



# Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## РОБОТА

на здобуття премії Президента України для молодих вчених

**«Інтелектуальна система електропостачання для розподілених джерел енергогенерації»**

**Данильченко Дмитро Олексійович**

Кандидат технічних наук, професор кафедри передачі електричної енергії, НТУ «ХПІ»

**Федорчук Станіслав Олегович**

Кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних станцій, НТУ «ХПІ»

**Івахнов Андрій Віталійович**

Асистент кафедри електричних станцій, НТУ «ХПІ»

**Кулапін Олександр Валентинович**

Асистент кафедри електричних станцій, НТУ «ХПІ»



## **МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ:**

Метою дослідження є встановлення можливості створення інтелектуальної системи енергогенерації, що базуватиметься на розподілених джерелах енергогенерації та зможе використовувати активних споживачів об'єднаних в віртуальну електростанцію для підтримки балансу потужності.

## **ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:**

Процес підтримання балансу електричної енергії в інтелектуальній системі електропостачання для розподілених джерел енергогенерації, на основі активних споживачів та віртуальних електростанцій.

## **АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:**

Актуальність виконання роботи обумовлена рядом ключових тенденцій для енергосистем України та світу, а саме: збільшення частки електричних станцій на відновлюваних джерелах енергії, децентралізація, перехід до електричних мереж на основі концепції Smart Grid. Для України ці тенденції стали ще більш важливими, тому що дозволяють забезпечити швидше подолання наслідків російської збройної агресії проти нашої країни та водночас зробити нашу енергосистему більш гнучкою та захищеною на випадок майбутніх збройних конфліктів. Також ускладнення ситуації збільшення залежності нашої енергосистеми від електричних станцій на складно-прогнозованих відновлюваних джерелах енергії та зменшення резерву потужності для компенсації також складних в прогнозуванні електричних навантажень побутових споживачів. Вирішенням наведених проблем, на думку авторів, може стати створення інтелектуальних систем енергогенерації які будуть вирішувати задачу підтримки локального балансу потужності на рівні громад завдяки використанню сучасних та перспективних технологій Smart Grid. Саме тому авторський колектив в цій роботі досліджує перспективи використання активних споживачів об'єднаних в єдину віртуальну електричну станцію з відновлювальними енергогенеруючими потужностями та системами накопичування електричної енергії для вирішення цієї задачі.

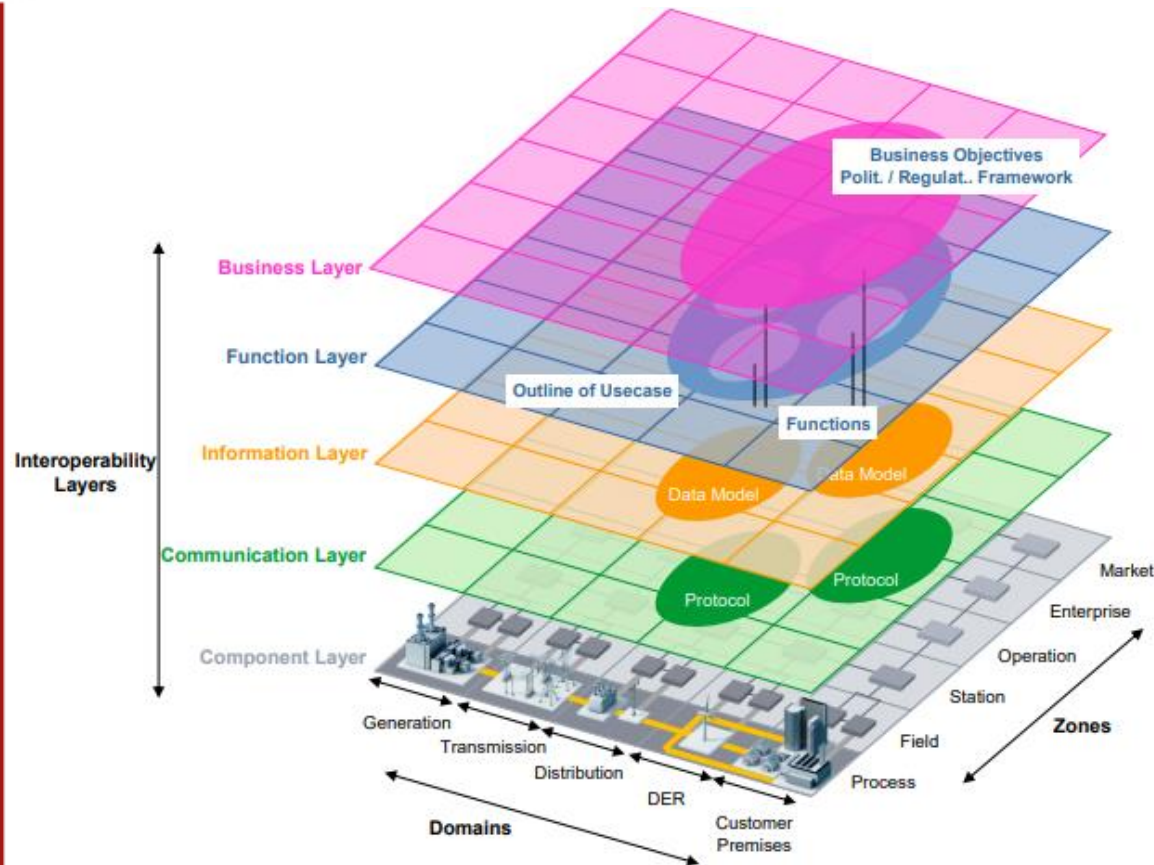


## **ОСНОВНА ІДЕЯ:**

Дослідження перспектив використання активних споживачів просьюмерів для підтримки балансу потужності в енергетичних мережах, а також створення засобів для моделювання віртуальної електричної станції на якій базується інтелектуальна система енергогенерації. Просьюмери, як учасники процесів в електроенергетичних системах, здатні функціонувати і в сучасних традиційних електричних системах за умови отримання додаткових можливостей по здійсненню ринкових операцій, однак переваги Smart Grid в значній мірі підвищують їх ефективність. Модель віртуальної електричної станції, як основи інтелектуальної системи енергогенерації дозволяє провести допроектні дослідження функціонування такої системи на території обраних громад. З цією метою було удосконалено моделі фотоелектричних та вітроелектростанцій, що можуть встановлюватись у просьюмерів, як додаткові джерела генерації. Також для цього створено алгоритм задіяння об'єктів балансування на основі економічних та технічних критеріїв.

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕРЕЖІ (SMART GRID)

Значна кількість досліджень та проєктів пов'язаних з Smart Grid насамперед обумовлені комплексним впливом декількох факторів:



- значним збільшенням частки відновлюваної генерації;
- розвитком енергетичних ринків розвинених країн, що призвело до створення нових учасників та політик;
- розвитком інструментарію для оптимізації режимів роботи електричних мереж.

Синергетичний ефект від цих факторів на поточний момент формує бачення Smart Grid.

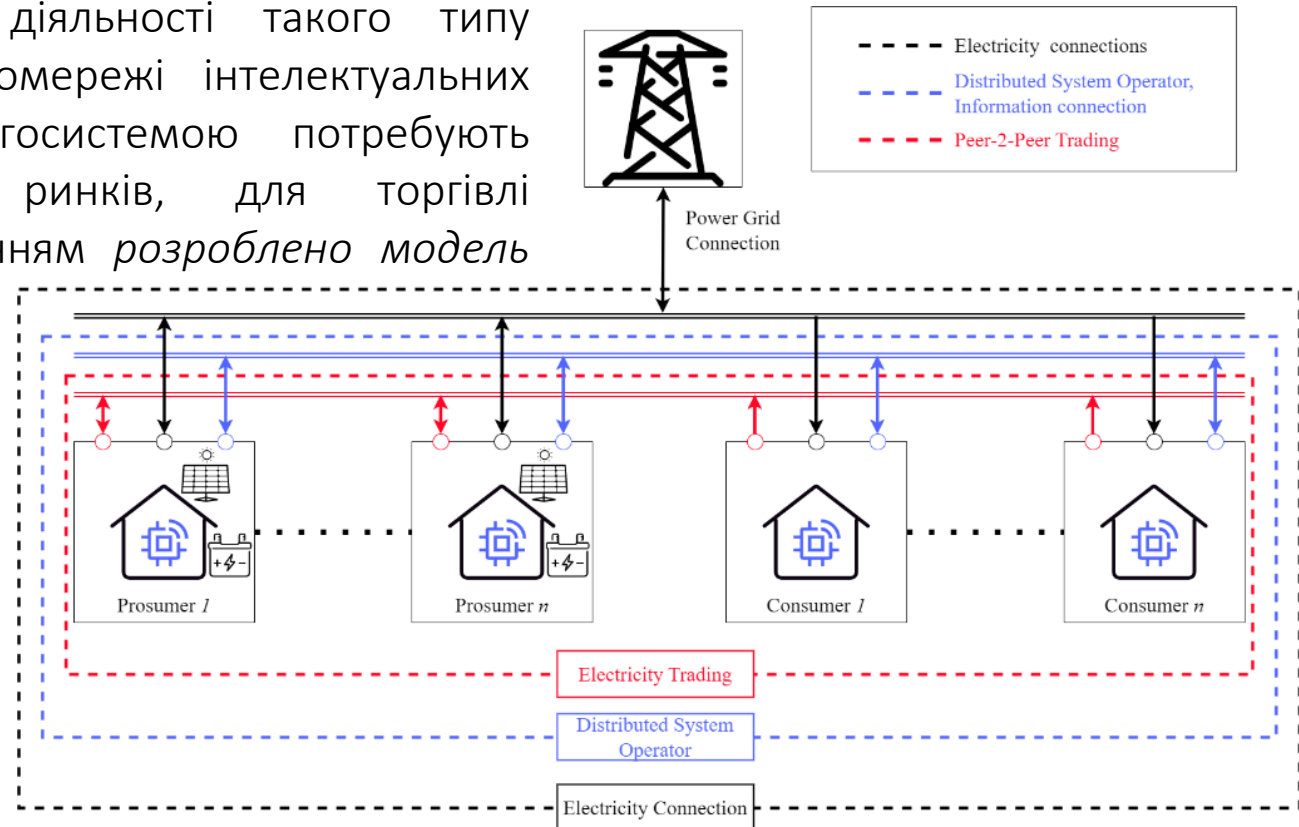
Завдання Smart Grid - дозволити активним учасникам ринку самостійно споживати енергію без невиправданих обмежень і отримувати винагороду за електроенергію, яку вони передають в мережу.

## АКТИВНИЙ СПОЖИВАЧ (ПРОСЬЮМЕРИ)

Неологізм «просьюмер» походить від поєднання англійських слів «виробник» та «споживач», та широко застосовується в сучасній економічній теорії. В енергетиці просьюмери відрізняються від традиційних споживачів електроенергії тим, що не лише споживають з мережі, але й генерують, активно передають та зберігають енергію. Просьюмери можуть продавати надлишкову електроенергію не лише просто в мережу, а й адресно своїм власним споживачам.

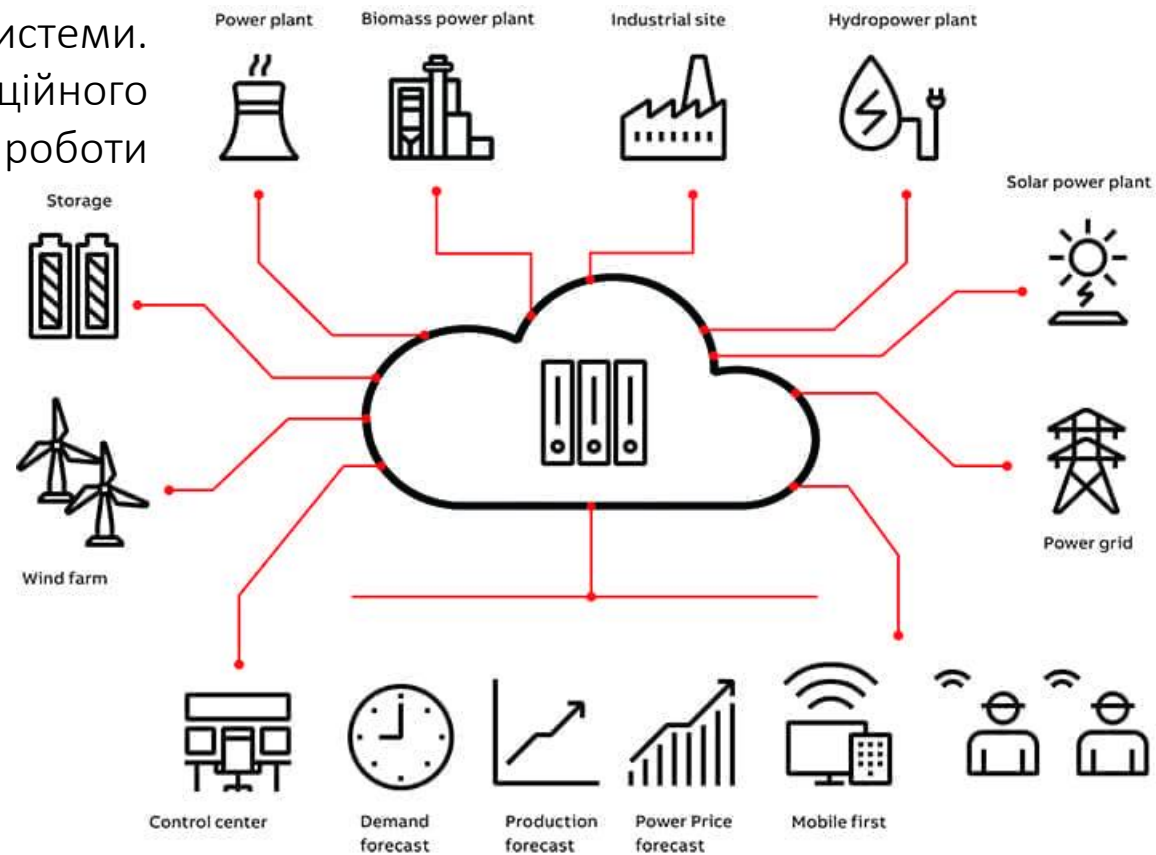
Інформаційна та технічна підтримка діяльності такого типу споживачів вимагає наявності у енергомережі інтелектуальних властивостей. Для взаємодії з енергосистемою потребують створення локальних енергетичних ринків, для торгівлі відновлювальною енергією. Таким рішенням розроблено модель однорангової торгівлі за моделлю P2P.

Відповідно створюється структура локальної торгівлі – оператор розподіленої енергії як незалежний ринковий оператор. Розроблена модель стимулює просьюмерів до участі в інтелектуальній мережі розподіленої енергогенерачії об'єднуючись в Віртуальну Електричну Станцію.



## ВІРТУАЛЬНА ЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ

На сьогодні точні визначення поняття віртуальної електростанції (ВіртЕС) варіюються від «комбінація розподіленої генерації, постійних і змінних навантажень, інтегрованих лініями зв'язку і методами управління в реальному часі», до «система управління енергоспоживанням спільноти активних споживачів, що виглядає для енергоринку, як реальна електростанція». Основою ВіртЕС є центр дистанційного управління, та Smart Grid мережа, що поєднує всіх учасників станції в межах енергосистеми. Програмне забезпечення центра дистанційного управління, ефективно координує і контролює роботи розподілених генераторів, систем зберігання енергії та регульованого навантаження, зокрема просьюмерів. Стохастичний характер генерації окремих відновлюваних джерел енергії компенсується в межах ВіртЕС великою кількістю генераторів, ресурсами управління споживанням та акумулюванням енергії. В результаті, для енергосистеми всі ці об'єкти виступають, як велика централізована електростанція зі звичайним, чи навіть більш високим рівнем керованості та маневреності.





## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. ГРАФІКИ НАВАНТАЖЕННЯ ПРОСЬЮМЕРІВ

Оцінка потенційної ефективності використання просьюмерів для вирішення задачі підтримки балансу активної потужності базується на дослідженні їх графіків навантаження та потенціалу генерації за допомогою відновлюваних джерел енергії. В роботі використано метод «знизу вгору», метод регресійного аналізу, багаторазова лінійна

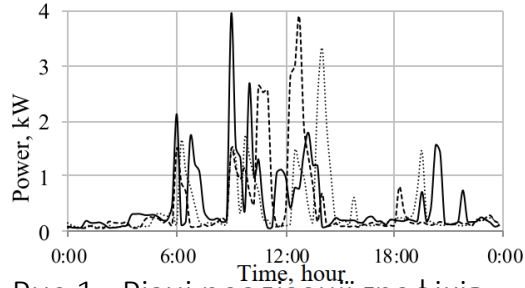


Рис.1– Різні реалізації графіків випадкового навантаження на LPG

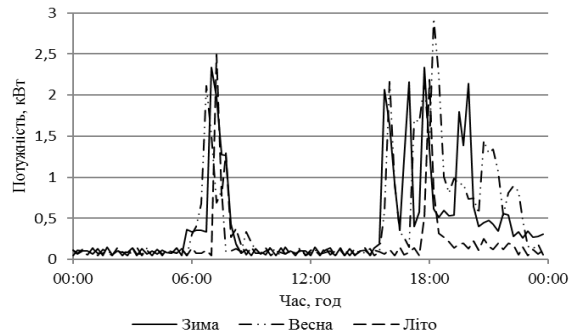


Рис.2 – Графік навантаження робочого дня сім'ї першого типу

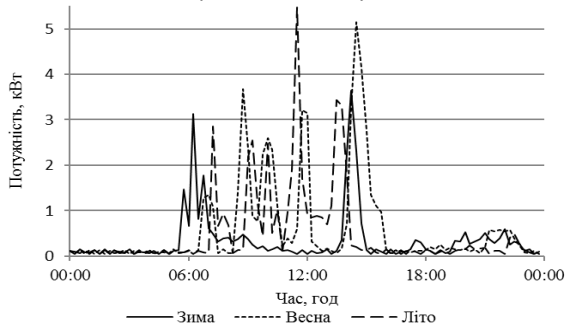


Рис.3 – Графік навантаження вихідного дня сім'ї першого типу

регресія з урахуванням типу будівлі, кількості спалень і складу сім'ї. Для прогнозування попиту на електроенергію використано функціональну векторну модель авторегресійного державного простору. Режими роботи споживання змодельовано на основі відкритого програмного забезпечення «Генератор електричного навантаження комплексу LPG».

Графіки навантаження характеризуються наступним чином:

- середнє значення навантаження – показує середнє значення графіка навантаження:

$$P_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^T P_i}{T}$$

- коефіцієнт максимуму графіка – пов'язує максимальне і середнє значення графіка навантаження:

$$k_M = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{cp}}}$$

- коефіцієнт заповнення графіка – показує наскільки щільно заповнений графік навантаження:

$$k_3 = \frac{P_{\text{cp}}}{P_{\text{max}}}$$

- коефіцієнт форми графіка – характеризує нерівномірність графіка навантаження:

$$k_\phi = \frac{\sqrt{\frac{\sum P_i^2}{T}}}{P_{\text{cp}}}$$

## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. УСЕРЕДНЕНІ ГРАФІКИ НАВАНТАЖЕННЯ ПРОСЬЮМЕРІВ

Математична модель навантаження: Спочатку весь рік розбито на часові інтервали таким чином, щоб тривалість світлового дня не змінювалася більше ніж на 15 хвилин. Далі в кожному інтервалі виділяються робочі та вихідні дні. Для побутових споживачів, що використовувалися авторами під час їх досліджень, характерною особливістю графіка навантаження вихідного дня є піки ранкового і післяобіднього навантаження, близькі за величиною до вечірнього максимального навантаження робочих днів. Таким чином, графік навантаження на конкретний день року визначається як:

$$P_m(d, t_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{c,i}(d_i, t_k)$$

Як видно для побудови навантаження, день ділиться на часові проміжки з постійним кроком  $\Delta t$ :

$$t_k - t_{k-1} = \Delta t$$

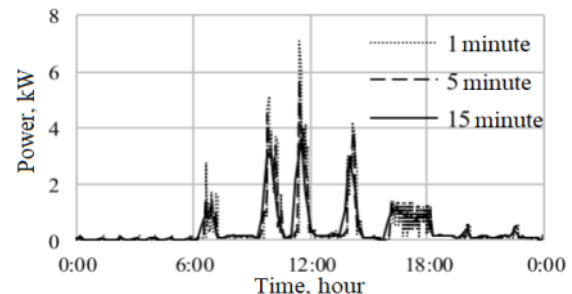


Рис.1 – Усереднені графіки навантаження з різним кроком розбиття

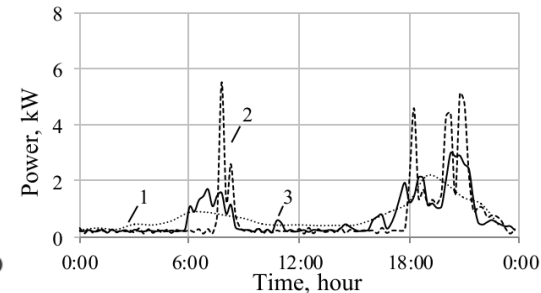


Рис.2 –Графіки моделей навантаження: 1 – типовий; 2 – LPG; 3 – усереднений

Табл.1 – Характеристики усереднених графіків навантаження сім'ї першого типу

День	Робочій день	Вихідний день
Тип споживання	Інтенсивний	Інтенсивний
<b>Зима</b>		
Середнє значення	0,36	0,56
Коефіцієнт максимуму	5,70	5,23
Коефіцієнт заповнення	0,24	0,19
Коефіцієнт форми	1,52	1,46
<b>Осінь/Весна</b>		
Середнє значення	0,34	0,45
Коефіцієнт максимуму	5,15	4,80
Коефіцієнт заповнення	0,19	0,20
Коефіцієнт форми	1,33	1,55
<b>Літо</b>		
Середнє значення	0,40	0,48
Коефіцієнт максимуму	4,02	6,33
Коефіцієнт заповнення	0,22	0,15
Коефіцієнт форми	1,47	1,73



## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Відповідно до аналізу в рамках просьюмерів придатними до застосування є електрохімічні накопичувачі.

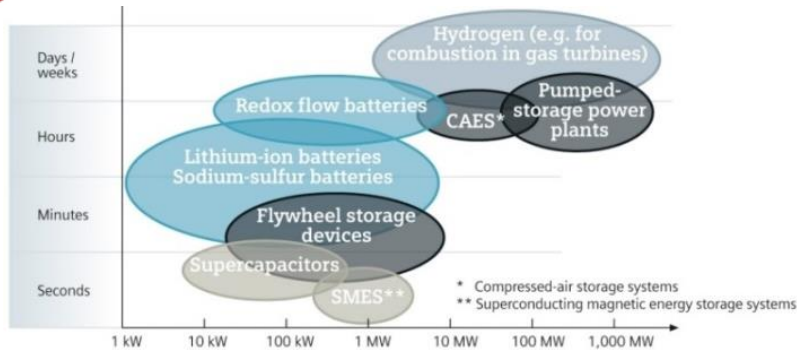


Рис.1 – Системи накопичення електроенергії за тривалістю енергопостачання та потужності

Табл.1 – Характеристики хімічних систем накопичення електроенергії

Характеристика накопичувача	Тип акумулятора							
	Ni – MH	Ni – Zn	Ag – Zn	Ni – H	Pb – кисл	Ni – Cd	Li – ion	LiFePO4
Номінальна напруга, В	1,2	1,6	1,5	1,25	2	1,2	2,5-3,7	2
Питома енергія, Вт·г/кг	40-70	50-70	90-100	50-95	20-50	20-45	80-270	90-250
Потужність розряду максимальна, Вт/кг	500	500	1500	150	400	400	2000	2000
Струм заряду максимальний, С	0,3-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	1-6	3
Саморозряд, %/міс	30	20	20	30	10-20	10-15	1-5	2-4
ККД циклу заряд/розряд, %	70	70	80	60	60-70	60-70	92-98	95
Ресурс при 80% ємності, циклів	1000	50-300	6-50	1500	300	1000	2500	3500

## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ

Формула вартості придбання обладнання для акумуляції 1 кВт·год має наступний вигляд:

$$LCOE = \frac{Price}{Capacity \cdot Cycles \cdot Efficiency \cdot DoD} + Total\ ancillary\ cost$$

$$Price = Capital\ cost + Augmentation\ cost + Operating\ cost + Other$$



## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ

1) Розрахунок економічного аспекту вибору типу акумуляції, економічний внесок до питомої вартості акумуляції:  $C_a = C_{aa} + C_{ao} + C_{av} + C_{ap}$ , та її варіант для СНЕ, що працює по тарифу:  $C_a = C_{av} + C_{ap}$

- амортизація  $C_{aa} = \frac{\text{Вартість встановленого обладнання}}{\text{Допустима кількість циклів довтративластивостей}}$
- вартість втрат  $C_{av} = 0.2 \cdot \text{Обсяг енергії} \cdot \text{Вартість енергії}$
- витрати на саморозряд  $C_{ap} = \text{Саморозряд} \cdot \text{Термін} \cdot \text{Вартість енергії}$

2) Розрахунок для перетворюючого обладнання після вибору:  $C_{\Pi} = \sum C_{\Pi a} + \sum C_{\Pi b}$

- амортизація  $C_{\Pi a} = \frac{\text{Вартість встановленого обладнання}}{\text{Термін використання обладнання}}$
- вартість втрат  $C_{\Pi b} = (dP_{xx} \cdot T_{\Pi} + k^2 \cdot dP_{kz} \cdot T_p) \cdot \text{Вартість енергії}$

3) Розрахунок передачі електричної енергії:  $C_{\text{пе}} = C_{\text{пеаморт}} + C_{\text{пео}} \sum C_{\text{певарт}} + C_{\text{песв}}$

- амортизація  $C_{\text{пеаморт}} = \frac{\text{Вартість } i \text{ – елемента}}{\text{Термін експлуатації } i \text{ – елемента}}$
- вартість обслуговування  $C_{\text{пео}} = \text{Протяжність лінії} \cdot \text{питомі втрати}$
- вартість передачі  $\sum C_{\text{певарт}} = \text{Вартість передачі для класу напруги} \cdot \text{Обсяг енергії}$
- втрати  $C_{\text{песв}} = \frac{(P^2 + Q^2) \cdot \text{Re} \cdot 10^{-3}}{U^2 \cdot T_{\Pi}}$

4) Розрахунок системи управління:  $C_y = C_{ya} + C_{yo}$

5) Вибір території розміщення:  $\text{Вартість} = W \cdot (T_{ap} + \text{СНЕ}_k + \text{СНЕ}_b + \text{СПЕ}_b + \text{СТЕ}_b + \text{ПЕ}_{\text{варт}}) + \text{СНЕ}_o + \text{СТЕ}_o + \text{СУ}_a + \text{СУ}_o + \text{СТЕ}_a + \text{СНЕ}_{\text{ср}} \pm \text{СНЕ}_{\text{шт}} + \text{інше}$

$$\text{де } W = \sum_{i=0}^{\text{Днів роботи на рік}} P_i \cdot T_i$$



## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ

Порівняння вартості у гривнях за 1кВт·год серед різних СНЕ для основних випадків використання

Тип використання	ГАЕС	Кислотні акумулятори	Літій-іонні акумулятори
Заміщення пікової генерації	3,86	5,41	3,83
Резервування генеруючих потужностей	3,82	5,17	3,59
Регулювання частоти	6,58	2,23	1,8
Розподільчі мережі		5,34	3,76
Мікромережі		3,25	2,29
Комерційна акумуляція		7,52	5,24
Побутова акумуляція		6,82	4,63

На основі проведених розрахунків видно, що:

- На системному рівні конкуренцію гідроакумуляуючим електричним станціям можуть скласти літій-іонні акумулятори завдяки меншим втратам при заряді та розряді. Завдяки цьому хімічні акумулятори мають значно меншу вартість 1 кВт·год при регулюванні частоти в мережі;
  - Завдяки відношенню кількості циклів до приросту вартості літій-іонні акумулятори забезпечують меншу вартість енергії у порівнянні з свинцево-кислотними;
  - Замість передачі енергії на загальних умовах для рівня розподільчих мереж більш вигідним рішенням є будівництво власних ЛЕП;
- Найбільша вартість виходить у комерційної та побутової акумуляції за рахунок великої частки постійних та вищих питомих витрат у порівнянні з більш потужними варіантами.



## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. МОДЕЛЬ ПРОСЬЮМЕРА

Модель просьюмера включає навантаження, ВДЕ, СНЕ і комутаційне обладнання. Основним елементом роботи мікромережі є акумулятор. Також присутній зв'язок з енергосистемою.

Балансуюча потужність енергосистеми залежить від потужності на вході та стану заряду накопичувача:  $P_M = f(P_{AC}, SOC)$  де  $SOC = \frac{1}{C_{НОМ}} \int P_A dt$

Потужність заряджання та розряджання акумулятора враховують технічні обмеження за максимальною потужністю заряду/розряду:

$$P_A = \begin{cases} b, npu P_{AC} > b \\ P_{AC}, npu - b \leq P_{AC} \leq b \\ -b, npu P_{AC} < -b \end{cases}$$

Основою моделі просьюмера в дослідженні є удосконалена цільова функція:

$$\sum_w \sum_i \left[ \left( \lambda_{pur,L}(t_i) \cdot P_{pur,L}(w, t_i) + \lambda_{pur,G}(t_i) \cdot P_{pur,G}(w, t_i) \right) \cdot \Delta T - \left( \lambda_{vend,L}(t_i) \cdot P_{vend,L}(w, t_i) + \lambda_{vend,G}(t_i) \cdot P_{vend,G}(w, t_i) \right) \cdot \Delta T + C_{rew,DR}(t_i) \cdot x_{rew,DR}(t_i) - C_{pen,DR}(t_i) \cdot x_{pen,DR}(t_i) \right]$$



## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. ОПТИМІЗАЦІЯ ЄМНОСТІ НАКОПИЧУВАЧА

Головною метою оптимізації є знаходження мінімального значення ємності СНЕ, що забезпечує мінімум наступної функції різних значень заданої потужності ФЕС:

$$\min f = \sum_t \left[ \left( P_G(t_i) - P_L(t_i) + P_{pur,Grid}(t_i) - P_{vend,Grid}(t_i) \right) \cdot \Delta T \right]$$

Умови обмежень. Конфігурація BESS повинна відповідати обмеженням на граничну потужність заряду/розряду, граничним значенням стану заряду та іншим умовам, а саме:

$$0 \leq P_{chr}(t_i) \leq P_{ESS}(t_i) \quad 0 \leq P_{dischr}(t_i) \leq P_{ESS}(t_i) \quad 0 \leq P_{pur,G}(t_i) \leq P_{chr}(t_i) \quad 0 \leq P_{vend,G}(t_i) \leq P_{dischr}(t_i) \quad 0,2 \leq SOC \leq 1$$

Табл.1 – Оптимальні значення ємності акумулятора в зимовий та літній періоди

Потужність дахової ФЕС, кВт	Літо		Зима	
	Робочій день. Ємність, кВтгод	Робочій день. Ємність, кВтгод	Робочій день. Ємність, кВтгод	Робочій день. Ємність, кВтгод
0	0	0	0	0
1	6,801	2,031	0,351	0,02
2	16,382	5,952	1,612	0,28
3	27,803	13,963	3,023	0,403
4	28,404	18,204	3,734	0,474
5	22,705	26,405	5,205	0,965
7	20,706	16,806	8,306	2,076
10	19,407	13,167	13,107	5,087
13	19,408	9,458	20,308	13,158
16	19,409	7,709	20,409	16,399
21	19,41	6,5	23,38	21,44
25	19,411	5,851	23,001	29,661
50	19,412	4,552	22,662	25,412
75	19,413	4,503	22,563	23,473
100	19,414	4,504	22,514	23,474

## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. ДОСЛІДЖЕННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ГРОМАДАХ

З метою проведення дослідження змін в споживанні електричної енергії комунальними закладами також було проаналізовано близько 50 документів про Муніципальні енергетичні плани та Стратегії сталого розвитку громад. Для дослідження їх можливості виступати в ролі просьюмерів.

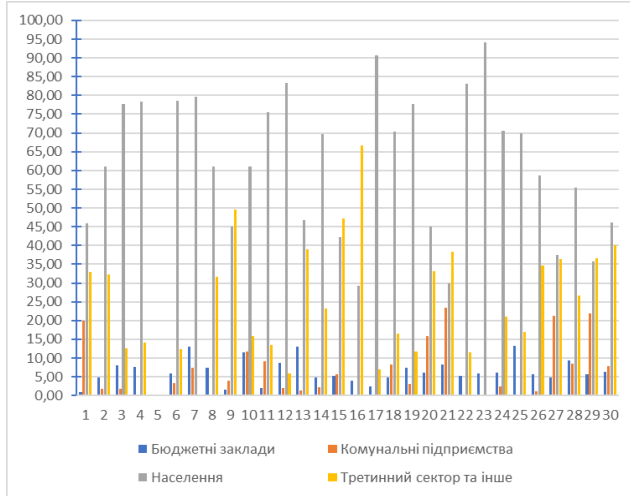


Рис.1 – Частка (%) споживання електричної енергії різними типами об'єктів

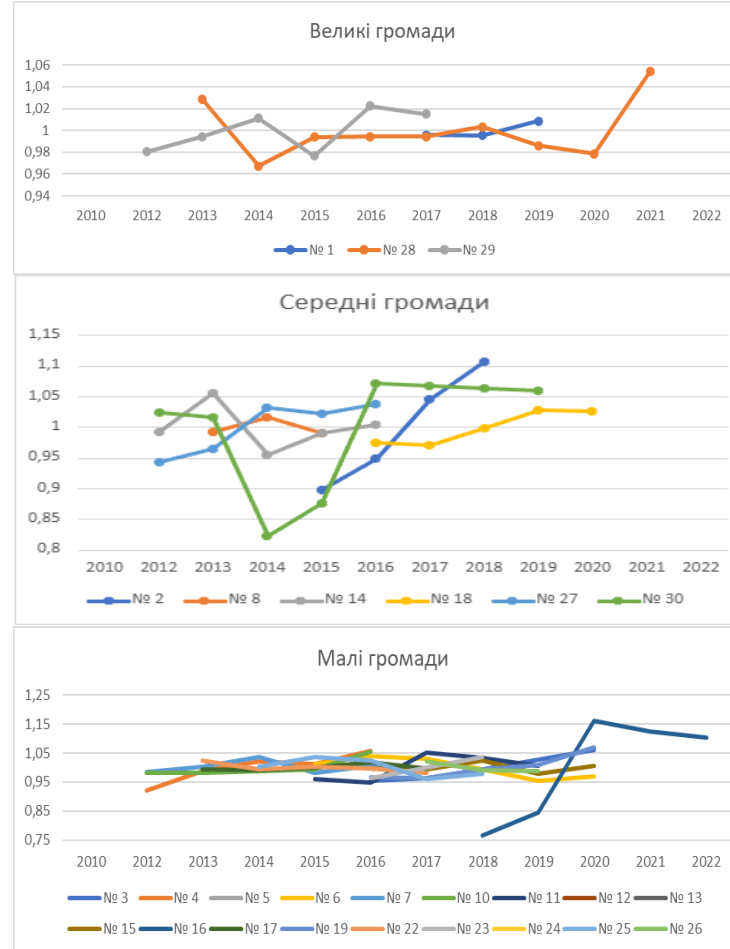


Рис.2 – Зміни в споживанні електричної енергії громадами різних типів пропорційно до середнього рівня для громади за період

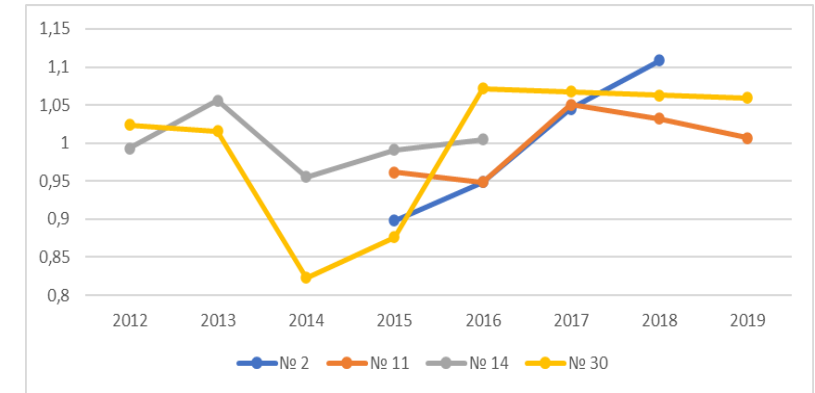


Рисунок.3 – Зміни в споживанні електричної енергії громадами, що можуть бути викликані впливом наслідків військових дій на сході України у 2014-2015 роках

## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. ЕНЕРГОВУЗЛИ

Віртуальна електрична станція будується на основі енерговузлів. Ідеальним типом енерговузла є «збалансований», той в якому генеруюча складова повністю задовольняє потреби усіх споживачів, а також знаходиться в оптимальних економічних умовах генерування (економічно оптимальне завантаження блоків, якщо це теплова або атомна генерація). Інші типи є «надлишковий» та «дефіцитний».

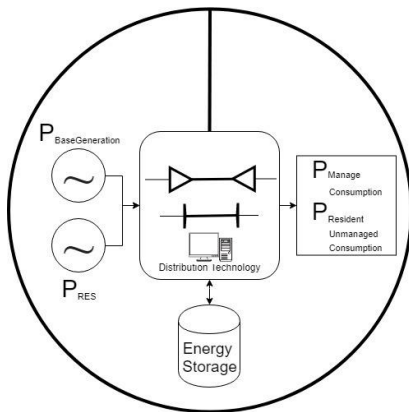


Рис.1 – Універсальна модель енерговузла

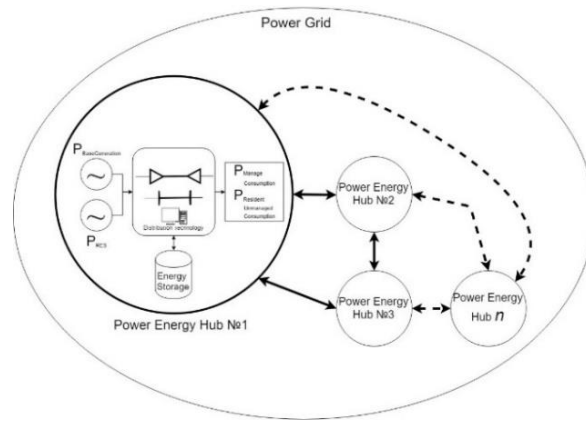


Рис.2 – Укрупнений енерговузол

$$\forall H_i := \sum_1^i \{A_i\} \geq 1, \text{ при } i = 1, 2, 3, \dots$$

$$\{H_i\} = C, \text{ при } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Табл.1 – Основні параметри базових агентів енергосистеми

Агент	Потужність на одиницю (блок)	Діапазон маневрування %	Швидкість реакції, сек	
			З холодного стану, хв	З гарячого стану, хв
АЕС	500 – 1000 МВт	70-100%	390 – 660	60
ТЕС	до 800 МВт	40-100%	90 – 180	20 – 50
ГЕС	до сотень МВт	0-100%	3 – 5	0,25 – 0,5
СЕС	до 1 ГВт на поле	0-100%	0	0
ВЕС	до 15 МВт	0-100%	3 – 5	1 – 2
ГТУ	до кількох МВт	0-100%	15 – 30	0,5
Споживач промисловий	до кількох МВт	-100%-0	0 – 90	0 – 5
Споживач домашній	до кількох кВт	-100%-0	0	0
Прос'юмер	до кількох кВт	-100%-0-100%	0	0
СНЕ	до 1 МВт на модуль	-100%-0-100%	0 – 5	0 – 0,5

Обмеження при формуванні енерговузлів визначають границі енерговузла.

Взаємодія між агентами енерговузла і між окремими енерговузлами відбувається за однаковим принципом, з різницею в рівні управління, за графовим методом.



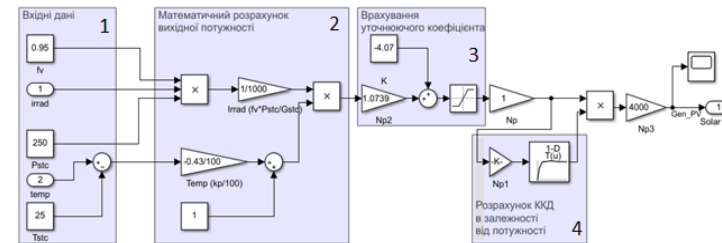
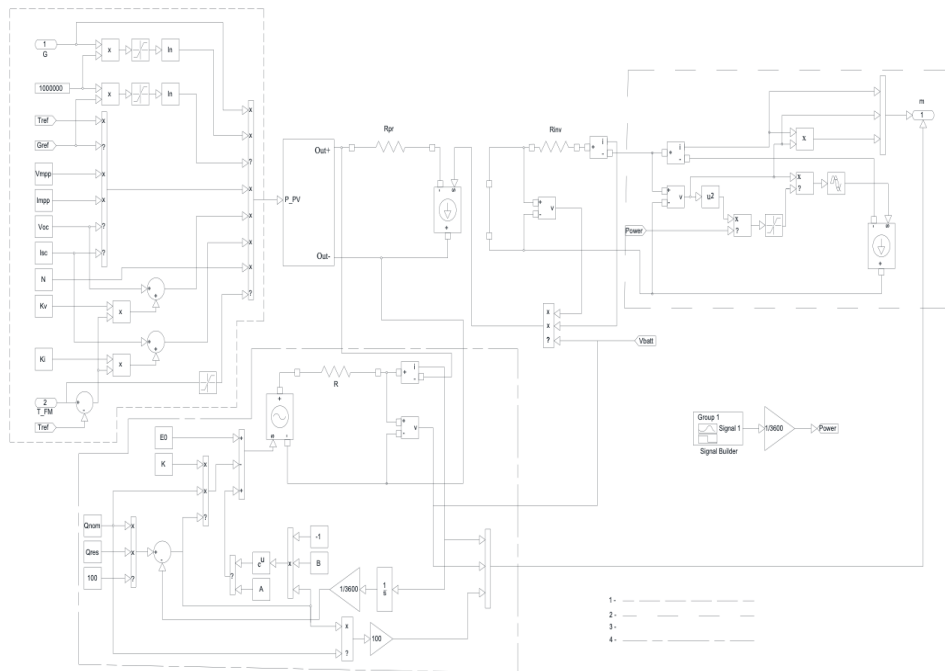
## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ

Базова модель

фотоелектричної станції:

$$P_{pv} = n \cdot f_v \cdot P_{stc} \cdot \frac{G}{G_{stc}} \cdot [1 + k_p \cdot (T_{emp} - T_{stc})]$$

Уточнена модель, з визначенням сумарної сонячної радіації що діє на довільно розміщену поверхню та азимут



$$I_{sum}^{\beta\gamma} = I_{dir}^{\beta\gamma} + I_{dev}^{\beta\gamma} + I_{ref}^{\beta\gamma} =$$

$$= I_{dir}^{hor} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_{dev}^{hor} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho I_{ref}^{hor} \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

На основі цих даних можна визначити коефіцієнти А, В, С, D, Е, які необхідні для знаходження значень, що використовуються для перетворення формули розрахунку сумарної сонячної радіації на горизонтальній площині у формулу для довільно розташованої площини. Отже, коефіцієнти визначаються за наступними формулами:

$$A = \sin \varphi \cdot \cos \beta; \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma;$$

$$C = \sin \beta \cdot \sin \gamma; D = \cos \varphi \cdot \cos \beta; E = \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma$$

Модель фотоелектричних модулів:

$$P_{PV} = \frac{FF \cdot T_{ref} [I_{SC} + k_1 (T_{FM} - T_{ref})] [V_{OC} + k_V (T_{FM} - T_{ref})] N_{FM} \cdot \eta_{conv} \cdot G \cdot \ln(10^6 G)}{G_{ref} \cdot \ln(10^6 G_{ref}) T_{FM}}$$

Врахування запилинності:

$$G_{los} = G_0 e^{-\left( N_0 e^{\frac{[(\rho-100)(-1)dN_t]}{Ndt}} \right) x}$$





## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ

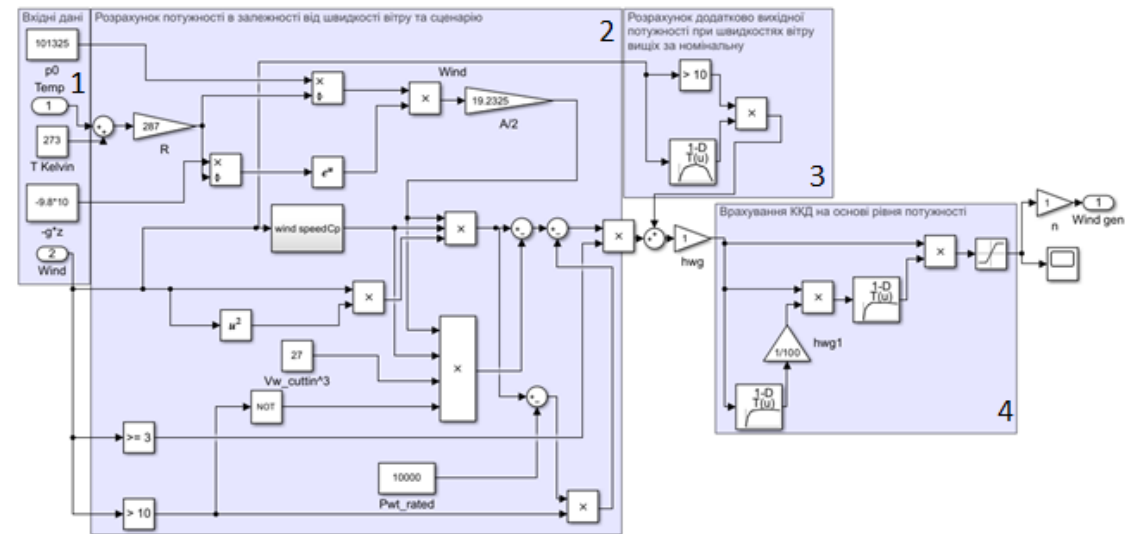
Модель вітроелектричної станції:

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot (\lambda, \beta) \cdot \rho(z) \cdot A \cdot V_w^3$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{rotor} \cdot Rad}{60 \cdot V_w}$$

$$C_p = 0,73 \cdot \left( \frac{151}{\lambda_i} - 0,58 \cdot \beta - 0,002 \cdot \beta^{2,14} - 13,2 \right) \cdot \exp \left[ \frac{-18,4}{\lambda_i} \right]$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0,02\beta} - \frac{0,003}{\beta^2 + 1}}$$



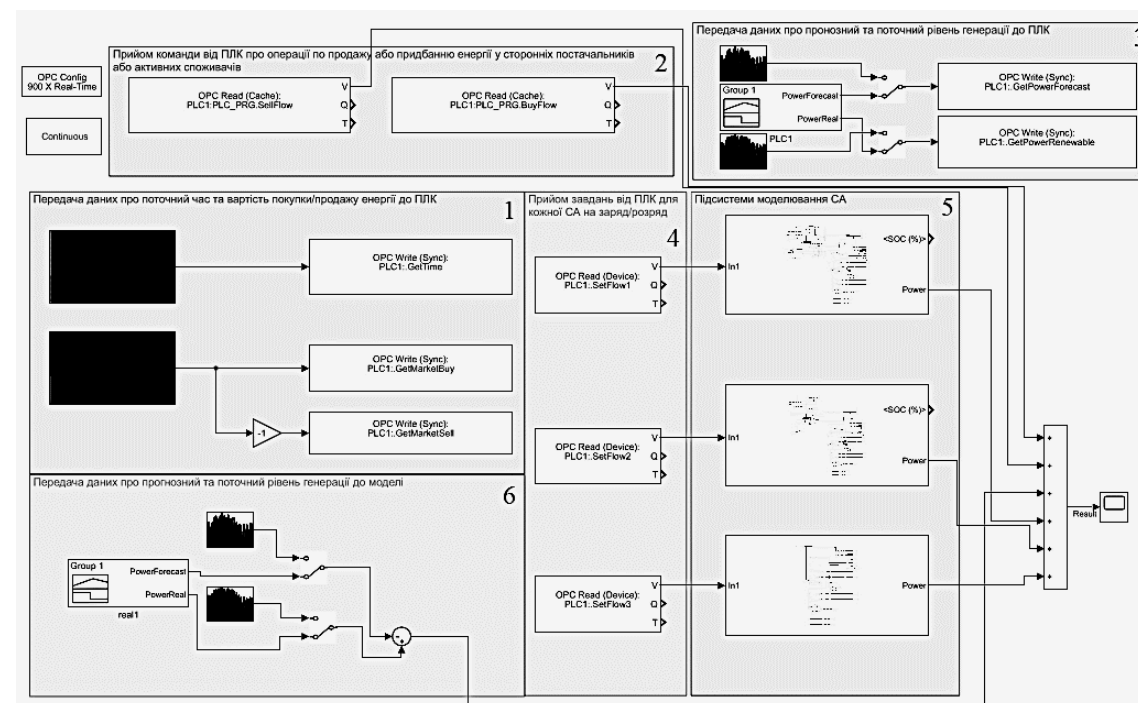
## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. ВІРТУАЛЬНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ

На основі досліджень було створено модель віртуальної електричної станції, що об'єднує в собі розроблені моделі. Ця модель представлена на рисунку. Включає в себе 4000 фотоелектричних панелей по 250Вт та 100 вітряків потужністю 10 кВт. В якості погодних умов було обрано умови, що відповідають Луганській області. Розраховано необхідну ємність накопичувача з урахуванням потенціальних відхилень для СЕС (190 кВт і необхідна ємність 1,7 МВт·год) та ВЕС (251 кВт та 6 МВт·год). Трансформатор потужністю 630 кВА. Проведено розрахунок одночасного балансування відхилень та отримано наступні параметри: ємність накопичувача 6,625 МВт·год та потужність приєднання 420 кВт. При майже незмінній потужності, сукупне балансування дозволяє зменшити необхідну ємність майже на 2,8 МВт·год.

Математичне вираження:

$$\sum X_{cесi} \cdot P_{cесpi} + \sum X_{весi} \cdot P_{весpi} \pm \sum X_{снei} \cdot P_{снepi} \pm P_{ac} \pm P_{ep} =$$

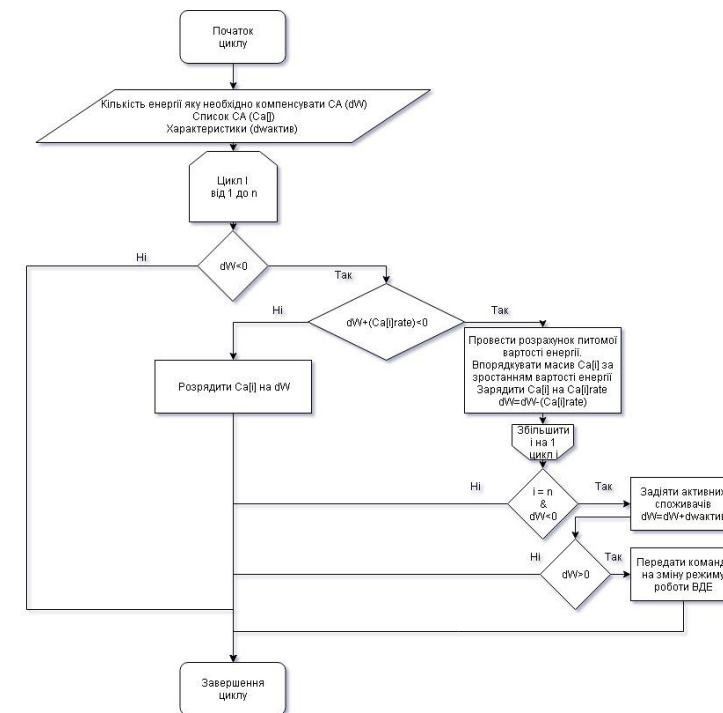
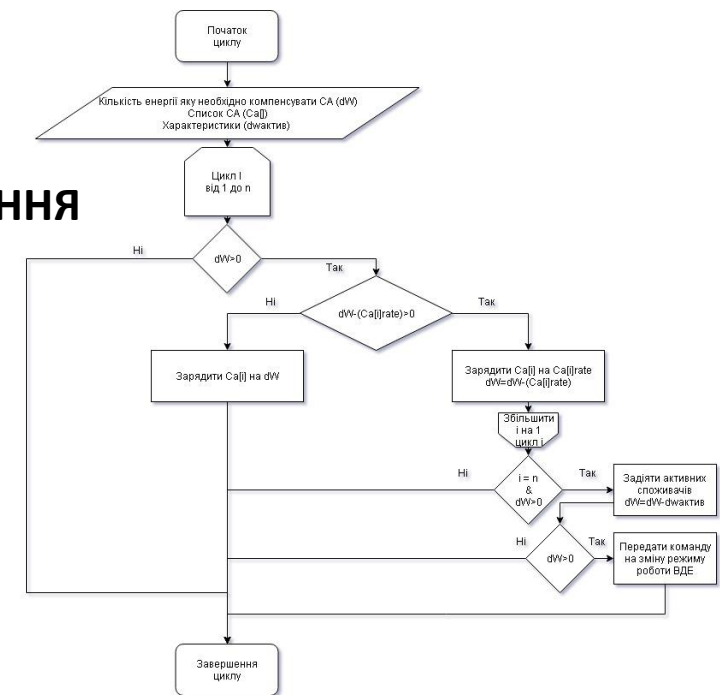
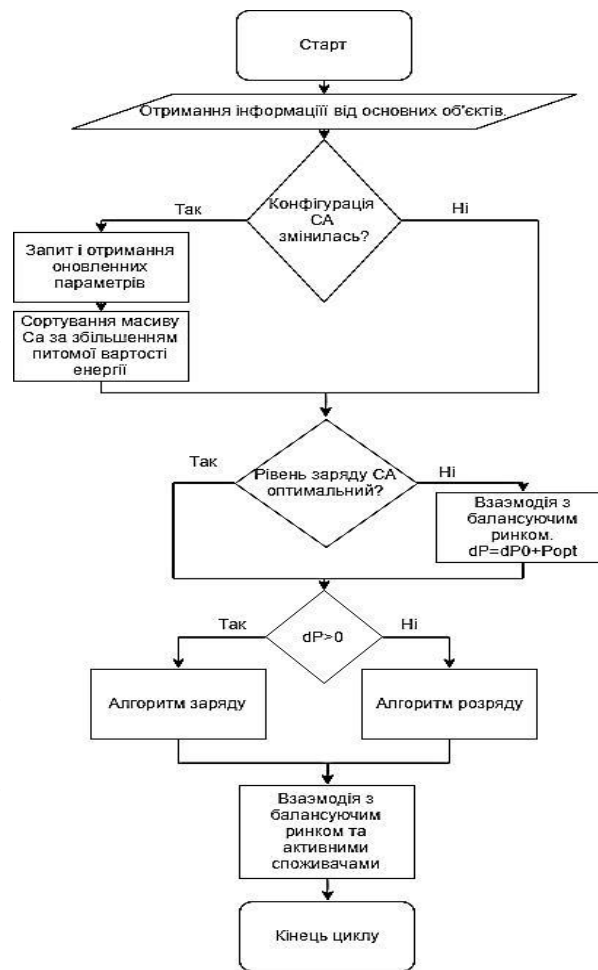
$$= \sum X_{cесi} \cdot P_{cесzi} + \sum X_{весi} \cdot P_{весzi}$$



## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. ВІРТУАЛЬНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ – АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ

Реалізовано алгоритм керування для накопичувачів енергії, що складається з наступних можливостей:

- «заряд», наказ вузлу типу накопичувач енергії на наступному інтервалі провести заряджання на заданий обсяг енергії, але не більше допустимого для нього значення, що обмежується максимальним рівнем заряду та швидкістю зміни потужності.
- «розряд», наказ вузлу типу накопичувач енергії на наступному інтервалі провести розряджання на заданий обсяг енергії, але не більше допустимого для нього значення.
- «рекомендації по роботі з енергетичним ринком», які на основі діючого рівня заряду для усіх наявних вузлів накопичувачів енергії будуть рекомендувати придбання або продаж електричної енергії на енергетичному ринку;
- «аналіз конфігурації», що при запуску системи або зміні її параметрів буде отримувати основні данні для вибору оптимальної, з точки зору мінімізації питомої вартості електричної енергії, послідовності взаємодії з вузлом накопичувачем енергії, або як зазначено в візуалізація алгоритму системами накопичення енергії (СНЕ)



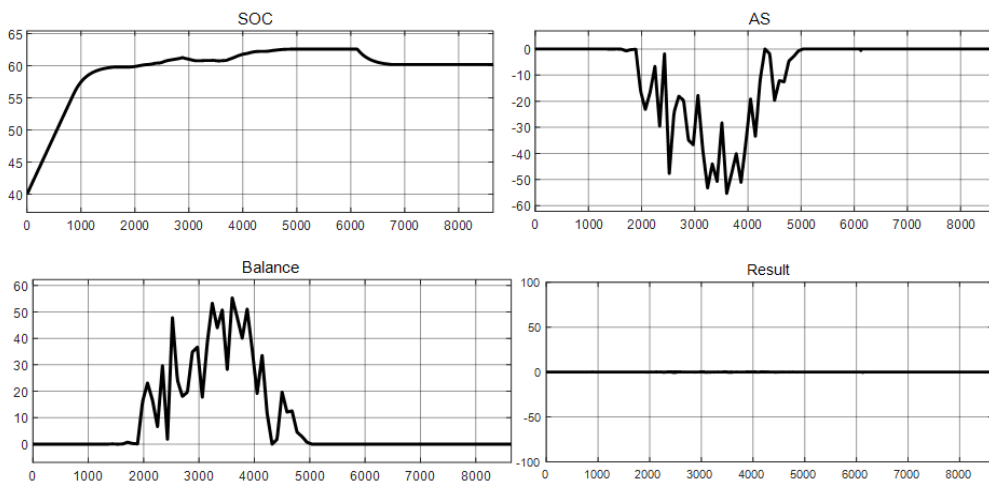
## ДЕТАЛІЗАЦІЯ. ВІРТУАЛЬНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ – РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Хоча цей алгоритм продемонстрував ефективність при роботі з моделлю в середовищі Simulink його використання все ж таки обмежено виключно акумуляцією, а для інших вузлів носить виключно

характер рекомендації. Цей алгоритм доцільно застосовувати для накопичувачів енергії або їх комплексів, що самостійно, а не за запитом системи, приймають рішення про зміну потужності.

Для алгоритму керування всією електричною станцією автори вважають за доцільне використовувати комплексний алгоритм, що буде приймати рішення на основі формування рейтингу вузлів:

$$P = C \cdot \Delta S \cdot \Delta Sl \cdot v \cdot l \cdot k$$



SOC – стан заряду накопичувача енергії; AS – потужність накопичувача енергії; Balance – неспрогнозований надлишок генерації ВДЕ; Result – результуючий небаланс після задіяння накопичувача

Реалізація алгоритму на основі наведеної формули в середовищі Python є альтернативою окремих алгоритмів для накопичувачів енергії. Цей алгоритм має можливість задіяння активних споживачів та об'єктів традиційної генерації, що значно розширює можливості керування віртуальною електричною станцією.



## ВИСНОВКИ

У роботі досліджено інтелектуальну систему енергогенерації на основі залучення активних споживачів та об'єднання їх в єдину віртуальну електричну станцію з метою компенсації небалансів викликаних сонячними та вітроелектростанціями, та відхиленнями графіків споживання від прогнозованих.

Проведено комплексне дослідження використання активних споживачів для вирішення поставлених задач. Для технічного аналізу можливостей застосування активних споживачів було проведено детальний аналіз графіків генерації, що дозволило отримати усереднені графіки навантаження для основних категорій населення з урахуванням їх економічних та поведінкових особливостей. Для отриманих даних було проведено розрахунок рекомендованих параметрів накопичувачів енергії, і їх економічних показників, з метою вирішення поставлених задач. В результаті вирішення оптимізаційної задачі було отримано рекомендовані значення параметрів накопичувача енергії для використання просьюмером з даховою електричною станцією. Максимальна ємність BESS досягає 28,4 кВт·год при встановленій потужності ФЕС 4 кВт. З подальшим збільшенням потужності ФЕС оптимальна ємність СНЕ знижується. При встановленій потужності ФЕС понад 12 кВт необхідна ємність СНЕ майже не змінюється і дорівнює 19,5 кВт·год. Результати зміни ємності пов'язані з інвестиційними витратами, відбитими у обмеженнях, які ми встановили при вирішенні задачі оптимізації. Також було розглянуто потенціал залучення адміністративних будівель в якості активних споживачів.

Розроблено модель віртуальної електричної станції для середовища моделювання Simulink MATLAB, що включає в себе системи накопичення енергії та відновлювані джерела енергії, а також можливість використання реального програмованого логічного контролеру для їх управління. Для цього контролеру було написано програму, за розробленим алгоритмом, що обирає оптимальний накопичувач енергії для вирішення задачі балансування. Також в роботі було створено моделі накопичувача енергії та активного споживача, що можуть бути застосовані як частини для моделі віртуальної електричної станції, або як засоби для дослідження виключного свого напрямку. Додатково було перенесено модель на мову програмування python та її удосконалення, що дозволило виконувати моделювання швидше, за рахунок ітераційного розрахунку сталих режимів, та використовувати більш комплексний розроблений алгоритм керування інтелектуальною системою електропостачання, що дозволило більш ефективно керувати активними споживачами на рівні з традиційними електричними станціями та накопичувачами енергії.

Впровадження дослідження дозволить отримати інтелектуальну систему енергогенерації, що базується на залученні активних споживачів, яка дозволить вирішити задачу балансування відхилень у генерації відновлюваних джерел енергії, а також перспективно бути використаною для задачі підтримки балансу в електроенергетичній системі взагалом, в нормальних та кризових сценаріях.



## ОДЕРЖАНІ НАУКОВІ ТА НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Визначено розподіл енергоспоживання по основним категоріям споживачів на основі відкритих даних для малих, середніх та великих громад України, а також зміни в енергоспоживанні, що викликані стихійними лихами, військовими діями або епідеміями. Це дозволило збільшити достовірність оцінки потреби в електричній енергії громади та окремих її об'єктів.
2. Розроблено уточнені моделі фотоелектричної та вітрової електричних станцій, як складових моделі віртуальної електричної станції в інтелектуальній системі енергогенерації, які відрізняються від вже існуючих наявністю можливості проведення апаратно-програмного моделювання та врахуванням додаткових коефіцієнтів співвідношення вхідних погодних умов та потужності генерації у відповідності з реальними характеристиками обладнання.
3. Допрацьовано метод розрахунку вартості електричної енергії від систем накопичення енергії, що розташовані на території інтелектуальної системи електропостачання, який відрізняється від відомих врахуванням витрат пов'язаних з розташуванням, встановленням та роботою додаткового обладнання, що дозволяє підвищити енергоефективність таких систем за рахунок задіяння найбільш доцільних їх елементів завдяки збільшенню точності виконання розрахунків вартості електричної енергії.
4. Розроблено алгоритм керування накопичувачами енергії на основі концепції віртуальних електричних станцій, що за допомогою уточненого розрахунку вартості електричної енергії від систем накопичення енергії дозволяє при наявності декількох жерел використовувати найбільш економічно доцільні серед них.
5. Удосконалено метод усереднення графіків навантаження для побутових споживачів. Запропонований метод моделювання навантаження побутових споживачів «знизу вгору» шляхом усереднення випадкових графіків, що генеруються поведінковою моделлю, дає можливість отримати графіки навантаження, які більш точно передають стохастичний характер побутового споживання, ніж типові графіки, побудовані методами зверху вниз.



## ОДЕРЖАНІ НАУКОВІ ТА НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ РЕЗУЛЬТАТИ

6. Визначена цільова функція роботи мікромережі просьюмера, яка враховує різні підходи до тарифікації енергії в мережі та на відновлювальні джерела енергії, в енергосистемі та у сусідніх просьюмерів, а також плату за послуги з управління попитом.
7. Отримала подальший розвиток математична модель вузла просьюмера, яка включає в себе систему навантаження, сонячної електростанції, системи накопичення енергії та комутаційне обладнання. Яка показала що, для просьюмерів конфігурація пропускної спроможності системи накопичення енергії є основним параметром.
8. Визначенні оптимальні параметри систем накопичення енергії для двох типів просьюмерів у літній та зимовий періоди.
9. Визначено відповідно характеристик основних видів систем накопичення електроенергії, їх придатність до встановлення в різних частинах енергосистеми. Для просьюмерів придатним для використання є електрохімічний тип систем накопичення електроенергії.
10. Визначено типи енерговузлів та, що при переході до розподіленої генерації, енерговузли повинні мати визначені границі, так основним параметром обмеження є втрати електричної енергії в магістральних мережах. Визначено основні параметри та взаємодію агентів енерговузлів. Визначено що застосування графового методу моделювання є оптимальним для моделі віртуальної електричної станції яка складається з енерговузлів і ґрунтується на перетоках між ними.



## ПЕРЕЛІК СТАТЕЙ У ЖУРНАЛАХ, ЩО ВХОДЯТЬ ДО НАУКОМЕТРИЧНИХ БАЗ ДАНИХ

Загальна кількість публікацій за темою роботи – 65.

Серед них: 8 колективних монографій, у т.ч 5 у зарубіжних виданнях, 19 статей в журналах, включених до категорії "А" (у т.ч. зарубіжних виданнях) та 18 статей у журналах, включених до категорії "Б", 8 одноосібних тез доповідей. Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс за роботою згідно з базами даних складає відповідно: Web of Science 25/2, Scopus 188/8, Google Scholar 258/8.

Отримано 1 патент на корисну модель.





## ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ДЛЯ ЕКОНОМІКИ ТА СУСПІЛЬСТВА

Практична та економічна цінність роботи полягає в тому, що стабільність роботи енергетичної галузі впливає на усі сфери життя. Результати досліджень матимуть позитивний вплив на стабільність енергетичної системи. В громадах де буде застосована досліджена система енергогенерації або її аналоги очікується зменшення впливу стохастичності графіків генерації ВДЕ та відхилень графіків навантаження на енергосистему за рахунок їх компенсації локальними активними споживачами та застосування принципів енерговузлів. Її реалізація дозволить збільшити частку ВДЕ та підвищити енергонезалежність України, без задіяння додаткових традиційних, шкідливих для екології, високоманеврових потужностей. Що в свою чергу дозволить укріпити енергетичну незалежність, знизити дефіцит потужності генерації та покращить екологічну ситуацію за рахунок зменшення необхідності для задіяння традиційних теплових електричних станцій для задач підтримки балансу потужності в енергосистемі. Можливість об'єднуватись активним споживачам за допомогою агрегації в віртуальну електричну станцію дозволить їм перейти бар'єр входу в енергетичний ринок за потужністю. Це в свою чергу створить для них нові фінансові можливості та в результаті покращить рівень їх життя та бюджет громади. В результаті впровадження системи матимемо не тільки переваги на рівні країни, але й для окремих громад на території яких вона буде впроваджуватись. Розроблені математичні моделі та методи оптимізації дозволять впровадити таку систему у відповідності до всіх технічних вимог максимально економічно ефективно.