також наступні технічні параметри:

- оптимальну для об'єкту потужність встановлюваного ТН і об'єм теплоакumuлюючого баку з урахуванням температурного графіку системи опалення;
- кількість теплової енергії, що може бути зекономленою завдяки роботі теплового насосу, та кількість електричної енергії, що буде затрачуватися тепловим насосом;
- вплив на економічні показники проектів змінних факторів (оцінка ризиків).

Досвід країн ЄС показав, що використання ТН в системах опалення і ГВП житлових будівель є доцільним з урахуванням впровадження комплексних проектів утеплення огорожувальних конструкцій і модернізації інженерних систем будівель для зменшення інвестиційних витрат.

Список використаної літератури

1. Закон України «Про теплопостачання» № 2633-IV, ред. від 31.03.2023, 2849-IX. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>
2. Закон України «Про енергетичну ефективність» №1818-IX, ред. від 27.07.2023, 3220-IX. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>
3. ДСТУ Б В.2.5-44:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами (EN 154550:2007, MOD)
4. Nikitin E. Technical and Economic Efficiency of Air Thermal Pumps with Drive from Gas and Piston Cogeneration Installations of Hot Water Supply Systems / Энерготехнологии и ресурсосбережение, 2011, №4. С.19-24.
5. Нікітін Е.Е. Оптимальне розподілення встановленої потужності в системах опалення з базовим та піковим джерелом теплової енергії / Промислова теплотехніка, 2010, т. 32, №3. с.64-72.

6. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex. P. Arcuri, G. Florio, P. Fragiaco / Energy 32 (2007). P. 1430–1447.
7. Безродний М.К., Притула Н.О. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання [Електронний ресурс] / «Вісник Вінницького політехнічного інституту», №3. – 2013. – Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1079/1078>
8. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5889/12305-1>
9. Григорчук Г.В., Григораш Ю.В., Олійник А.П. Оцінка можливості використання теплових насосів різних типів в енергозберігаючих технологіях / Міжнар. науковий журнал «Грааль науки», №29. С.174-184. – 2023. – Режим доступу: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/1440>
10. European Heat Pump Market and Statistics Report 2023 [Електронний ресурс] / European Heat Pump Association (EHPA). – Режим доступу: https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/EHPA_market_report_2023_Executive-Summary.pdf
11. Wärmepumpenabsatz 2022: Wachstum von 53 Prozent gegenüber dem Vorjahr [Електронний ресурс] / Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. – 2023. – Режим доступу: <https://www.waermerpumpe.de/presse/news/details/waermerpumpenabsatz-2022-wachstum-von-53-prozent-gegenueber-dem-vorjahr/>
12. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель
13. Шовкалюк М.М., Кононенко І.В. Економічні показники проєктів комбінованого енергозабезпечення багатоквартирної будівлі з використанням теплового насосу та централізованого теплопостачання // Збірник матеріалів XV науково-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина», присвячена 125-річчю КПІ [16-18 травня 2023] – К.: НН ІЕЕ, 2023. С.62-66. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63408>
14. Шовкалюк М.М., Кононенко І.В. Енергозабезпечення багатоквартирних будинків в новому містечку для переселенців за допомогою теплових насосів. // Збірник наук. праць IX міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'2023». [Київ, 22-24 листопада 2023 р.] – С.138-140.
15. Кононенко І.В. Дослідження ефективності роботи теплових насосів для енергопостачання багатоквартирних будівель з урахуванням водорозбору. – К.КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2023. 137 с.

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

I. Kononenko¹, master student, ORCID 0009-0001-8846-0065

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

STUDY OF THE EFFICIENCY OF HEAT PUMPS FOR ENERGY SUPPLY OF APARTMENT BUILDINGS

The relevance of using energy obtained from the external environment with the help of heat pumps for energy supply of buildings is due to the increase in costs for centralized energy supply; improving technologies and reducing the cost of implementing similar technical solutions; active development of this direction in the European Union and changes in the legislative framework in Ukraine to stimulate the wider implementation of the use of renewable energy sources.

Research object: energy consumption processes and technical and economic indicators of combined energy supply of multi-apartment buildings using heat pumps.

The subject of the study is methods and tools for evaluating the effectiveness of heat pumps for the needs of hot water supply and heating of multi-apartment buildings using a heat pump and centralized heat supply. Research methods: analytical methods, system analysis, mathematical modeling, the method of comparative and structural analysis. This study was carried out as part of a master's thesis. The practical significance of the results lies in the application of the developed mathematical model for simulating the operation of the heat pump taking into account the dynamic change of COP and water distribution on the example of multi-apartment buildings.

Keywords: building, heat pump, energy consumption, energy efficiency, modeling, technical and economic indicators.

References

1. Law of Ukraine "On Heat Supply" No. 2633-IV, ed. dated 31.03.2023, 2849-IX. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>.
2. Law of Ukraine "On Energy Efficiency" No. 1818-IX, ed. dated 07/27/2023, 3220-IX. Access mode:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.

3. DSTU B V.2.5-44:2010 Engineering equipment of buildings and structures. Design of building heating systems with heat pumps (EN 154550:2007, MOD)

4. Nikitin E. Technical and Economic Efficiency of Air Thermal Pumps with Drive from Gas and Piston Cogeneration Installations of Hot Water Supply Systems / *Energy technologies and resource conservation*, 2011, №4. C.19-24.

5. Nikitin E.E. Optimal distribution of installed power in heating systems with a base and peak source of thermal energy / *Promyslova teplotekhnika*, 2010, vol. 32, No. 3. pp. 64-72.

6. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex. P. Arcuri, G. Florio, P. Fragiaco / *Energy* 32 (2007). P. 1430–1447.

7. Bezrodnyi M.K., Prytula N.O. Thermodynamic efficiency of heat pump schemes of heat supply [Electronic resource] / "Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute", No. 3. – 2013. – Access mode: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1079/1078>

8. Bosiy M.V., Kuzyk O.V. Heat pumps for heating and hot water supply [Electronic resource] / Access mode: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5889/12305-1>

9. Hryhorchuk G.V., Hryhorash Yu.V., Oliynyk A.P. Assessment of the possibility of using heat pumps of various types in energy-saving technologies [Electronic resource] / *International scientific journal "Grail of Science"*, No. 29. P.174-184. – 2023. – Access mode: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/1440>

10. European Heat Pump Market and Statistics Report 2023 / European Heat Pump Association (EHPA). – Access mode: https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/EHPA_market_report_2023_Executive-Summary.pdf

11. Wärmepumpenabsatz 2022: Wachstum von 53 Prozent gegenüber dem Vorjahr [Електронний ресурс] / Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. – 2023. – Access mode: <https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/waermepumpenabsatz-2022-wachstum-von-53-prozent-gegenueber-dem-vorjahr/>

12. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings

13. Shovkalyuk M.M., Kononenko I.V. Economic indicators of projects of combined energy supply of multi-apartment buildings using a heat pump and centralized heat supply // *Collected materials XV scientific and technical. conf. [May 16-18, 2023] K.: 2023. P.62-66.* – Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63408>

14. Shovkalyuk M.M., Kononenko I.V. Energy supply of multi-apartment buildings in a new town for immigrants with the help of heat pumps. // *Collection of Sciences. Proceedings of the IX International science and technology and teaching method. conf. "Energy management: status and development prospects - PEMS'2023"*. [Kyiv, November 22-24, 2023] – P.138-140.

15. Kononenko I.V. Study of the efficiency of heat pumps for power supply of multi-apartment buildings, taking into account water separation. - *K.KPI named after Igor Sikorskyi*, 2023. 137 p.

Надійшла: 17.04.2024

Received: 17.04.2024

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ.

MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.316

DOI 10.20535/1813-5420.2.2024.303119

I.C. Чернечук¹, аспірант, ORCID 0000-0001-6895-7843

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НЕІНТРУЗИВНИЙ МОНІТОРИНГ НАВАНТАЖЕННЯ – ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ БУДІВЕЛЬ

Показано, що комунальним підприємствам для пристосування до мінливих моделей енергозабезпечення та підвищення надійності необхідним є інтелектуальний моніторинг електромереж, щоб відстежувати динамічні умови роботи в розподільних мережах. Smart моніторинг може надати комунальним службам детальний опис звичок споживачів і максимізувати обізнаність користувачів про споживання, що призводить до зміни поведінки та згладжування глобального попиту на енергію. Наведено рушійні фактори ринку моніторингу та безпеки розумного будинку. Визначено, що зростання кількості користувачів Інтернету, стрімке поширення смартфонів і розумних гаджетів, а також зростаюче занепокоєння щодо віддаленого моніторингу будинків є ключовими факторами, які сприяють зростанню ринку безпеки розумного будинку. Показано, що методологія Smart моніторингу на прикладі будівлі відображає цілі як власне моніторингу, так і контролю: зменшити енергоспоживання будівель та / або зменшити для мешканців рахунки за електроенергію; запропонувати менеджерам електромережі більше інструментів, щоб краще керувати зростаючими потребами та можливими перебоями виробництва енергії завдяки зростаючій інтеграції ВДЕ в електромережі.

Проаналізовано неінтрузивний моніторинг навантаження (NILM) – метод аналізу даних про загальне електричне навантаження, отриманих шляхом вимірювання сили струму та напруги в одній точці, з наступним поділом загального навантаження на навантаження окремих пристроїв, який може відігравати ключову роль у цифровому переході в електроенергетиці. Ця технологія здатна не лише покращити поточну операційну діяльність компанії електроенергетики, а й лягти в основу формування нових відносин між суб'єктами енергоринків. Технологія NILM досягла значного успіху завдяки прогресу в машинному навчанні, обробці сигналів і розпізнаванні образів. Визначено, що фундаментальними етапами типової структури NILM є збір даних, виділення ознак, декомпозиція сигналу та ідентифікація пристрою.

Ключові слова: *Smart моніторинг, електроенергетична система, інтелектуальний лічильник, електроспоживання будівлі, неінтрузивний моніторинг навантаження, енергоефективність, управління попитом, конфіденційність.*

Вступ

Глобальна енергетична криза та виклики переходу до зеленої енергетики викликали необхідність інтеграції систем виробництва відновлюваної енергії в мережу [1]. Це потребує ефективної та надійної електроенергетичної системи, яка сприяє відчуттю балансу між пропозицією та попитом на енергію, зменшує втрати електроенергії та непередбачені пікові навантаження тощо для стабільної роботи, а головне, побудові з використанням передових технологій [2, 3]. Власне такою перспективною електроенергетичною системою є система, сформована на основі положень концепції Smart Grid – як поєднання передових технологій, що створює більш надійну, ефективну та стійку електроенергетичну систему [1–3]. Моніторинг такої інтелектуальної системи – це процес збору даних з електричної мережі та їх аналізу для виявлення тенденцій і проблем.

Моніторинг є ключовим компонентом інтелектуальних електроенергетичних систем [4]. Він забезпечує безперебійну та ефективну роботу електромережі шляхом моніторингу напруги, частоти, балансу фаз або стабільності перехідних процесів. Лібералізація ринку електроенергії, генерація з розподілених відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та постійне зростання енергоспоживання ставлять

економічний прибуток поряд з технологічними вимогами як визначальний фактор у стратегічних рішеннях розвитку електроенергетичної системи.

Моніторинг інтелектуальної електроенергетичної системи – це процес моніторингу електричної системи для виявлення та усунення будь-яких потенційних проблем. Власне моніторинг інтелектуальної електроенергетичної системи – це процес вимірювання, збору та аналізу даних, щоб зробити систему більш ефективною. Ці дані збираються за допомогою датчиків, які встановлені в мережі. Датчики, які стають все більше інтелектуальними, контролюють якість електроенергії та потік електроенергії, що допомагає виявити будь-які проблеми до їх виникнення.

Чотири тенденції змінюють умови роботи в мережах розподілу електроенергії, а отже, посилюють навантаження на інфраструктуру розподілу [3–5]:

1) переваги у споживанні енергії зміщуються в бік електроенергії, що призвело до темпів зростання споживання електроенергії, які вдвічі перевищують показники інших джерел енергії;

2) застаріле розподільче обладнання тепер у середньому старше рекомендованого виробником терміну експлуатації;

3) збільшення використання електронних навантажень зменшує коефіцієнти потужності навантаження та знижує ефективність використання мережі;

4) розподільні мережі більше не є статичними односторонніми системами доставки електроенергії, а тепер є динамічними двосторонніми зв'язками, які також з'єднують розподілені генеруючі ресурси з навантаженнями.

Отже, щоб пристосуватися до мінливих моделей енергозабезпечення та підвищити надійність, комунальним підприємствам необхідним є інтелектуальний моніторинг електромереж, щоб відстежувати динамічні умови роботи в розподільних мережах.

Моніторинг в системах розподілу електроенергії

Системи електромереж стають все більш складними та взаємопов'язаними, тому будь-які їх прості стають все більш неприйнятними та шкідливими. Це вимагає продовжувати розгортати інтелектуальні технології, які дозволяють здійснювати моніторинг, оцінку та вирішення потенційних проблем на постійній основі [5, 6]. Найбільш помітною зміною, яку можна очікувати, є просто те, що «розумні» технології стануть розумнішими та більш інтегрованими.

Більшість розгортань технологій моніторингу відбулося на об'єктах генерації та передачі, а моніторинг розподільної мережі обмежувався головною станцією на підстанції. Історичні моделі використання дозволили комунальним підприємствам правильно припустити, що вимірювання на підстанціях відображають умови експлуатації всієї розподільчої мережі. Це припущення, однак, насправді є менш обґрунтованим, оскільки фактичне використання мережі на сьогодні стало більш складним.

Розподілена генерація і особливо малі та середні за потужностями ВДЕ змінюють розподільну мережу зі статичної, односторонньої структури постачання електроенергії на більш складну та динамічну двосторонню систему. Зокрема, фотоелектричні та дрібномасштабні вітроенергетичні установки на стороні клієнта повертають електроенергію в розподільну мережу, коли їх виробництво електроенергії перевищує безпосереднє споживання клієнтом і, якщо вона є, локальну сміливість накопичувача.

Встановлюючи інтелектуальний моніторинг, оператори комунальних служб можуть вирішувати проблеми ще до того, як вони виявляться в одному збої або в конкретній точці збою [6]. Це найкращий вид «страхування». Занадто багато комунальних підприємств покладаються на старий спосіб роботи, залучаючи власних польових працівників для фізичного моніторингу та перевірки активів. Замість того, щоб здійснювати моніторинг і технічне обслуговування активів так само, як вони це робили протягом десятиліть, комунальні підприємства повинні почати використовувати інтелектуальні технології моніторингу та інтелектуальні датчики в поєднанні з досвідом своїх польових працівників, щоб пришвидшити оцінку, сортувати проблеми та оптимізувати весь процес.

Якщо енергокомпаніям вдасться використовувати дані моніторингу інтелектуальної електромережі, то важливо переконатися, що традиційні роз'єднані підрозділи та служби вже об'єднані та ними використовується система, яка забезпечує обмін інформацією у всій організації. Комунальні підприємства визнають здатність інтелектуальних технологій покращувати їхні послуги, економити гроші та дозволяти їм краще планувати свої майбутні ресурси.

Наприклад, технології бездротового моніторингу, такі як мережа LoRaWAN великого радіусу дії з низьким споживанням енергії, є популярним варіантом серед комунальних служб, які використовують інтелектуальний моніторинг [6]. Ці технології дозволяють забезпечити надійний і миттєвий зв'язок моніторингу електромережі та надсилати інформацію туди, де це необхідно, щоб якнайшвидше діяти, а також мінімізують потребу в оновленні обладнання та дорогому доступі до мережі 5G.

Розроблено систему моніторингу низьковольтної розподільної мережі [7], для розподілу електроенергії в компанії «Electric Power Industry of Serbia». Оригінальні системні концепції та рішення розширюють можливості моніторингу та керування мережею розподілу електроенергії на рівні низької напруги та підвищення надійності електропостачання. Зроблено суттєвий внесок є уявлення про

впровадження інфраструктури моніторингу та контролю в низьковольтних розподільних мережах. Так, архітектура розгорнутих систем складається з кількох компонентів:

- вимірювальні пристрої (Measuring devices, MD) – це інтелектуальні сенсорні пристрої, що розгортаються на електричних підстанціях середньої / низької напруги або в різних частинах розподільної мережі низького напруги;
- служба агрегації даних (Data Aggregation Service, DAS) відповідає за збір даних датчиків від MD;
- веб-портал як адміністративний і допоміжний інструмент для DAS і інструмент звітності для зібраних даних датчиків (Web portal);
- база даних конфігурацій (Configurations database, CDB) для зберігання конфігураційних даних DAS;
- база даних вимірювань (Measurements Database, MDB) для зберігання зібраних вимірювань від датчиків;
- кеш-пам'ять (In-memory (IM) Cache, IM) для тимчасового зберігання більшості поточних показань, зібраних із датчиків;
- файлове сховище (File Storage, FS) для зберігання зібраних даних датчиків у необробленому форматі;
- сховище даних (Data Warehouse, DW) для постійного зберігання даних датчиків після процесу очищення та перетворення.

Здійснюється технологічна підтримка автоматичному зчитуванню лічильника (Automatic Meter Reading, AMP), системи управління розподілом (Distributed Management System, DMS), системи технічної інформації (Technical Information System, TIS), стандартної шини зв'язку (Electrical Standards Board, ESB), системи «витягу, перетворення та завантаження» (Extract, Transform, Load, ETL).

Таким чином, Smart моніторинг може надати комунальним службам детальний опис звичок споживачів і максимізувати обізнаність користувачів про споживання, що призводить до зміни поведінки та згладжування глобального попиту на енергію.

Ринок інтелектуальних пристроїв моніторингу зараз стрімко розвивається, що дозволяє енергокомпаніям вибирати, які рішення найкраще підходять для них, виходячи з їхніх унікальних потреб. До великих брендів, пов'язаних із цим сектором, можемо віднести Siemens і Hitachi ABB.

Smart Meter та застосування інтелектуальних лічильників при моніторингу

На сьогодні стало повсюдно визнаним, що інтелектуальний лічильник (Smart Meter) – це пристрій, заснований на системі двостороннього зв'язку між споживачами та постачальниками, включаючи систему інтелектуального моніторингу [8–11]. Інтелектуальний лічильник є більш надійним порівняно з цифровим лічильником з точки зору виставлення рахунків та уникнення (усунення) фальсифікації. Представимо етапи розвитку лічильників та датчиків:

- лічильник традиційний → лічильник цифровий → лічильник інтелектуальний;
- датчик аналоговий → датчик цифровий → датчик інтелектуальний.

Інтелектуальний лічильник є одним із компонентів Smart Grid, підходу до керування розподілом та споживанням енергії, який використовує Інтернет-технології для створення двонаправленого зв'язку, координації та контролю.

Загалом, стандартні інтелектуальні лічильники, встановлені на рівні домогосподарств, в основному призначені для вимірювання та реєстрації загального споживання енергії в режимі реального часу або через регулярні проміжки часу.

Smart Metering пропонує споживачам, постачальникам, операторам електромереж, генераторам і регуляторам широкий вибір корисних інструментів і послуг, які, зрештою, сприяють розвитку інтелектуального енергетичного світу. Інфраструктура інтелектуального лічильника дозволяє обмінюватися даними в реальному часі між клієнтом і постачальником послуг. Кінцевою метою є моніторинг споживання енергії та підвищення загальної ефективності в мережі.

Стандарт IEEE 1686–2013 містить базові вимоги безпеки, які повинні виконувати інтелектуальні електронні пристрої, зокрема, інтелектуальні лічильники. Зазначимо, що інтелектуальні лічильники дозволяють комунальним підприємствам пропонувати досить різноманітні механізми взаємодії із споживачами:

- відповідь на попит (Demand Response);
- динамічні тарифи (Dynamic Tariffs);
- керування навантаженням (Load Management);
- енергетичні послуги (Energy Services);
- інтервальне виставлення рахунків за дані (Interval Data Billing);
- передоплата (Pre-payment);
- просюмери (Prosumers).

Smart Metering змінює спосіб, яким комунальні підприємства ведуть свій бізнес, і зменшує їх витрати на обслуговування з великими перевагами для них та їхніх клієнтів, зокрема: покращений процес

виставлення рахунків (Improved Billing Process); зміна постачальника (Supplier switching); керування лічильниками (Meter Management); захист від шахрайства / доходів (Fraud / Revenue Protection); керування мережею (Network Management). Все це сприяє кращому керуванню енергетичним бізнесом.

Зворотній зв'язок з клієнтом в рамках Smart Metering підвищує енергоефективність на 5–15%, а в деяких випадках навіть до 20% [12].

У звіті «Smart Home Monitoring and Security Market» [13, 14] пропонується всебічний аналіз поточного стану ринку моніторингу та безпеки розумного будинку з акцентом на таких ключових показниках, як сукупний середньорічний темп зростання, валовий прибуток, дохід, ціна, темпи зростання виробництва, обсяг, вартість, частка ринку та зростання за поточний рік. Цей аналіз проводиться з використанням новітніх первинних і вторинних методологій досліджень, що забезпечує точність і надійність.

Рушійні фактори ринку моніторингу та безпеки розумного будинку [14]:

1. **Технологічний прогрес:** ринок розвивається завдяки постійним технологічним інноваціям, які підвищують енергоефективність і ефективність продуктів та послуг моніторингу та безпеки розумного будинку, що включає в себе досягнення за напрямками матеріали, виробничі процеси і цифрові технології.

2. **Зростання попиту.** Зростання попиту на продукти і послуги моніторингу та безпеки розумного будинку, викликане такими факторами, як зростання населення, урбанізація та зміна споживчих уподобань, є значним рушієм зростання ринку.

3. **Регуляторна підтримка:** сприятлива урядова політика, нормативні акти та стимули, які сприяють використанню моніторингу та безпеки розумного будинку, такі як субсидії для проектів з відновлюваної енергетики та механізми ціноутворення на вуглець, заохочують зростання ринку.

4. **Екологічна обізнаність:** підвищення обізнаності про екологічну стійкість і необхідність скорочення викидів вуглекислого газу спонукає до прийняття рішень для моніторингу та безпеки розумного будинку, особливо тих, які є екологічними та відновлюваними.

5. **Зменшення витрат:** постійне скорочення витрат на виробництво та встановлення рішень для моніторингу і безпеки розумного будинку завдяки економії масштабу, технологічному прогресу та посиленню конкуренції робить ці рішення більш прийнятними та доступнішими.

Стримувальні фактори ринку моніторингу та безпеки розумного будинку [14]:

1. **Високі початкові інвестиції:** високі початкові інвестиції, необхідні для розробки та встановлення рішень для моніторингу та безпеки розумного будинку, особливо для великомасштабних проектів, можуть стати суттєвою перешкодою для зростання ринку.

2. **Переривчастість і надійність.** Переривчастість і надійність деяких рішень для моніторингу та безпеки розумного будинку, таких як сонячна та вітрова енергія, можуть бути проблемою, особливо в регіонах з непостійними погодними умовами.

3. **Обмеження інфраструктури:** потреба у значних інвестиціях в інфраструктуру, таких як модернізація мережі та сховищ, для підтримки інтеграції рішень моніторингу та безпеки розумного будинку в існуючі енергетичні системи може бути обмеженням.

4. **Політична невизначеність:** невизначеність, пов'язана з державною політикою та правилами, як-от зміни субсидій чи податкових пільг, може створити невизначеність для інвесторів і сповільнити зростання ринку.

5. **Конкуруючі технології.** Конкуруючі технології, такі як використання викопного палива та ядерної енергії, можуть стати проблемою для впровадження рішень для моніторингу та безпеки розумного будинку, особливо в регіонах, де ці технології добре запроваджені та субсидуються.

6. **Збої в ланцюжку поставок:** збої в ланцюжку поставок, такі як дефіцит критично важливих матеріалів або компонентів, можуть вплинути на доступність і вартість рішень для моніторингу та безпеки розумного будинку, впливаючи на зростання ринку.

7. **Сприйняття громадськістю:** негативне сприйняття громадськістю або опір рішенням для моніторингу та безпеки розумного будинку, як-от занепокоєння щодо візуального впливу чи шумового забруднення від вітрових турбін, може перешкоджати зростанню ринку.

8. **Недостатня обізнаність:** обмежена обізнаність і розуміння рішень для моніторингу та безпеки розумного будинку серед споживачів, компаній і політиків може уповільнити зростання ринку, оскільки зацікавлені сторони можуть не повністю оцінити переваги та потенціал цих технологій.

Обсяг світового ринку розумних будинків (Smart Home) у 2022 році оцінювався в 80,21 млрд. дол. США, і, за прогнозами, зросте з 94 млрд. дол. у 2023 році до 338,28 млрд. дол. США до 2030 року [15]. Фактори зростання ринку розумних будинків – широке впровадження рішень Інтернету речей (Internet of Things, IoT) для стимулювання розширення ринку. Платформа Інтернету речей (IoT) є одним з найважливіших драйверів ринку. У будівлі обладнання на основі IoT забезпечує функції енергозбереження. За даними Groupe Speciale Mobile Association (GSMA Intelligence, <https://www.gsmainelligence.com/>), очікується, що до 2025 року кількість підключень IoT досягне приблизно 25 млрд. у всьому світі, порівняно з 10,3 млрд. у 2018 році. Цей фактор показує, що протягом

кількох років з'являться величезні кластери датчиків, пристроїв і речей, які спілкуватимуться за допомогою високошвидкісних технологій, таких як 5G. Таке зростання кількості пристроїв Інтернету речей, ймовірно, спрямує ринок у бік вищої траєкторії зростання.

Зростання кількості користувачів Інтернету, стрімке поширення смартфонів і розумних гаджетів, а також зростаюче занепокоєння щодо віддаленого моніторингу будинків є ключовими факторами, які сприяють зростанню ринку безпеки розумного будинку. Впровадження IoT та сприятливих політик створили міцну основу для ринку безпеки розумного будинку. До 2025 року GSMA прогнозує, що на Китай, ймовірно, припадатиме близько 4,1 млрд. IoT-з'єднань або приблизно одна третина всіх IoT-з'єднань у всьому світі. Власне інтелектуальний датчик, крім функцій первинного вимірювального перетворення, мають додаткові можливості вимірювання декількох фізичних величин та використання вбудованих аналого-цифрових перетворювачів з мікроконтролерами, що суттєво розширює функціональний діапазон давачів, а саме: попередня обробка сигналів (лінеаризація, фільтрування, корекція похибок); само-діагностування; дистанційне конфігурування (діапазону вимірювань, одиниць вимірювань, узгодження частотних характеристик); окремі елементи керування; передавання інформації з використанням промислових мереж (наприклад, Profibus, Ineternetbus, Profinet).

Ключові компанії зосереджують свої зусилля на розробці платформ Інтернету речей і пов'язаних технологій (машинне навчання, штучний інтелект тощо), які можна використовувати в розумних пристроях. Прогнозується, що цей фактор розширить світовий ринок у майбутньому.

Глобальний ринок мережевого моніторингу оцінювався в 3,34 млрд. дол. США в 2023 році та, за прогнозами, зросте з 3,71 млрд. дол. США в 2024 році та досягне 8,30 млрд. дол. США до 2032 року, демонструючи CAGR 10,6% протягом прогнозованого періоду [16]. Згідно «Звіту про ринок безпеки розумного будинку» (The Smart Home Security Market Report, 2024 – 2029) розмір ринку безпеки розумного будинку оцінюється в 32,46 млрд. дол. США в 2024 році, і очікується, що він досягне 61,97 млрд. дол. США до 2029 року, з сукупним середньорічним темпом зростання протягом прогнозованого періоду (2024–2029) на рівні 13,81 % [17]. Цей звіт сегментований за компонентами (обладнання, програмне забезпечення, послуги), типами пристроїв (розумні сигналізації, розумні замки, розумні датчики та детектори, розумні камери та системи моніторингу), комунікаційний модуль (професійний моніторинг, самоконтроль). Найшвидше зростаючий ринок – Азіатсько-Тихоокеанський регіон. Найбільший ринок – Північна Америка

Основні компанії на ринку моніторингу та безпеки розумного будинку [18]: Adt Corporation, Vivint Smart Home Security, Simplisafe, Honeywell International, Hangzhou Hikvision Digital Technology, Frontpoint Security Solutions, Protect America, Ring And Samsung, Ooma, Bosch Security And Safety Systems, Tyco International, Control4, Google, Visonic, Lorex Technology, Ibm, Ge, Schneider Electric, Nortek Security & Control, Apple, Samsung, Siemens.

Неінтрузивний моніторинг навантаження електроенергетичної системи

Методологія Smart моніторингу на прикладі будівлі відображає цілі як власне моніторингу, так і контролю [19, 20]:

- зменшити енергоспоживання будівель та / або зменшити для мешканців рахунки за електроенергію;
- запропонувати менеджерам електромережі більше інструментів, щоб краще керувати зростаючими потребами та можливими перебоями виробництво енергії завдяки зростаючій інтеграції ВДЕ в електромережі.

Моніторинг і контроль споживання приладів має дві різні мети, чії бізнес-моделі все ще розробляються. По-перше, з точки зору користувача або мешканця, наявність інформації про рівень використання приладів може призвести до зниження витрат через зменшення споживання енергії або можливих допоміжних послуг (запити на дисбаланс, регулювання навантаження або коливання цін на електроенергію тощо). По-друге, з точки зору інтелектуальної мережі або менеджера мережі керованість більшою кількістю навантажень надає більше можливостей дій для підтримки стабільності мережі, тобто більшій гнучкості та надійності (зменшення пікового попиту шляхом усунення використання електроенергії, або шляхом перенесення його на непіковий час тощо) шляхом ідентифікації навантаження та прогнозування споживання енергії навантаженням.

Інтелектуальні лічильники та системи енергоменеджменту будинку (Home Energy Management Systems, HEMS) можна використовувати для надання споживачам зворотного зв'язку щодо споживання енергії в режимі реального часу безперервно або через регулярні проміжки часу.

Для досягнення поставленої мети пропонується реалізувати IT-платформу в рамках розвитку кількох напрямків: розробка системи моніторингу; створення аналітичного центру; організація експертного порталу; систематизація довідкової інформації [19, 20].

Методологія Smart моніторингу передбачає застосування системи неінтрузивний моніторинг навантаження пристрою (Non-Intrusive Appliance Load Monitoring, NIALM) або неінтрузивний моніторинг навантаження (Non-Intrusive Load Monitoring, NILM) та складається з простішої апаратної частини та

складнішого програмного забезпечення [21]. Тобто Smart моніторинг передбачає розробку методів інтрузивного моніторингу та методів неінтрузивного моніторингу навантаження, необхідних для вирішення проблеми дезагрегування навантаження.

Зазначимо, що **агрегування** – це об'єднання, укрупнення показників по будь-якою ознакою. З математичної точки зору агрегування розглядається як перетворення вихідної моделі в модель з меншим числом змінних і / або обмежень. Сутність агрегування полягає в з'єднанні однорідних елементів в більш великі. Способи агрегування: складання показників; представлення групи агрегованих показників через їх середню величину; використання різних вагових коефіцієнтів; використання бальних оцінок. З іншої сторони, **деагрегування** – це процедура, протилежна агрегування, що застосовується в разі переходу до більш дрібних елементів при описі будь-якого об'єкта, по відношенню до яких одиниці вихідного опису представляють агрегати, або до показників, які характеризують такі елементи, замість показників, відповідних їх агрегатів в вихідному описі. Доцільність дезагрегування завжди обумовлена бажанням або необхідністю отримати більш детальне, ніж вихідне опис. Однак використання дезагрегування призводить до зростання розмірності, погіршення статистичних характеристик даних.

Системи моніторингу навантаження дають змогу отримувати інформацію про стан різних навантажень, що живляться від електроенергетичної системи. Ці системи моніторингу, розроблені для додатків, пов'язаних з енергоефективністю, також можуть використовуватися в інших додатках. Інформацію, отриману від систем NILM, можна використовувати для створення систем енергетичного менеджменту (SEM), реагування на потреби (DR), виявлення аномалій, технічне обслуговування та допомога об'єктам із навколишньому середовищі (AAL).

У цьому випадку методологія Smart моніторингу щодо обладнання передбачає наступне [19–21]:

- об'єднання різних діагностичних систем у єдиний комплекс за відкритими інтерфейсами, для можливості незалежного підключення обладнання різних виробників;
- єдиний інтерфейс користувача для доступу через інтернет або внутрішню мережу;
- виділення правил та алгоритмів агрегації даних та прогнозування несправностей окремих модулів, що підключаються за відкритими інтерфейсами, з можливістю їх оперативного оновлення;
- комбінована обробка даних проводиться, використовуючи як локально встановлене устаткування, так і обчислювальні потужності ЦОД;
- настроювані екранні форми відображення інформації з різними рівнями деталізації та дискретизації;
- автономна робота системи діагностики та моніторингу, яка не потребує постійного з'єднання з ЦОД.

Так, для будівлі керування енергією в реальному часі (Real Time Energy Management, RTEM) поєднує технології та послуги, щоб діяти як функціонуючий мозок будівлі. Технологія RTEM надсилає поточні дані про продуктивність будівлі в хмарну систему, де вони перетворюються на корисну інформацію для власників нерухомості, менеджерів будинків і орендарів. При цьому Smart моніторинг сприяє:

- зростанню прибутку за рахунок зменшення витрат на енергію, звільнивши капітал для використання в іншому місці;
- отриманню інформації про свою поточну та історичну енергоефективність у реальному часі;
- підвищенню надійності та часу безвідмовної роботи систем за допомогою автоматизованих можливостей прогнозування;
- збереженню досвіду і знання персоналу для модернізації будівель житлово-комунальної сфери;
- звільненню персоналу від рутинного контролю та надання їм можливості зосередитися на проблемах, які впливають на покращення надання послуг.

NILM – це метод аналізу даних про загальне електричне навантаження, отриманих шляхом вимірювання сили струму та напруги в одній точці, з наступним поділом загального навантаження на навантаження окремих пристроїв. Технологія неінтрузивного моніторингу навантаження може відіграти ключову роль у цифровому переході в електроенергетиці. Ця технологія здатна не лише покращити поточну операційну діяльність компаній електроенергетики, а й лягти в основу формування нових відносин між суб'єктами енергоринку [22].

На рис. 1 наведено приклад агрегованого сигналу електроживлення та відповідного рішення NILM [23]. Основний сигнал складається з сигналів від холодильника (Refrigerator Power), а LED-телевізора (LED TV Power) та від вентилятора (Fan POWER). На цьому рисунку відображений час роботи вентилятора з 6:30 ранку до 9:30 ранку з енергоспоживанням 46 Вт а LED-телевізора з 6:05 до 8:35 з енергоспоживанням 58 Вт. В цьому прикладі прилади змодельовані, як онлайн/офлайн навантаження, що споживають постійну активну потужність.

Smart моніторинг, заснований на неінтрузивному моніторингу навантаження, має дві ключові відмінності, що зумовлюють специфіку їх застосування:

– неінтрузивність – лічильник такої системи моніторингу вимірює струм і напругу в одному місці розподільної електромережі будівлі та не вимагає прямого вбудовування в мережу, при цьому забезпечуючи точність вимірювання, що не поступається традиційним лічильникам (у тому числі оснащеним Wi-Fi та GSM-модулями);

– дезагрегація даних – здійснюється, коли необхідно виділити профілі енергоспоживання для кожного пристрою, розташованого в приміщенні. Лічильник NILM, використовуючи хмарні технології та спеціальні методи машинного навчання, розбиває інтегральні дані про споживання енергії, зібрані в одній точці мережі, на профілі споживання кожного пристрою. Оскільки витрати на встановлення лічильників прямого включення прямо пропорційні їх кількості, використання сенсорів NILM сприяє суттєвій економії. Даний ефект ще більше відчувається при оснащенні лічильниками великої комерційної нерухомості, а також на виробництвах, які використовують велику кількість різноманітного обладнання.

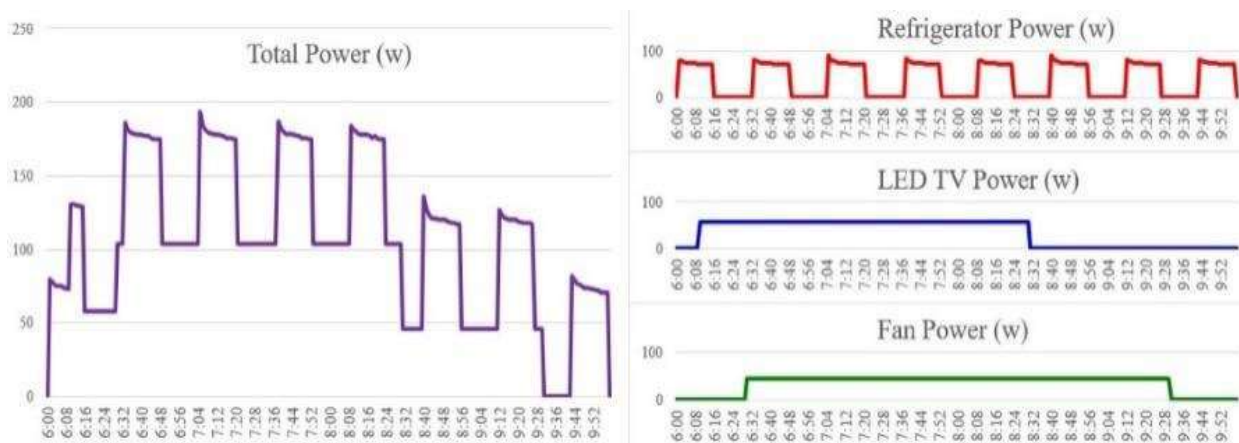


Рисунок 1 - Приклад агрегованого сигналу електроживлення та відповідного рішення NILM [23].

Smart моніторинг, заснований на неінтрузивному моніторингу навантаження, має дві ключові відмінності, що зумовлюють специфіку їх застосування:

– неінтрузивність – лічильник такої системи моніторингу вимірює струм і напругу в одному місці розподільної електромережі будівлі та не вимагає прямого вбудовування в мережу, при цьому забезпечуючи точність вимірювання, що не поступається традиційним лічильникам (у тому числі оснащеним Wi-Fi та GSM-модулями);

– дезагрегація даних – здійснюється, коли необхідно виділити профілі енергоспоживання для кожного пристрою, розташованого в приміщенні. Лічильник NILM, використовуючи хмарні технології та спеціальні методи машинного навчання, розбиває інтегральні дані про споживання енергії, зібрані в одній точці мережі, на профілі споживання кожного пристрою. Оскільки витрати на встановлення лічильників прямого включення прямо пропорційні їх кількості, використання сенсорів NILM сприяє суттєвій економії. Даний ефект ще більше відчувається при оснащенні лічильниками великої комерційної нерухомості, а також на виробництвах, які використовують велику кількість різноманітного обладнання.

Отже, NILM – це техніка моніторингу споживання енергії в будівлях без необхідності встановлення апаратного забезпечення на окремих приладах, що робить його економічно ефективним і масштабованим рішенням для підвищення енергоефективності та зниження споживання енергії. Базуючись на своїх технологічних особливостях, методологія Smart моніторингу з використанням лічильників неінтрузивного моніторингу навантаження дозволяє [21]:

– дезагрегацію сумарного енергоспоживання та візуалізація. За допомогою сенсорів NILM споживачі здатні виділяти енергоспоживання кожного приладу. Результат дезагрегації у вигляді інтерактивної інфографіки відображається в мобільному додатку або в онлайн-платформі. Кількість корисних даних може бути значно збільшена шляхом встановлення кількох сенсорів (наприклад, можна розділити енергоспоживання між поверхами у багатоповерховій будівлі або зібрати інформацію щодо навантаженості виробничого обладнання у різних приміщеннях великого підприємства);

– виявлення ненормативних режимів роботи пристроїв і превентивний моніторинг поломок (виходу із ладу обладнання). Оскільки сенсори в режимі реального часу збирають дані, система запам'ятовує патерни (зразки) поведінки приладів. За допомогою, наприклад, методів нейромережевого аналізу система розпізнає зміни в режимі роботи пристрою та оперативно надсилає користувачеві повідомлення про виявлене порушення;

– поділ рахунку на купівлю електроенергії. За допомогою функції приладового поділу енергоспоживання можна відповідним чином поділити рахунок про оплату. При диференційованій

вартості електроенергії за зонами доби можна сформувати звіт про витрати на роботу приладу за певний проміжок часу, що відкриває можливість оптимізувати режим роботи пристроїв, виробити графік оптимального енергоспоживання та знизити витрати на покупку електроенергії;

– вбудовуваність у сторонні техніко-технологічні рішення. Приладовий поділ навантаження – одна з найважливіших технологічних особливостей NILM. Це рішення може бути вбудоване і в традиційні прилади обліку прямого включення;

– надсилання сповіщень та повідомлень. З використанням мобільного додатка або онлайн-платформи користувача система NILM здатна надсилати користувачеві повідомлення про порушення режимів роботи пристроїв або при перевищенні заданих користувачем рівнів (наприклад, якщо час роботи конкретного пристрою перевищить встановлений або при перевищенні заданої межі енергоспоживання).

NILM – це технологія, яка дозволяє дезагрегувати дані про споживання електроенергії за окремими приладами або пристроями в будівлі чи будинку. Технології NILM спрямовані на дезагрегування даних про споживання енергії, зібраних інтелектуальними лічильниками, для ідентифікації конкретних енергоспоживаючих приладів або пристроїв. NILM може надати інформацію про роботу різноманітних пристроїв [21–24]. Це досягається шляхом аналізу моделей споживання енергії та унікальних сигналів кожного пристрою без необхідності використання додаткових датчиків або апаратного забезпечення, підключеного безпосередньо до приладів. Основними цілями NILM є підвищення енергоефективності, зменшення споживання енергії та сприяння більш ефективному управлінню попитом.

Застосування NILM в енергетичному моніторингу сприяє [24]:

– енергоефективності – NILM дозволяє користувачам ідентифікувати прилади, які споживають енергію, і надає інформацію про оптимізацію моделей використання енергії, що призводить до зниження рахунків за електроенергію та скорочення викидів вуглецю;

– виявленню несправностей – відстежуючи моделі споживання енергії окремими приладами, NILM може виявити незвичайну поведінку, яка може вказувати на потенційну несправність або збій, спонукаючи до профілактичного обслуговування;

– управлінню попитом – NILM може допомогти комунальним компаніям і споживачам краще розуміти та керувати своїм споживанням енергії, сприяючи більш ефективним стратегіям управління попитом і балансування навантаження;

– інтеграції з Smart Grid – як частина системи інтелектуальної мережі, NILM може допомогти в оптимізації розподілу та споживання енергії, підвищуючи стабільність і продуктивність мережі.

Таким чином, основними цілями NILM є сприяння енергоефективності, зменшення споживання енергії та сприяння більш ефективному управлінню попитом.

Незважаючи на свої потенційні переваги, NILM викликає занепокоєння щодо конфіденційності користувачів через детальну інформацію, яку він може відкрити про спосіб життя людини, щоденні звички та навіть статус зайнятості. Ці проблеми включають [24]:

– профілювання поведінки (моделі споживання енергії приладами можуть опосередковано відкривати особисту інформацію, таку як розпорядок дня та перебування вдома);

– витік даних (несанкціонований доступ до даних NILM може призвести до неправомірного використання особистої інформації третіми особами, збільшуючи ризик крадіжки особистих даних або цільової реклами);

– проблеми спостереження (державні органи чи інші організації можуть використовувати дані NILM для моніторингу окремих осіб без їхньої згоди).

Щоб вирішити ці проблеми конфіденційності та забезпечити конфіденційність даних, може бути застосовано кілька стратегій [22–24]:

– анонімізація даних (знеособлення даних NILM шляхом видалення персональної інформації може допомогти захистити конфіденційність користувачів, у той же час уможливаючи аналіз моделей споживання енергії);

– агрегація даних (агрегування даних NILM на вищому рівні, наприклад, на рівні громади чи мікрорайону, може зменшити ризик індивідуального профілювання, водночас забезпечуючи корисну інформацію щодо енергоефективності та управління попитом);

– безпечне зберігання та передача даних (застосування розширених методів шифрування та автентифікації під час зберігання та передачі даних може звести до мінімуму несанкціонований доступ і витік даних);

– механізми дозволу/відмови (надання користувачам можливості ввімкнути або відмовитися від збору даних NILM може допомогти їм зберегти контроль над своїми даними та конфіденційністю);

– комплексна політика конфіденційності (чітке визначення того, як зібрані дані NILM використовуватимуться, зберігатимуться та поширюватимуться, може допомогти зміцнити довіру між користувачами та постачальниками послуг, одночасно забезпечуючи дотримання правил захисту даних).

Технології NILM досягла значного успіху завдяки прогресу в машинному навчанні, обробці сигналів і розпізнаванні образів. Проте проблеми все ще залишаються. Точна дезагрегація приладів зі

схожими енергетичними сигнатурами або з різним енергоспоживанням залишається складним завданням. Поточні дослідження зосереджені на вдосконаленні алгоритмів та включенні додаткових джерел даних, таких як датчики навколишнього середовища, для подальшого підвищення точності.

Незважаючи на ці проблеми, NILM вже отримав широке визнання [21–25]. Організації, комунальні служби та уряди у багатьох країнах досліджують його потенціал. Однак питання конфіденційності залишаються проблемою. Можливість виводити конкретні види діяльності чи звички з енергетичних даних викликає питання щодо конфіденційності користувачів і можливого зловживання даними.

Фундаментальними етапами типової структури NILM є збір даних, виділення ознак, декомпозиція сигналу та ідентифікація пристрою [26].

1-й етап «Збір даних». Це процес збору даних про загальне енергоспоживання будівлі. Для цього зазвичай використовуються інтелектуальні лічильники або інші датчики, які вимірюють споживання енергії будівлею. Дані можуть бути зібрані у формі показань електричної потужності протягом часу або інших параметрів, таких як струм, напруга та коефіцієнт потужності. Дані слід збирати з високою частотою дискретизації, як правило, кілька разів на секунду, щоб зафіксувати дрібні коливання споживання енергії, характерні для окремих приладів.

2-й етап «Виділення ознак». Це процес аналізу зібраних даних для виявлення закономірностей і тенденцій у споживанні енергії. Цей етап має вирішальне значення для визначення характеристик моделей споживання енергії, які є унікальними для окремих приладів або навантажень. Частотний аналіз, аналіз часових рядів і статистичний аналіз є деякими поширеними методами виділення ознак. Наприклад, частотний аналіз можна використовувати для визначення домінуючих частот у даних про споживання енергії, які потім можна використовувати для визначення робочих характеристик конкретних приладів. Аналіз часових рядів можна використовувати для виявлення закономірностей у даних про споживання енергії протягом певного часу, наприклад, щоденних або тижневих циклів. Статистичний аналіз можна використовувати для визначення статистичних властивостей даних про споживання енергії, таких як середнє значення, дисперсія та асиметрія.

3-й етап «Декомпозиція сигналу». Етап передбачає розбиття загального споживання енергії на окремі компоненти, які відповідають конкретним приладам або навантаженням. Це може бути досягнуто за допомогою таких методів, як аналіз незалежних компонентів (Independent Component Analysis, ICA), аналіз головних компонентів (Principal Component Analysis, PCA) і кластеризація. Наприклад, ICA можна використовувати для визначення незалежних джерел споживання енергії в даних, тоді як PCA можна використовувати для ідентифікації основних компонентів даних про споживання енергії. Кластеризацію можна використовувати для групування подібних моделей споживання енергії разом, які потім можна використовувати для визначення конкретних приладів або навантажень.

4-й етап «Ідентифікація приладів». Це процес ідентифікації конкретних приладів або навантажень на основі їх характеристик споживання енергії. Для цього можна використовувати такі методи, як нейронні мережі, дерева рішень і системи на основі правил. Наприклад, нейронні мережі можна навчити розпізнавати моделі споживання енергії конкретними приладами або навантаженнями, тоді як дерева рішень можна використовувати для ідентифікації пристроїв на основі їх моделей споживання енергії та інших характеристик. Системи, засновані на формалізованих правилах, можна використовувати для визначення конкретних правил ідентифікації приладів на основі моделей споживання ними енергії.

Під час ідентифікації енергоспоживаючих приладів також можна використовувати попередньо підготовлені моделі, які пройшли навчання на базах даних моделей споживання енергії різними пристроями, щоб ідентифікувати пристрої у виділеній будівлі.

Одним із найскладніших аспектів ідентифікації приладу є робота з варіаціями моделей споживання енергії, викликаними змінами моделей використання, факторами навколишнього середовища та іншими факторами. Щоб подолати цю проблему, потрібно використовувати комбінацію таких методів, як виділення ознак, розкладання сигналу та ідентифікація пристрою, щоб гарантувати надійність і точність результатів. Крім того, NILM потребує значної кількості даних і обчислювальних ресурсів, тому необхідні адекватні можливості зберігання та обробки даних.

Варто також зазначити, що NILM можна використовувати у промисловому секторі, наприклад на заводах, для моніторингу та оптимізації споживання енергії в конкретних процесах, а також для програм реагування на попит. Із зростанням популярності пристроїв для розумного будинку та Інтернету речей з'явилася можливість інтегрувати NILM із цими пристроями та надавати більш точні та детальні дані про споживання енергії, що може призвести до ще ефективнішого управління енергією.

Очевидно, що сучасні інтелектуальні лічильники не мають можливості задовольнити необхідні вимоги до даних NILM. Незважаючи на це, Інститут Фраунгофера в Німеччині за підтримки Федерального міністерства економіки провів дослідження у цій галузі та зробив наступні важливі висновки [25, 26]:

– частота дискретизації (прототип інтелектуального лічильника, розробленого Fraunhofer IMS у співпраці з партнерами, вимірює 8000 високочастотних точок вимірювання (струму та напруги) за

секунду, що вказує на дуже високу частоту дискретизації та дозволяє фіксувати детальні зміни загального споживання електроенергії);

– виявлення навантаження (дані високої роздільної здатності, отримані від прототипу інтелектуального лічильника, дозволяють виявляти навіть найменші зміни споживання електроенергії та призначати їх окремим пристроям / обладнанню; це демонструє, що прототип відповідає вимогам точної ідентифікації та дезагрегування навантажень)

– розробка алгоритму (у 2016 р. була протестована перша версія алгоритмів NILM. З тих пір ці алгоритми постійно вдосконалювалися з використанням методів машинного навчання для розпізнавання образів, що підкреслює важливість передових алгоритмів у NILM для аналізу даних високої роздільної здатності, зібраних прототипом інтелектуального лічильника);

– аналіз параметрів потужності (крім ефективної потужності, було досліджено вплив реактивної потужності, повної потужності та гармонік на якість виявлення; це означає, що можливості інтелектуального лічильника виходять за межі простого вимірювання ефективної потужності, забезпечуючи комплексний аналіз різних параметрів потужності для підвищення точності визначення навантаження);

– перевірка та забезпечення якості (ефективність алгоритмів постійно контролюється та перевіряється за реальними вимірюваннями (Ground Truth), щоб гарантувати найвищу можливу якість виявлення; це передбачає зосередженість на забезпеченні якості та відданість забезпеченню надійних результатів NILM).

Щодо перспектив розвитку та застосування NILM [25–27]. Загальносвітові тенденції демонструють необхідність впровадження інформаційних систем та використання новітніх технологій, таких як хмарні дата-центри, індустріальний інтернет речей, нейронні мережі, експертні системи, методологія великих даних для підвищення ефективності роботи енергетичного комплексу та керування об'єктами енергетики.

Збереження конфіденційності з одночасним використанням переваг NILM має вирішальне значення. Тим не менш, із зростаючим акцентом на енергоефективності та стійкості майбутнє NILM виглядає багатообіцяючим. З розвитком технологій точність і надійність алгоритмів NILM продовжуватимуть покращуватися. Інтеграція з інтелектуальними електромережами, пристроями Інтернету речей і системами управління енергією забезпечить плавний аналіз і контроль споживання енергії в режимі реального часу. Потенційні розробки включають покращене виявлення аномалій для визначення несправностей або коротких замикань приладів, оптимізацію стратегій реагування на попит та інтеграцію NILM у системи домашньої автоматизації. Ці досягнення дозволять споживачам, комунальним службам і підприємствам приймати обґрунтовані рішення, зменшувати витрати енергії та сприяти екологічнішому майбутньому.

Висновки

Показано, що Smart моніторинг може надати комунальним службам детальний опис звичок споживачів і максимізувати обізнаність користувачів про споживання, що призводить до зміни поведінки та згладжування глобального попиту на енергію. Наведено рушійні фактори ринку моніторингу та безпеки розумного будинку. Визначено, що зростання кількості користувачів Інтернету, стрімке поширення смартфонів і розумних гаджетів, а також зростаюче занепокоєння щодо віддаленого моніторингу будинків є ключовими факторами, які сприяють зростанню ринку безпеки розумного будинку. Методологія Smart моніторингу на прикладі будівлі відображає цілі як власне моніторингу, так і контролю: зменшити енергоспоживання будівель та / або зменшити для мешканців рахунки за електроенергію; запропонувати менеджерам електромережі більше інструментів, щоб краще керувати зростаючими потребами та можливими перебоями виробництва енергії завдяки зростаючій інтеграції ВДЕ в електромережі.

Проаналізовано неінтрузивний моніторинг навантаження (NILM) – метод аналізу даних про загальне електричне навантаження, отриманих шляхом вимірювання сили струму та напруги в одній точці, з наступним поділом загального навантаження на навантаження окремих пристроїв, який може відігравати ключову роль у цифровому переході в електроенергетиці. Ця технологія здатна не лише покращити поточну операційну діяльність компаній електроенергетики, а й лягти в основу формування нових відносин між суб'єктами енергоринків. Технології NILM досягла значного успіху завдяки прогресу в машинному навчанні, обробці сигналів і розпізнаванні образів. Визначено, що фундаментальними етапами типової структури NILM є збір даних, виділення ознак, декомпозиція сигналу та ідентифікація пристрою.

NILM – це потужна техніка з потенціалом значного підвищення енергоефективності та зменшення споживання енергії, однак для досягнення точних і надійних результатів важливо ретельно розглянути різні етапи технічної реалізації та математичні методи, які можна використовувати на кожному етапі. Технологія NILM має потенціал для значного підвищення енергоефективності та управління. Сьогодні важливо вирішити пов'язані з цим проблеми конфіденційності. Завдяки застосуванню надійних заходів із захисту конфіденційності даних і застосуванню прозорого підходу до збору та використання даних можна реалізувати переваги NILM без шкоди для конфіденційності користувачів.

Список використаної літератури

1. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація енергетики: сучасні тенденції та завдання. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, Вип. 65, Серпень 2023, С. 5–14.
2. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернищук І.С., Лисий В.В. Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 4. С. 7–23.
3. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Чернищук І.С., Лисий В.В. Техніко-економічні механізми розвитку локальних систем енергозабезпечення (Microgrid). *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 4. С. 7–22.
4. <https://medium.com/@powertechnologies141/what-is-smart-grid-monitoring-413b62f3a099>
5. <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/smart-monitoring-improves-distribution-grid-reliability.html>
6. <https://www.linkedin.com/pulse/smart-monitoring-utilities-especially-europe-its-time-1%3%BDsir/>
7. Stanimirovic A., Bogdanovic' M., Frtunic' M., Stoimenov L. Low-voltage electricity network monitoring system: Design and production experience. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2020, Vol. 16(1).
8. Pawar J.P., Amirthaganesh S., Arun Kumar S., Satiesh Kumar B. Real time energy measurement using smart meter. 2016 *Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, Coimbatore, India, 2016, pp. 1-5.
9. Girija R., Pavan R., Trupthi C., Mouna R., Jaishma Kumari B. Design of Smart Energy Meter for Intelligent Energy Network. 2020 *IJRTI*, Volume 5, Issue 2, Pp. 171–175.
10. Dario De Santis, Domenico Aldo Giampetruzzi, Gaetano Abbatantuono, Massimo La Scala. Smart metering for low voltage electrical distribution system using Arduino. 2016 *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, Italy, 2016.
11. Balamurugan S., Saravanakamalam D. Energy monitoring and management using internet of things. 2017 *International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, March 2017.
12. A-Guide-to-Smart-Metering <https://www.esmig.eu/wp-content/uploads/2021/11/ESMIG-A-Guide-to-Smart-Metering.pdf>
13. <https://www.linkedin.com/pulse/smart-home-monitoring-security-market-size-mcrkf/>
14. https://www.marketresearchintellect.com/download-sample/?rid=193045&utm_source=Pulse&utm_medium=031
15. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/smart-home-market-101900>
16. <https://www.fortunebusinessinsights.com/network-monitoring-market-108432>
17. <https://www.linkedin.com/pulse/smart-home-monitoring-security-market-growth-analysis-n8jhf/>
18. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/smart-home-security-market>
19. Kaustav Basu. classification techniques for non-intrusive load monitoring and prediction of residential loads. *Electric power*. Université de Grenoble, 2014. English. – NNT: 2014GRENT089.
20. Basu K., Debusschere V., Bacha S. Non Intrusive Load Monitoring: A Temporal Multi-Label Classification Approach, *IEEE transaction on Industrial Informatics*.
21. Çimen, H.; Çetinkaya, N.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. A Microgrid Energy Management System Based on NonIntrusive Load Monitoring via Multitask Learning. *IEEE Trans. Smart Grid* 2021, 12, 977–987.
22. Zhang C., Zhong M., Wang Z., Goddard N., Sutton C. Sequence-to-point learning with neural networks for nonintrusive load monitoring. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, New Orleans, LA, USA, 2–7 February 2018; pp. 2604–2611.
23. Somchai Biansoongnern, Boonyang Plungklang. Non-Intrusive Appliances Load Monitoring (NILM) for Energy Conservation in Household with Low Sampling Rate. 2016 *International Electrical Engineering Congress, iEECON2016*, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand. *Procedia Computer Science* 86 (2016). P.172 – 175.
24. <https://clouglobal.com/non-intrusive-load-monitoring-nilm-and-energy-monitoring/>
25. Purna Prakash K., Pavan Kumar Y.V. Systematic Statistical Analysis to Ascertain the Missing Data Patterns in Energy Consumption Data of Smart Homes. *International Journal Of Renewable Energy Research*. Vol.12, No.3, September, 2022. P. 1560-1573.
26. <https://medium.com/@akeptus/exploring-the-fundamentals-of-non-intrusive-load-monitoring-nilm-and-its-potential-to-improve-ba617be5d456>
27. <https://clouglobal.com/non-intrusive-load-monitoring-nilm-and-energy-monitoring/>

NON-INSTRUTIVE LOAD MONITORING – A PROSPECTIVE DIRECTION OF BUILDING ELECTRICITY CONSUMPTION MONITORING

It is shown that in order to adapt to changing models of energy supply and increase reliability, utilities need intelligent monitoring of power grids in order to track dynamic operating conditions in distribution networks. Smart monitoring can provide utilities with a detailed description of consumer habits and maximize user awareness of consumption, leading to behavioural change and smoothing global energy demand. The driving factors of the smart home monitoring and security market are given. An increasing number of internet users, the rapid proliferation of smartphones and smart gadgets, and growing concern about remote monitoring of homes have been identified as key factors contributing to the growth of the smart home security market. It is shown that the Smart monitoring methodology on the example of a building reflects the goals of both actual monitoring and control: to reduce the energy consumption of buildings and/or to reduce electricity bills for residents; to offer grid managers more tools to better manage the growing demand and possible interruptions in energy production due to the growing integration of RES into the grid.

Non-intrusive load monitoring (NILM) is analysed – a method of analysing data on the total electrical load, obtained by measuring the current and voltage at one point, followed by the division of the total load into a load of individual devices, which can play a key role in the digital transition in the electric power industry. This technology is able not only to improve the current operational activities of electricity companies but also to form the basis of the formation of new relations between subjects of energy markets. NILM technology has seen significant success thanks to advances in machine learning, signal processing, and pattern recognition. It was determined that the fundamental stages of a typical NILM structure are data collection, feature extraction, signal decomposition, and device identification.

Keywords: Smart monitoring, electric power system, intelligent meter, building electricity consumption, non-intrusive load monitoring, energy efficiency, demand management, privacy.

References

1. Kyrylenko O., Denysiuk S., Blinov I. Digital transformation of the energy industry: modern trends and tasks. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, Vol. 65, August 2023, pp. 5–14.
2. Denysiuk S., Beloha G., Chernyshchuk I., Lysyy V. Global trends in the implementation of renewable energy sources and the peculiarities of their implementation during the recovery of the economy of Ukraine. *Energy: economy, technologies, ecology*. 2022. No. 4. P. 7–23.
3. Denysiuk S., Melnychuk G., Chernyshchuk I., Lysyy V. Technical and economic mechanisms of development of local energy supply systems (Microgrid). *Energy: economy, technologies, ecology*. 2021. No. 4. P. 7–22.
4. <https://medium.com/@powertechnologies141/what-is-smart-grid-monitoring-413b62f3a099>
5. <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/smart-monitoring-improves-distribution-grid-reliability.html>
6. <https://www.linkedin.com/pulse/smart-monitoring-utilities-especially-europe-its-time-1%3BDsir/>
7. Stanimirovic A., Bogdanovic' M., Frtunic' M., Stoimenov L. Low-voltage electricity network monitoring system: Design and production experience. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2020, Vol. 16(1).
8. Pawar J.P., Amirhaganesh S., Arun Kumar S., Satiesh Kumar B. Real time energy measurement using smart meter. 2016 *Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, Coimbatore, India, 2016, pp. 1-5.
9. Girija R., Pavan R., Trupthi C., Mouna R., Jaishma Kumari B. Design of Smart Energy Meter for Intelligent Energy Network. 2020 *IJRTI*, Volume 5, Issue 2, Pp. 171–175.
10. Dario De Santis, Domenico Aldo Giampetruzzi, Gaetano Abbatantuono, Massimo La Scala. Smart metering for low voltage electrical distribution system using Arduino. 2016 *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, Italy, 2016.
11. Balamurugan S., Saravanakamalam D. Energy monitoring and management using internet of things. 2017 *International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, March 2017.
12. A-Guide-to-Smart-Metering <https://www.esmig.eu/wp-content/uploads/2021/11/ESMIG-A-Guide-to-Smart-Metering.pdf>
13. <https://www.linkedin.com/pulse/smart-home-monitoring-security-market-size-mcrkf/>
14. https://www.marketresearchintellect.com/download-sample/?rid=193045&utm_source=Pulse&utm_medium=031

15. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/smart-home-market-101900>
16. <https://www.fortunebusinessinsights.com/network-monitoring-market-108432>
17. <https://www.linkedin.com/pulse/smart-home-monitoring-security-market-growth-analysis-n8jhf/>
18. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/smart-home-security-market>
19. Kaustav Basu. Classification techniques for non-intrusive load monitoring and prediction of residential loads. *Electric power*. Université de Grenoble, 2014. English. – NNT: 2014GRENT089.
20. Basu K., Debusschere V., Bacha S. Non Intrusive Load Monitoring: A Temporal Multi-Label Classification Approach, *IEEE transaction on Industrial Informatics*.
21. Çimen, H.; Çetinkaya, N.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. A Microgrid Energy Management System Based on NonIntrusive Load Monitoring via Multitask Learning. *IEEE Trans. Smart Grid* 2021, 12, 977–987.
22. Zhang C., Zhong M., Wang Z., Goddard N., Sutton C. Sequence-to-point learning with neural networks for nonintrusive load monitoring. *In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, New Orleans, LA, USA, 2–7 February 2018; pp. 2604–2611.
23. Somchai Biansoongnern, Boonyang Plungklang. Non-Intrusive Appliances Load Monitoring (NILM) for Energy Conservation in Household with Low Sampling Rate. *2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON2016*, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand. *Procedia Computer Science* 86 (2016). P, 172 – 175.
24. <https://clouglobal.com/non-intrusive-load-monitoring-nilm-and-energy-monitoring/>
25. Purna Prakash K., Pavan Kumar Y.V. Systematic Statistical Analysis to Ascertain the Missing Data Patterns in Energy Consumption Data of Smart Homes. *International Journal Of Renewable Energy Research*. Vol.12, No.3, September, 2022. P. 1560-1573.
26. <https://medium.com/@akeptus/exploring-the-fundamentals-of-non-intrusive-load-monitoring-nilm-and-its-potential-to-improve-ba617be5d456>
27. <https://clouglobal.com/non-intrusive-load-monitoring-nilm-and-energy-monitoring/>

Надійшла: 11.04.2024
Received: 11.04.2024

РОЗРАХУНОК КОМПЛЕКСНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ОБЛАДНАННЯ

У сучасному індустріальному середовищі автоматизовані системи моніторингу обладнання відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності та безпеки технологічних процесів. Однак, забезпечення надійності цих систем вимагає ретельного розрахунку комплексних показників. Дослідження зосереджені на розробці методологій та алгоритмів для обчислення надійності автоматизованих систем моніторингу.

У статті виконаний огляд комплексних показників надійності автоматизованої системи моніторингу обладнання. Перш за все, робота визначає критичні компоненти системи, оцінює їхню надійність та взаємодію. Методи аналізу надійності включають у себе елементи теорії ймовірностей та математичної статистики. Серед них - розрахунок середнього часу безвідмовної роботи, ймовірності відмови та інші критерії, що дозволяють оцінити функціонування системи в реальних умовах. Відповідно до нормативних документів сформовано перелік показників надійності для обладнання та системи моніторингу в цілому. Приведена методика розрахунку комплексних показників надійності автоматизованої системи моніторингу. Наведений приклад розрахунку інтенсивності відмов та комплексних показників надійності для аналогового вимірювального каналу автоматизованої системи моніторингу обладнання. На прикладі розрахунку показано розрахункові інтенсивності відмов компонентів розрахункового аналогового каналу та сумарне напрацювання на відмову.

Отже, дослідження зосереджене на розробці та оптимізації методів розрахунку комплексних показників надійності автоматизованих систем моніторингу обладнання, що сприяє покращенню їх функціональності та забезпечує ефективний контроль технічних процесів в промислових умовах.

Ключові слова: автоматизована система, комплекс технічних засобів, програмно технічний комплекс, напрацювання на відмову, надійність, інтенсивність відмов, комплексні показники надійності.

Автоматизована система моніторингу обладнання призначена для здійснення консолідації і збору технологічної інформації від обладнання та інших автоматизованих систем на підстанції, уніфікації, зберігання і забезпечення можливості інформаційної взаємодії з суміжними системами і верхнім рівнем системи. При розробці заходів по забезпеченню надійності автоматизованої системи моніторингу обладнання враховуються елементи системи, відмови яких впливають на збір, обробку та передачу даних на верхній рівень та суміжним системам.

Відмовою автоматизованої системи моніторингу обладнання є втрата (неотримання) інформації на будь-якому рівні, при взаємодії окремих компонентів системи між собою або з зовнішніми системами, а також втрата технологічної інформації, що зберігається на будь-якому рівні ієрархії системи. Критерієм відмови є ненадання інформації зацікавленим сторонам.

В якості показників надійності прийнято використовувати середній час напрацювання на відмову по кожній функції, а також розрахункові коефіцієнт готовності K_G та коефіцієнт технічного використання $K_{ТВ}$.

Автоматизована система моніторингу обладнання виконується з підвищеною надійністю і задовольняє наступні показники надійності:

- середня ймовірність неспрацьовування за рік не більше ≥ 8760 год;
- параметр потоку помилкових спрацьовувань на годину не більше $5 \cdot 10^{-6}$.

Показниками апаратної надійності комплексу технічних засобів (КТЗ), що використовуються в системі моніторингу обладнання, є середнє напрацювання на відмову і середній час відновлення пристроїв, які реалізують функції моніторингу. Значення цих показників наведені в табл. 1.

Розглянемо показники надійності обладнання системи моніторингу, відповідно до [1-3]:

Показники надійності вимірювальних трансформаторів струму (ТС) і напруги (ТН):

- середній термін служби - не менше 25 років;
- середнє напрацювання на відмову T_0 не менше 300 000 год.

Показники надійності для контролерів приєднання :

- середнє напрацювання на відмову T_0 не менше 100 000 год;
- середній час відновлення $T_в$ не більше 24 год.

Показники надійності для засобів локальної обчислювальної мережі (сервери, комутатори, маршрутизатори, контролери комунікацій) :

- середнє напрацювання на відмову T_0 не менше 150 000 год;

- середній час відновлення $T_в$ не більше 6 год.
- Показники надійності каналотворюючої апаратури (конвертори, модеми, мультиплексори):
- середнє напрацювання на відмову - не менше 100 000 год;
- середній час відновлення - не більше 6 год.
- Показники надійності джерел безперебійного живлення:
- середнє напрацювання на відмову - не менше 50 000 год;
- середній час відновлення - не більше 6 год.

Таблиця 1 – Показники надійності функцій АС моніторингу

№	Функція, формулювання відмови	Середнє напрацювання на відмову, год, не	Середній час відновлення, год, не більше
1	Збирання і первинна обробка аналогової інформації:		
	відмова одного каналу;	8760	≤6
	одночасний відмова всіх каналів;	87600	≤6
2	Збирання і первинна обробка дискретної інформації:		
	відмова одного каналу;	8760	≤6
	одночасна відмова всіх каналів;	87600	≤6

В якості показників надійності програмного забезпечення системи моніторингу слід використовувати інтенсивність перезапусків (перезавантажень). Оцінку значень інтенсивності і тривалості перезапусків (перезавантажень) програмного забезпечення слід робити за результатами спостереження за роботою системи під час дослідної експлуатації.

При виконанні планових (профілактичних) робіт на обладнанні системи моніторингу надійність системи не знижується. Цілісність і коректність інформації системи зберігаються при відключенні електроживлення, при виявленні відмов компонентів, що входять в систему. Необхідне забезпечення вільного доступу до окремих блоків системи для контролю їх працездатності і заміни.

Для підтвердження заданих показників надійності проводиться розрахунок надійності системи моніторингу. Відмова одного змінного елемента програмно технічного комплексу (ПТК) або каналу зв'язку не призводить до необхідності зниження навантаження, зупинки або відключення обладнання.

Висока надійність системи моніторингу забезпечується при:

- пошкодженні всіх кабелів, що йдуть в одному потоці, каналі, тунелі – географічно рознесеними трасами основного і резервного каналу;
- пошкодженні одного з кабелів резервованої системної шини – кільцевою топологією мережі;
- повної втрати електропостачання з боку змінного/постійного струму – системою гарантованого живлення;
- системи власних потреб – системою гарантованого живлення;
- пошкодженні будь-якого з одиночних елементів апаратури ПТК – наявністю комплекту запасних частин, інструментів, приладдя (ЗІП).

Перераховані вимоги до надійності забезпечені відповідним вибором і розробкою сукупності технічних, програмних та інформаційних засобів і регламентом їх обслуговування.

Для оцінки комплексних показників надійності системи моніторингу приведемо розрахунок для аналогового каналу струму I_a . Розрахунок виконується за наступними формулами (1-3):

$$\lambda_i = \frac{1}{\tau_i}, \quad (1)$$

де λ_i – інтенсивність відмови i -го елемента системи; τ_i – середній час напрацювання на відмову i -го елемента системи;

$$\lambda_i = \sum \lambda_i, \quad (2)$$

де λ_i – інтенсивність відмови системи.

$$\tau = \frac{\sum \lambda_i \cdot \tau_i}{\lambda}, \quad (3)$$

де τ_i – середній час відновлення i -го елемента системи; τ – середній час відновлення системи.

Середній час напрацювання на відмову системи визначається за формулою (4):

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}, \quad (4)$$

Середній та верхній рівні включають в себе серверне обладнання, комунікаційну апаратуру та обладнання зв'язку. Середній та верхній рівні з точки зору надійності розглядається як паралельно-послідовне з'єднання вищезгаданих елементів.

Для послідовних ділянок системи розрахунок виконується за формулами (1-4).

Для паралельних ланок системи розрахунок виконується за формулою (5):

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (5)$$

де λ_1, λ_2 – інтенсивності відмови взаєморезервованих елементів; λ – інтенсивність відмови системи.

Розглянемо схему формування аналогового сигналу I_a . Аналоговий сигнал від ТС через реєстратор аварійних подій (РАП) та комутатори поступає на сервер. РАП обробляє аналоговий сигнал (перетворює, ранжує за ознаками, виділяє гармонічні складові і т.д.) для подальшої обробки та зберігання на сервері (формування баз даних, відображення на АРМ, ретрансляція).

Розрахункова схема надійності формування аналогового сигналу I_a представлена на рис. 1

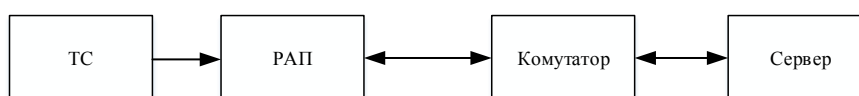


Рисунок 1 – Розрахункова схема надійності аналогового сигналу I_a

Інтенсивність відмов каналу виміру струму фази А визначається співвідношенням (6):

$$\lambda_{Ia} = \lambda_{ТС} + \lambda_{РАП} + \lambda_{КОМ} + \lambda_{СРВ}, \quad (6)$$

Під каналом вимірювання струму фази А розуміють: збір, оброблення, зберігання, відображення, аналіз на достовірність, аналіз виходу за межі попереджувальних/аварійних уставок, обмін інформацією з приладами середнього/верхнього рівня системи, суміжними системами на підстанції, передача інформації на вищі рівні управління і т.д.

Час напрацювання на відмову каналу вимірювання струму фази А визначається співвідношенням (7):

$$T_{0(Ia)} = \frac{1}{\lambda_{(Ia)}}, \quad (7)$$

Середній час напрацювання на відмову $T_0(T_{cp})$ обладнання, що бере участь у формуванні і передачі аналогового сигналу представлений в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку інтенсивності відмов для аналогового каналу I_a

Склад обладнання	$T_0(T_{cp})$, год	$\lambda_0(cp)$, год ⁻¹
Трансформатор струму	300000	$\frac{1}{300000} = 3,33 \cdot 10^{-6}$
РАП	87600	$\frac{1}{87600} = 1,14 \cdot 10^{-5}$
Комутатор	150000	$\frac{1}{150000} = 6,66 \cdot 10^{-6}$
Сервер АС	150000	$\frac{1}{150000} = 6,66 \cdot 10^{-6}$
Сумарна інтенсивність відмов $\Sigma\lambda_{(Ia)}$, год⁻¹		$2,8 \cdot 10^{-5}$
Сумарне напрацювання на відмову $\Sigma T_{0(Ia)}$, год		35714

Комплексними показниками надійності є коефіцієнт готовності та коефіцієнт технічного використання. Комплексні показники надійності, на відміну від одиничних, характеризують одночасно кілька властивостей суб'єктів.

Коефіцієнт готовності – це ймовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачається.

Згідно із [1] середній час усунення несправності, виявленої засобами діагностування, становить не більше $\tau = 6$ год.

Коефіцієнт готовності визначається за формулою (8):

$$K_G = \frac{T_{CP}}{T_{CP} + \tau}, \quad (8)$$

$$K_G = \frac{35714}{35714+6} = 0,9998$$

Коефіцієнт технічного використання – це відношення математичного сподівання часу перебування об'єкта в працездатному стані за певний період експлуатації до суми математичних сподівань часу перебування об'єкта в працездатному стані; часу простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням, і часу ремонту за той же період експлуатації, тобто характеризує фактичний термін роботи машини:

Коефіцієнт технічного використання визначається за формулою (9):

$$K_{TB} = \frac{T_O}{T_O + \tau + T_{TO}}, \quad (9)$$

де T_O – період працездатного стану; T_{TO} – період технічного обслуговування, $T_{TO} = 40$ год.

$$K_{TB} = \frac{8760}{8760+6+40} = 0,9947$$

Отримані результати розрахунків коефіцієнту готовності та коефіцієнту технічного використання підтверджують високу надійність КТЗ автоматизованих систем моніторингу обладнання, що в свою чергу створює значний вплив на надійність системи моніторингу в цілому. Слід також зазначити, що високий рівень надійності автоматизованих систем також досягається шляхом впровадження сучасних технологій так званого «безшовного» резервування PRP (Parallel Redundancy Protocol) та HSR (High-availability Seamless Redundancy) [4].

Список використаної літератури

1. Стандарт підприємства. Технічна політика НЕК Укренерго у сфері розвитку та експлуатації магістральних та міждержавних електричних мереж. СОУ НЕК 20.261:2023
2. Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Додаткові вимоги до трансформаторів струму (EN 61869-2:2012, IDT; IEC 61869-2:2012, IDT). ДСТУ EN 61869-2:2017
3. Трансформатори вимірювальні. Частина 5. Додаткові вимоги до ємнісних трансформаторів напруги (EN 61869-5:2011; EN 61869-5:2011/AC:2015, IDT; IEC 61869-5:2011, IDT). ДСТУ EN 61869-5:2017
4. IEC 62439-3:2021 Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR).

CALCULATION OF COMPLEX RELIABILITY INDICATORS OF THE AUTOMATED EQUIPMENT MONITORING SYSTEM

In the modern industrial environment, automated equipment monitoring systems play an important role in ensuring the efficiency and safety of technological processes. However, ensuring the reliability of these systems requires careful calculation of complex indicators. Research is focused on the development of methodologies and algorithms for calculating the reliability of automated monitoring systems.

The article provides an overview of the comprehensive reliability indicators of the automated equipment monitoring system. First of all, the work defines the critical components of the system, evaluates their reliability and interaction. Reliability analysis methods include elements of probability theory and mathematical statistics. Among them is the calculation of the average time of failure-free operation, the probability of failure and other criteria that allow evaluating the functioning of the system in real conditions. In accordance with regulatory documents, a list of reliability indicators for equipment and the monitoring system as a whole has been created. The methodology for calculating complex indicators of the reliability of the automated monitoring system is given. An example of failure intensity calculation and complex reliability indicators for an analog measuring channel of an automated equipment monitoring system is given. The calculation example shows the estimated failure intensities of the components of the calculated analog channel and the total working time per failure.

Therefore, the research is focused on the development and optimization of methods for calculating complex indicators of the reliability of automated equipment monitoring systems, which helps to improve their functionality and ensures effective control of technical processes in industrial conditions.

Keywords: *automated system, complex of technical means, software and technical complex, working up to failure, reliability, intensity of failures, complex indicators of reliability.*

References

1. Enterprise standard. Technical policy of NPC Ukrenergo in the field of development and operation of trunk and interstate electric networks. SOU NPC 20.261:2023
2. Measuring transformers. Part 2. Additional requirements for current transformers (EN 61869-2:2012, IDT; IEC 61869-2:2012, IDT). DSTU EN 61869-2:2017
3. Measuring transformers. Part 5. Additional requirements for capacitive voltage transformers (EN 61869-5:2011; EN 61869-5:2011/AC:2015, IDT; IEC 61869-5:2011, IDT). DSTU EN 61869-5:2017
4. IEC 62439-3:2021 Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR).

Надійшла: 28.03.2024

Received: 28.03.2024

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

В сучасному світі не володіння енергоресурсами займають домінуюче місце, а інноваційні технології ефективного використання енергоресурсів, відновлювані джерела енергії, засоби інтелектуалізації систем енергопостачання та енергоспоживання. Змінилась філософія конкурентного світу: від суспільства безлімітного споживання ресурсів – до сталого розвитку, «зеленого переходу», «розумного» енергоспоживання та в перспективі – активного застосування штучного інтелекту. В цих умовах зростає роль підвищення енергоефективності як головного чинника, який “тягне” за собою модернізацію всього підприємства або енергоефективне проектування нового, підвищення продуктивності виробництва та якості продукції, поліпшення екологічної ситуації. Принцип «Енергоефективність понад усе» повинен стати основним гаслом при відновленні економіки України та переході від сировинної моделі розвитку до галузей з високим ступенем переробки (машинобудування), які дозволяють, в тому числі, розвивати вітчизняний ВПК.

Найбільший вплив на ефективне використання електроенергії підприємством спричиняє енергоефективність електромеханічної системи (ЕМС) як основного споживача електроенергії (понад 70% у промисловості). Інтелектуалізація споживання електричної енергії передбачає створення цифрової системи управління енергоефективністю ЕМС в реальному часі. На жаль, на сьогодні утвердилась практика оцінювання енергоефективності ЕМС в кращому випадку аперіодично, наприклад, під час проведення енергетичного аудиту. Тому актуальним завданням є створення інтелектуальних систем управління ефективністю споживання електроенергії ЕМС та контролю за чинниками, які на неї впливають: якість електричної енергії, завантаження обладнання та технічний стану. Сучасний розвиток вимірювальної та обчислювальної техніки дозволяють створювати подібні системи, які загалом складаються з технічної (давачі струму, напруги, технологічних параметрів виробничого процесу) та програмної частин.

Ключові слова: енергетичний менеджмент, програмне забезпечення, електромеханічна система, енергоефективність, клієнт-серверна архітектура.

Вступ. Довоєнна сировинна модель економіки України, що базувалась на експорті непереробленої продукції сільського господарства, залізної руди та металевих напівфабрикатів не дає можливості реалізувати високий науковий та технічний потенціал України, де понад 80% населення охоплено вищою освітою. До речі, за цим показником Україна випереджає переважну кількість країн розвинутого Заходу, зокрема, навіть Німеччину [1]. Сировинна модель диктує повну залежність від тенденцій світової економіки і не потребує залучення великої кількості професійної та високоосвіченої робочої сили. Будь-яка фінансова криза спричиняє суттєве зниження попиту на сировинні товари та глибоке економічне падіння в державі, знецінення національної валюти. При цьому сировинна економіка продукує товари з “негативним потенціалом”, коли собівартість кожної наступної видобутої тони залізної руди (тільки експорт якої у 2021 році сягнув 7 млрд. доларів) чи кам’яного вугілля, дорожче попередньої, і головне – не може забезпечити розвиток ВПК України. Дисбаланс між занепадом сектору глибокої переробки сировини (машинобудування) та довоєнним розвитком, пов’язаними із експортом ІТ-послуг, сфери якісних побутових послуг “24/7”, торгівлі та електронної комерції не є винятком із загальної сировинної моделі – це, як правило, – атрибут країн з бідним населенням, таких як Україна чи Індія.

Післявоєнне відновлення України повинно базуватись передусім на розвитку машинобудівного комплексу із залученням закордонних інвестицій та передових технологій, що включають повну інтелектуалізацію виробничих процесів.

Постановка задачі дослідження. Дотепер в енергетичному менеджменті деталізоване управління раціональним використанням енергії не поширювалося на конкретного технологічного споживача, його режими роботи. В першу чергу розглядалось підприємство в цілому або окрема технологічна лінія. Приймались до уваги загальні показники по підприємству - питомі витрати енергоресурсів на виробництво товарів або надання послуг. Контроль конкретного обладнання, наприклад, ЕМС, не був постійним і безперервним та відбувався за фактом аварійної ситуації, а не в реальному часі, коли неефективне споживання електроенергії мало місце значний проміжок часу.

Останніми роками енергетичний менеджмент набув нових завдань, а саме, – він став поширюватися на кінцевого споживача. Це є сучасним підходом у методології енергетичного менеджменту – запроваджується високий ступінь деталізації, контроль енергетичної ефективності ЕМС і, відповідно, – оперативне реагування на погіршення енергоефективності. Мета полягає у забезпеченні енергоефективної роботи кожної окремої одиниці обладнання в реальному часі. Ці нові завдання пов'язані з постійним суттєвим удорожчанням електричної енергії, коли основна складова вартості життєвого циклу ЕМС – витрати на електричну енергію – становлять в середньому 85% від усіх витрат за життєвий цикл обладнання [2, 3]. Розв'язати такі задачі можна лише шляхом охоплення споживачів електроенергії сучасними засобами інтелектуалізації: цифровими давачами струму, напруги, технологічних параметрів виробництва, мікроконтролерів, потужними робочими станціями для збору та обробки інформації з використанням можливостей штучного інтелекту, сучасного спеціалізованого програмного забезпечення (рис. 1).

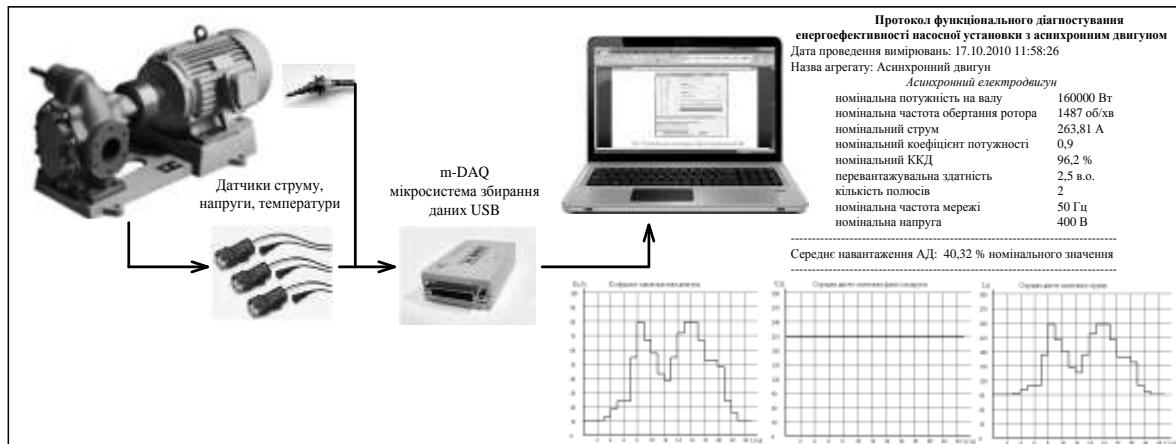


Рисунок 1 - Структурна схема мобільного програмно-апаратного комплексу для контролю енергоефективності ЕМС

Основні матеріали дослідження. Система інтелектуалізації управління споживанням електроенергії ЕМС має п'ять компонент: вимірювальна (давачі), обчислювальна (мікроконтролери, сервери, ПК, смартфони), методична (методика розрахунків параметрів ЕМС), комунікаційна (мережа по якій передаються дані по протоколу HTTPS) та програмна. Вимірювальна та методична, та часткова обчислювальна компоненти висвітлені у монографії [4].

Що стосується програмної частини, то найкраще завданням створення систем інтелектуалізації споживачів електричної енергії відповідає клієнт-серверна архітектура – як один із архітектурних шаблонів програмного забезпечення та домінуюча концепцією у створенні розподілених мережних застосунків, що передбачає взаємодію та обмін даними між ними (клієнт-сервер). Така архітектура передбачає три основні компоненти [5]:

- сервер або набір серверів, які надають інформацію або інші послуги програмам, які звертаються до них (сервер баз даних та сервер обробки запитів / відповідей);
- клієнт або набір клієнтів, які використовують сервіси, що надаються сервером обробки запитів / відповідей (браузер ПК, застосунок у смартфоні);
- мережа, яка забезпечує взаємодію між клієнтами та серверами (протоколи HTTP або HTTPS).

Клієнти функціонують паралельно і незалежно один від одного. Типовою є ситуація, коли один сервер одночасно обробляє запити від різних клієнтів. Клієнти мають знати адресу серверу обробки запитів / відповідей, але можуть не мати жодного уявлення про існування інших клієнтів.

Модель клієнт-серверної взаємодії визначається перш за все проблемою розподілу функцій між клієнтом та сервером: надсилання та обробки запитів / відповідей, математичних розрахунків, керування поточними даними застосунку, їх кешування, аутентифікації, авторизації та ідентифікації користувачів, верифікації даних на різних етапах роботи програмного забезпечення, відслідковування змін вимірювальних даних та реагування на ці зміни, формування зовнішнього інтерфейсу для взаємодії з користувачем в залежності від прав та дозволів на доступ до інформації тощо.

Логічно можна відокремити три рівні операцій (рис.2):

- рівень подання даних, який по суті являє собою інтерфейс користувача і відповідає за представлення інформації користувачеві (енергоменджеру) і введення від нього запитів (шар клієнта);
- прикладний рівень, який реалізує основну логіку застосунку і на якому здійснюється необхідна обробка інформації (шар бізнес-логіки).
- рівень управління даними, який забезпечує зберігання даних та доступ до них (шар даних) [6].

Таким чином постає задача розподілення складних математичних обчислень (рис.3) та інших завдань між клієнтською та серверною частинами програмного забезпечення. Одним з вирішення цієї задачі є архітектура застосунків за програмним паттерном Model-View-Controller (MVC). MVC – це шаблон у розробці програмного забезпечення, який зазвичай використовується для реалізації та відокремлення інтерфейсів: користувача (енергоменеджера), даних і та логіки управління застосунком та даними. Це підкреслює розмежування між бізнес-логікою програмного забезпечення та зовнішнім відображенням інформації [7].

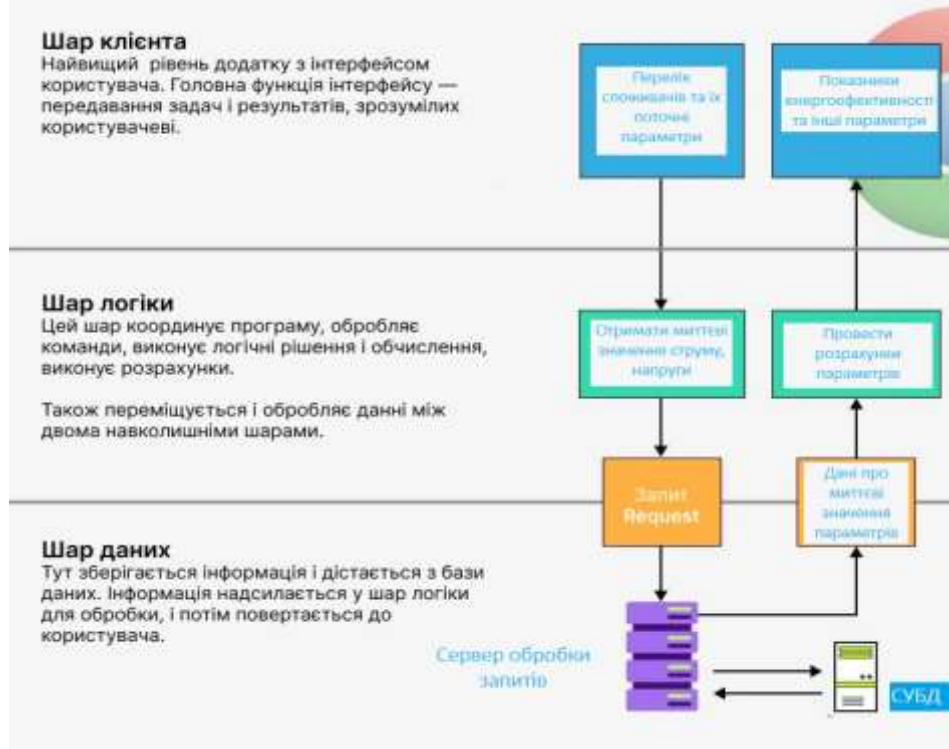


Рисунок 2 - Принципова схема тришарової структури клієнт-серверної архітектури

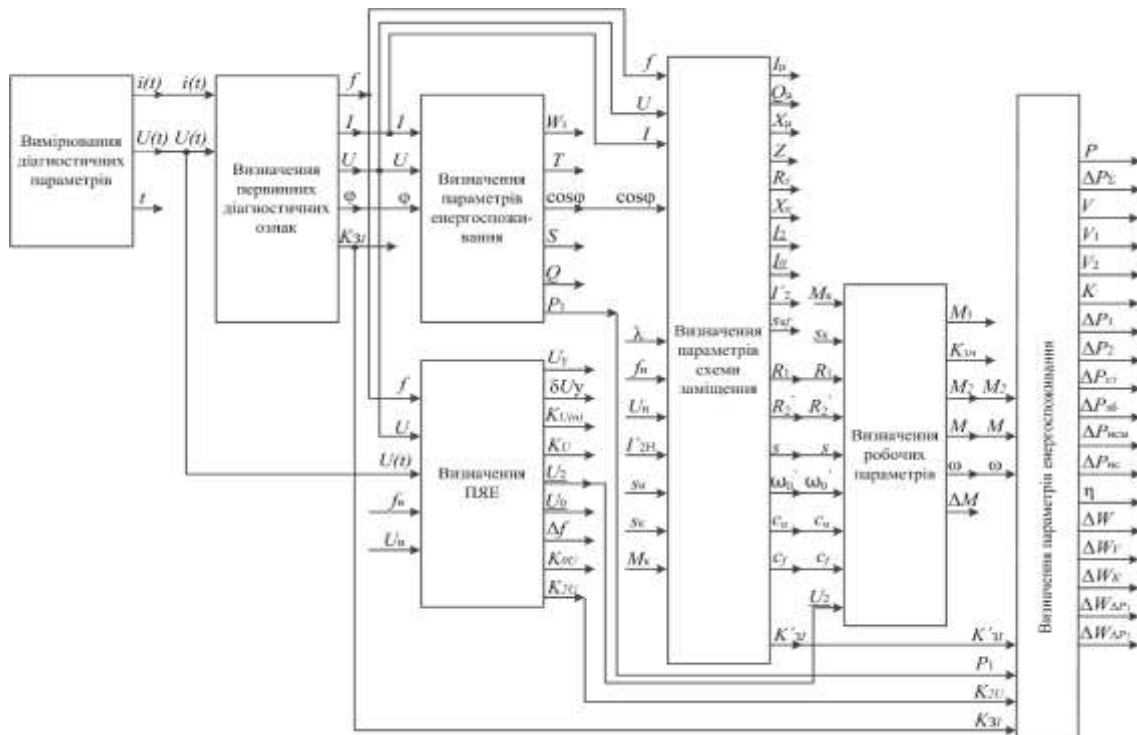


Рисунок 3 - Структурна схема визначення параметрів процесу перетворення електроенергії EMC

Три шари шаблону проектування програмного забезпечення MVC можна описати наступним чином (рис. 4):

1. “Модель” (Model): управляє даними та бізнес-логікою.
2. “Вигляд” (View): керує макетом web-сторінки та її відображенням.
3. “Контролер” (Controller): направляє http запити (request) від користувача (енергоменеджера) до необхідного модуля (програмної функції, методів класу) “Моделі” та верифікує відповіді від сервера (response) для модуля “Вигляд”, який відповідає за відображення результатів користувачеві.

“Контролер” забезпечує зв'язок між користувачем та системою, контролює та спрямовує дані від користувача до системи та навпаки, використовує компоненти “Модель” та “Вигляд” для реалізації необхідної дії [6, 8, 9].

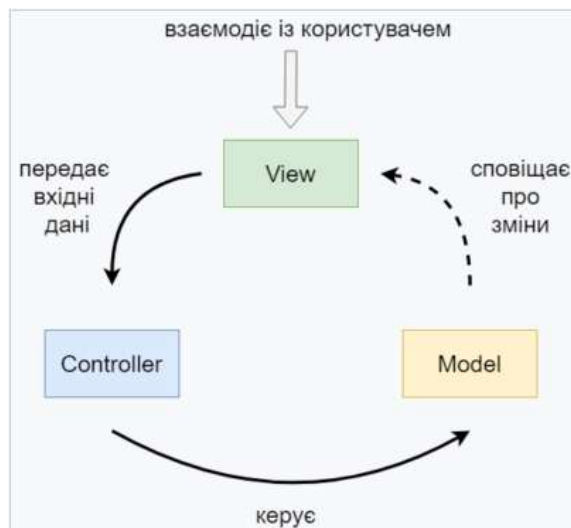


Рисунок 4 - *Діаграма взаємодії між компонентами шаблону MVC*

У випадку застосування такої моделі при написанні програмного забезпечення для мікроконтролерів (рис. 1), розподіл задач виглядатиме наступним чином:

1. “Контролер” відповідає за отримання та опрацювання сигналів від вхідних інтерфейсів
2. Компонента “Модель” у випадку мікроконтролерів по суті реалізує поведінку пристрою в залежності від поточного стану та інформації отриманої з компоненти “Контролер”.
3. Компонента “Вигляд”, - у випадку мікроконтролерів, - це пристрій візуалізації інформації (рідкокристалічний дисплей) чи певний виконавчий пристрій.

Енергоменеджер для отримання інформації щодо стану енергоефективності споживачів на підприємстві взаємодіє з інтерфейсом web-сторінки застосунку - клієнтською складовою в браузері, що написана на мові програмування JavaScript з використанням бібліотеки React, Angular чи Vue. В результаті чого браузер надсилає HTTP запити: GET, POST, PUT та інші.

Основна програмна функція “Контролера” в цьому випадку – викликати функції, методи в необхідних об’єктів, управляти доступом до ресурсів виконання завдань, які поставлені користувачем - енергоменеджером. За поточні дані застосунку, які зберігаються в оперативній пам’яті комп’ютера та станом програми відповідає окрема бібліотека, наприклад, Redux. За зовнішнім виглядом web-сторінки користувача може відповідати також зовнішня бібліотека стилей, наприклад Bootstrap.

“Модель” – набір алгоритмів, які використовуються для роботи з даними, що становлять бізнес-логіку програми. Проектування програми завжди починається з побудови моделей об’єктів, якими вона оперує. Схематичне зображення прикладу алгоритму моделі наведено на рис. 2

“Модель” оброблює для “Контролера” набір даних, на які зробив запит енергоменеджер (поточне ККД споживача, спожита ним електроенергія, графік електричного навантаження тощо). Таким чином “Модель” містить найбільш важливу частину логіки програмного забезпечення – методи розрахунку та вирішує завдання, поставлені енергоменеджером (розрахунок втрат, рішення оптимізаційних завдань щодо споживання електроенергії в залежності від технологічних параметрів виробництва тощо). “Контролер” містить переважно організаційну логіку та оброблює запити користувача програми - енергоменеджера, тому ці завдання виконуються, як правило, на стороні сервера з використанням програмного забезпечення, наприклад, Node.js, бібліотеки Express та хмарних сервісів провідних іт-компаній світу. Важливо зазначити, що клієнтська та серверна частина пишеться на одній мові програмування - JavaScript (Typescript) за допомогою спеціалізованих фреймворків та бібліотек, що значно

спрощує розробку. Мова програмування JavaScript (Typescript) останні роки є найбільш розповсюдженою у світі, достатньо гнучкою та дозволяє писати програмний код як в функціональній так і в об'єктно-орієнтовній парадигмі програмування, або у змішаному стилі.

Шар програмного забезпечення "Вигляд" відповідає за візуалізацію та представлення кінцевих результатів користувачеві, які отримані з "Моделі". Він може бути шаблоном HTML-коду, що заповнюється даними на стороні сервера. Але найефективніше це робити на стороні клієнта та, відповідно, повертати з сервера дані у форматі JSON (JavaScript Object Notation), з якими може працювати як браузер комп'ютера так і застосунок для смартфона. Передача саме даних, а не кінцевого HTML коду є значною перевагою, адже зменшує навантаження на сервер, мережу та є універсальним рішенням як для ПК так і смартфона.

Наприклад, якщо користувач застосунку відкриє список споживачів електричної енергії та вибере опцію для перегляду поточних значень ККД, всю послідовність дій можна описати у вигляді наступних кроків:

1. Користувач натискає на посилання «споживачі» і браузер надсилає GET-запит на endpoint (сервер обробки запитів / відповідей), наприклад, "/consumptions/efficiency".

2. "Контролер" верифікує запит користувача, який повинен пройти авторизацію та аутентифікацію (як правило, за допомогою cookies або jwt-токенів). Потім "Контролер" звертається до відповідного модуля "Моделі" та надсилає запит провести розрахунки, які необхідні користувачеві.

3. "Моделі" верифікує http-запит, звертається до серверу баз даних (наприклад, MongoDB, що працює у зв'язці з Mongoose - засобом моделювання програмних структур даних - об'єктів та їх зв'язку з сервером на Node.js), в якому зберігаються результати вимірювання та отримує набір даних в форматі JSON про миттєві значення струму, напруги та технологічних параметрів виробничого процесу. На основі цих даних "Моделі" проводить розрахунки параметрів, що запитує користувач.

4. "Контролер" одержує кінцевий результат розрахунків та верифікує його.

5. "Контролер" визначається з тим, які дані надати користувачеві у форматі JSON (текстовий файл з даними представленими у вигляді програмної структури даних – об'єкт) - зі списком споживачів та їх поточного ККД, або сторінку з помилкою, якщо вона мала місце.

6. Сервер віддає клієнту JSON файл, сформований "Контролером" за певним шаблоном.

7. Компонента "Вигляд" створює та заповнює HTML-сторінку (назва споживача, ККД, інші показники, елементи інтерфейсу сторінки) вже на стороні клієнта, наприклад, з використанням бібліотеки React та відображає користувачеві кінцевий результат (енергоменеджеру).

У мобільних програмах та веб застосунках з використанням, наприклад, бібліотеки, Redux використовуються події та механізми підписки на ці події (програмні паттерни "диспетчер", "спостерігач"). При такому підході "Вигляд" підписується на зміни "Моделі" (наприклад, зміни вимірювальних даних). Далі, коли відбувається подія (наприклад, оновлення вимірювальних даних), викликається "Контролер". Він надає "Моделі" команду щодо проведення нових розрахунків та їх відображення засобами компоненти "Вигляд".

Таким чином, якщо вимірювальні дані оновилися, компонента "Моделі" генерує подію про зміну цих даних. Всі складові інтерфейсу "Вигляд", які підписалися на цю подію (для яких важлива зміна саме цих даних), отримують оновлені результати розрахунків та оновлюють дані у інтерфейсі користувача.

Висновки. Перспективним інструментом енергоменеджменту є впровадження інтелектуальних систем управління енергоефективністю ЕМС на основі клієнт-серверної архітектури з програмним розділенням шарів бізнес-логіки, даних та представлення результатів - визначення енергоефективності, інших параметрів для оперативного реагування на збільшення електроспоживання, погіршення технічного стану чи порушення технологічного режиму. Оптимізація електроспоживання ЕМС, прийняття обґрунтованих рішень щодо подальшої їх експлуатації шляхом виявлення неекономічних, неефективних, аварійних режимів роботи, прихованих дефектів засобами інтелектуальних систем управління енергоефективністю передбачає також наявність інформації про миттєві значення струму й напруги ЕМС, розрахунок параметрів за діагностичними й еталонними моделями в режимі реального часу; виявлення відхилень параметрів від встановлених.

Інтелектуальні систем управління енергоефективністю ЕМС з використанням програмного архітектурного паттерну MVC дозволяє впровадити сучасні інформаційні smart-технології у систему енергетичного менеджменту підприємства та автоматизувати виконання таких складових стандарту ДСТУ ISO 50001:2020, як встановлення енергетичної базової лінії, контроль індикаторів енергоефективності, здійснення моніторингу та необхідних вимірювань для визначення рівня енергоефективності, проведення енергоаналізу, енергопланування та формування технічних звітів тощо.

Список використаної літератури

1. Стратегія розвитку вищої освіти України на 2021-2023 роки. Міністерство освіти на науки України. -Київ: 2020., -71 с. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/rizne/2020/09/25/rozvitku-vishchoi-osviti-v-ukraini-02-10-2020.pdf>
2. Прокопенко В.В. Енергетичний аудит: Навчальний посібник / В.В. Прокопенко, О.О. Закладний, П.В. Кульбачний. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 400 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56296>
3. Закладний О.М. Електропривод: навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. –К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 316 с URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56294>
4. Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія / О.О. Закладний – К.: Видавництво «Лібра», 2013. – 195 с.: ил URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50554>
5. Клієнт-серверна архітектура. Вікіпедія: Вільна Енциклопедія URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Клієнт-серверна_архітектура
6. Підхід MVC. Модуль 3.Java Professional. URL[^]<https://javarush.com/ua/quests/lectures/ua.questservlets.level14.lecture02>
7. MVC. MDN Web Docs Glossary: Definitions of Web-related terms. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/MVC>
8. Триярусна архітектура. Вікіпедія: Вільна Енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Триярусна_архітектура
9. Модель-вид-контролер. Вікіпедія: Вільна Енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Модель_вид_контролер

O. Zakladnyi¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

V. Prokopenko¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5518-5802

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

SOFTWARE ARCHITECTURE OF INTELLIGENT SYSTEMS FOR MANAGING ENERGY EFFICIENCY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

In the modern world, it is not the possession of energy resources that occupy a dominant place, but innovative technologies for the efficient use of energy resources, renewable energy sources, means of intellectualization of energy supply systems and energy consumption. The philosophy of the competitive world has changed: from a society of unlimited consumption of resources to sustainable development, "green transition", "smart" energy consumption and, in the future, the active use of artificial intelligence. Under these conditions, the role of increasing energy efficiency is growing as the main factor that "entails" the modernization of the entire enterprise or the energy-efficient design of a new one, increasing production productivity and product quality, and improving the environmental situation. The principle of "Energy efficiency above all" should become the main slogan in the recovery of Ukraine's economy and the transition from the raw material model of development to industries with a high degree of processing (mechanical engineering), which will allow, among other things, the development of the domestic military-industrial complex.

The greatest impact on the efficient use of electricity by the enterprise is caused by the energy efficiency of the electromechanical system (EMS) as the main consumer of electricity (more than 80% in industry). Intellectualization of electrical energy consumption involves the creation of a digital EMS energy efficiency management system in real time. Unfortunately, today the practice of assessing the energy efficiency of EMS has been established at best periodically, for example, during an energy audit. Therefore, the urgent task is to create intelligent systems for managing the efficiency of EMS electricity consumption and monitoring the factors that affect them: the quality of electrical energy, equipment loading and the technical condition of EMS. Modern developments in measuring and computing technology make it possible to create such systems, which consist of technical (current, voltage sensors, technological parameters of the production process) and software parts.

A promising tool for energy management is the introduction of intelligent EMS energy efficiency management systems based on client-server architecture with software separation of layers of business logic, data and presentation of results - determination of energy efficiency, other parameters for prompt response to an increase in power consumption, deterioration of technical condition or violation of the technological regime. Optimization of EMC power consumption, making informed decisions on their further operation by identifying

uneconomical, inefficient, emergency operating modes, hidden defects by means of intelligent energy efficiency management systems also provides for the availability of information on instantaneous values of EMS current and voltage, calculation of parameters according to diagnostic and reference models in real time; detection of deviations of parameters from the established ones.

Intelligent EMC energy efficiency management systems using the MVC software architectural pattern allows you to introduce modern smart information technologies into the energy management system of the enterprise and automate the implementation of such components of the ISO 50001:2020 standard as the installation of an energy baseline, control of energy efficiency indicators, monitoring and necessary measurements to determine the level of energy efficiency, energy analysis, energy planning and formation of technical reports, etc.

Keywords: *energy management, software, electromechanical system, energy efficiency, client-server architecture.*

References

1. Strategy for the Development of Higher Education in Ukraine for 2021-2023. Ministry of Education and Science of Ukraine. -Kyiv: 2020., -71 p. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/rizne/2020/09/25/rozvitku-vishchoi-osviti-v-ukraini-02-10-2020.pdf>
2. Prokopenko, V.V., Zakladnyi, P.V. Kulbachnyi. – Kyiv: KPI them. Igor Sikorsky, Polytechnic Publishing House, 2018. – 400 p. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56296>
3. Zakladnyi O.M. Elektroprivod [Electric drive]. / O.M. Zakladnyi, V.V. Prokopenko, O.O. Zaladnyi. – K.: NTUU "KPI", 2007. – 316 URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56294>
4. Zakladnyi, O.O. Functional diagnostics of energy efficiency of electromechanical systems: Monograph / O.O. Zakladnyi – K.: Libra Publishing House, 2013. – 195 p.: ill URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50554>
5. Client-server architecture. Wikipedia: The Free Encyclopedia URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Client-server_architecture
6. MVC approach. 3.Java Professional module. URL: <https://javarush.com/ua/quests/lectures/ua.questservlets.level14.lecture02>
7. MVC. MDN Web Docs Glossary: Definitions of Web-related terms. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/MVC>
8. Three-tiered architecture. Wikipedia: The Free Encyclopedia URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Трияруснаа_архітектура
9. Model-view-controller. Wikipedia: The Free Encyclopedia URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Модель_вид_контролер

Надійшла: 7.04.2024

Received: 7.04.2024